

Référentiel ISAE-SUPAERO

AVIATION ET CLIMAT

Septembre 2021



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



Ce document 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 est mis à disposition sous licence Creative Commons CC-BY-SA. Ce document a vocation à évoluer, pour apporter des corrections ou compléter des aspects manquants. Vous pouvez nous faire remonter tout commentaire à l'adresse contact-referentiel@isae-supero.fr.

Ce document, sa synthèse et les données utilisées pour faire les figures et les tableaux sont disponibles à l'adresse suivante :

[https://www.isae-supero.fr/fr/horizons-186/
referentiel-aviation-et-climat/referentiel-aviation-et-climat/](https://www.isae-supero.fr/fr/horizons-186/referentiel-aviation-et-climat/referentiel-aviation-et-climat/)

Merci de citer ce rapport de la manière suivante : *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>*



Avant-propos

Nous souhaitons exprimer nos remerciements aux membres de la direction de l'école, notamment le directeur général Olivier Lesbre et son adjointe de l'époque Marie-Hélène Baroux, pour le soutien et la confiance qu'ils nous ont accordés tout au long de ce projet. Marie-Hélène Baroux a notamment accueilli avec enthousiasme notre proposition d'écrire ce document lors d'une réunion à l'été 2020, ce qui nous a permis de nous lancer dans ce travail bibliographique collectif.

Nous remercions aussi Grégoire Casalis et Laurent Joly, respectivement directeur et directeur adjoint de la recherche et des ressources pédagogiques, d'avoir piloté le comité éditorial mis en place pour garantir l'intégrité scientifique de ce document. Ce document a ainsi suivi un processus de relecture spécifique composé de trois phases pendant lesquelles le document a été soumis à des relectures critiques de collègues en interne à l'ISAE-SUPAERO ainsi que de chercheurs externes.

Une version très préliminaire de ce document a été relue par nos collègues de l'ISAE-SUPAERO Sandrine Berger, Pierre-Marie Guineheuc, Florent Grotto et Aleksandar Joksimovic début 2021. Leurs retours nous ont permis de finaliser une première version plus aboutie, qui a alors été relue par nos autres collègues Nicolas Binder, Valérie Budinger-Pommier, Grégoire Casalis, Alain Haït, Joël Jézégou, Frédéric Lachaud, Olivier Lesbre, Jean-Marc Moschetta et Angélique Rissons. Nous avons ainsi pu améliorer la structure du document et sa lisibilité, ce qui nous a permis d'envoyer une version aboutie à sept relecteurs externes avec des compétences qui couvraient l'ensemble des sujets abordés. Ces relecteurs sont Olivier Boucher (IPSL), Philippe Novelli (ONERA), David Salas (CNRM), Bruno Savard (Polytechnique Montréal), Laurent Terray (CERFACS), Étienne Terrenoire (ONERA) et Xavier Vancassel (ONERA). Malgré cet important travail de relecture, les erreurs restantes sont évidemment de l'entière responsabilité des auteurs.

Nous remercions sincèrement tous ces relecteurs, internes et externes, pour leurs remarques constructives qui ont permis de grandement améliorer la qualité globale du document, tant sur la forme que sur le fond. Nous remercions tout particulièrement Laurent Terray de nous avoir fourni les sources de la figure 2.10 du sixième rapport d'évaluation du GIEC, ce qui nous a permis de les exploiter dans le chapitre 2 pour discuter en détail l'évaluation de l'impact climatique de l'aviation.

Abréviations

AEA	All Electric Aircraft
AIE	Agence internationale de l'énergie
AFAUT	Agriculture, foresterie et autres utilisations des terres
ATAG	Air Transport Action Group
BECS	Bioénergie avec capture et stockage du carbone
BLI	Boundary Layer Ingestion
BtL	Biomass-to-Liquid
CAST	Climate and Aviation - Sustainable Trajectories
CDN	Contributions nationalement déterminées
CEF	CORSIA Eligible Fuels
CEM	Compatibilité électromagnétique
COP	Conference Of Parties
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
CROR	Contra-Rotating Open Rotor
DAC	Direct Air Capture
DLUC	Direct Land Use Change
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EEE	Espace économique européen
EGTS	Electric Green Taxiing System
ERF	Effective Radiative Forcing
EU-ETS	European Union - Emissions Trading System
EWIS	Electrical Wiring Interconnection System
FRL	Fuel Readiness Level
FT	Fischer-Tropsch
GES	Gas à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids
HVO	Hydrotreated Vegetable Oils
IATA	International Air Transport Association
ICCT	International Council on Clean Transportation
ILUC	Indirect Land Use Change
MEA	More Electric Aircraft
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale

PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PRG	Pouvoir de réchauffement global
PtL	Power-to-Liquid
RF	Radiative Forcing
SAF	Sustainable Aviation Fuels
TRL	Technology Readiness Level
UHBR	Ultra High Bypass Ratio
UTCATF	Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie

Table des matières

Avant-propos	iii
Abréviations	v
I Introduction	1
Positionnement du rapport	3
Une polarisation du débat autour du secteur aérien...	3
... qui concerne l'ISAE-SUPAERO	4
Contenu du rapport	7
Objectifs	7
Méthodologie	7
Périmètre	8
Organisation	10
II Impact environnemental de l'aviation	11
1 Le réchauffement climatique	13
1.1 Un double consensus scientifique	13
1.2 Le climat, fruit d'un équilibre énergétique soumis à des effets de rétroaction	15
1.3 Limiter le réchauffement climatique	22
1.4 Climat et énergie	27
2 Aviation et climat	31
2.1 Effets CO ₂ et non-CO ₂	31
2.2 Évaluation de l'impact climatique de l'aviation	36
2.3 Comparaison des effets CO ₂ et non-CO ₂	44
2.4 Réglementation environnementale	46
2.5 Impact du changement climatique sur l'avion	47

3	Identité de Kaya	51
3.1	Formulation historique	51
3.2	Application au secteur aérien	52
III	Leviers technologiques	57
4	Principes généraux sur les avions	59
4.1	Comment vole un avion ?	59
4.2	Aérodynamique de l'avion	60
4.3	Propulsion de l'avion	61
4.4	Les systèmes avion	65
4.5	Quel est l'impact de la vitesse sur la consommation d'un avion ?	70
4.6	Comment améliorer l'efficacité d'un avion ?	71
5	Améliorer l'efficacité des avions	75
5.1	Amélioration des moteurs	75
5.2	Amélioration de l'aérodynamique	78
5.3	Allègement des avions	79
5.4	Amélioration des systèmes	81
5.5	Récapitulatifs des différentes améliorations envisageables	85
5.6	Ruptures technologiques : nouvelles architectures	87
6	Décarboner le carburant	91
6.1	L'électricité	91
6.2	L'hydrogène	93
6.3	Les carburants de synthèse	96
6.4	Comparaison du potentiel de décarbonation aux ressources éner- gétiques en 2018	111
7	Diminuer les effets non-CO₂	115
7.1	Changer les émissions	115
7.2	Changer les trajectoires	117
7.3	Réduction de la durée de vie des tourbillons de sillage	118
IV	Scénarios	119
8	Contexte général	121
8.1	Accord de Paris et scénarios du GIEC	121
8.2	Gouvernance de l'aviation internationale	123
8.3	Détermination de budgets carbone pour l'aviation	124
9	Analyse de scénarios pour l'aviation commerciale	129
9.1	Revue bibliographique	129
9.2	Exemples de scénarios durables	131
9.3	Analyse d'un scénario industriel	136
9.4	Études complémentaires	140

V	Conclusion et perspectives	151
	Conclusion	153
	Contexte	153
	Impact climatique	154
	Effets non-CO ₂ : des stratégies prometteuses	154
	Effets CO ₂ : des opportunités technologiques.	155
	... limitées par la rapidité et l'ampleur de leur déploiement	156
	Budget carbone du secteur aérien et croissance du trafic	157
	Envisager l'ensemble des leviers	157
	Perspectives : penser la transition du secteur aérien de manière systémique	159
	Impacts systémiques de l'aviation	159
	Penser la transition de manière systémique	161
VI	Annexes	165
	A Métriques équivalentes	167
	A.1 La métrique équivalente PRG (Pouvoir de réchauffement global)	167
	A.2 La métrique équivalente PRG*	169
	B Détails pour les calculs de l'impact climatique de l'aviation	173
	B.1 Index d'émission	173
	B.2 Consommation énergétique	174
	B.3 Émissions anthropiques	174
	B.4 Sources pour les calculs concernant l'estimation de l'impact climatique	174
	B.5 Résultats en limitant à l'aviation commerciale	174
	C Voies HEFA/HVO et Fischer–Tropsch	177
	C.1 Voie HEFA/HVO	177
	C.2 Voie Fischer–Tropsch	177
	Références	179
	Littérature scientifique : articles, thèses, livres, chapitres de livres	181
	Rapports du GIEC	195
	Autres : rapports institutionnels et d'acteurs privés	199

Première partie

Introduction

Positionnement du rapport

Une polarisation du débat autour du secteur aérien . . .

Les six dernières années entre 2015 et 2020 ont été les six années les plus chaudes jamais enregistrées, l'année 2020 étant l'une des trois plus chaudes avec 2016 et 2019^a. Il ne s'agit évidemment pas d'une coïncidence fortuite, mais bien d'une manifestation du réchauffement climatique : la décennie finissant en 2020 a été 1,2 °C plus chaude que la période 1850–1900. Alors que la réalité du changement climatique et son origine anthropique^b s'imposent progressivement dans la société civile, on observe une polarisation grandissante du débat public autour du secteur aérien.

D'un côté, l'aviation est sous le feu de critiques de plus en plus vives. En France, on peut par exemple penser à la marche sur les aéroports organisée le 3 octobre 2020, première manifestation visant explicitement des aéroports, ou encore aux oppositions d'une partie de la société civile aux projets de construction ou d'extension d'aéroports, projets que la Convention citoyenne pour le climat a notamment proposé d'interdire^c. Les critiques émanent aussi directement du secteur aéronautique, comme en atteste la création récente de deux collectifs de salariés, Aéro-Décarbo^d et ICARE, qui visent tous deux à contribuer à la réflexion sur l'aéronautique et l'aviation dans le contexte du changement climatique. Ce mouvement n'est pas limité à la France, que l'on pense à l'opposition à l'extension de l'aéroport Heathrow ou encore au mouvement *flygskam* né en Suède et qui s'est ensuite rapidement propagé dans le monde entier. Une constante de ces critiques est de pointer du doigt la responsabilité du secteur aérien dans le réchauffement climatique et d'exiger que le trafic qu'il génère soit maîtrisé de façon à le rendre compatible avec l'accord de Paris.

D'un autre côté, l'industrie met en avant l'impact écologique positif des

a. [2020 Was One of Three Warmest Years on Record](#), UNCC, 14 janvier 2021.

b. L'adjectif anthropique qualifie tout phénomène qui peut être une conséquence de la présence ou de l'action de l'être humain.

c. On peut penser à Notre-Dame-des-Landes, mais aussi à la récente décision du gouvernement français d'abandonner le projet d'extension de l'aéroport de Roissy : [Jugé « obsolète », le projet de nouveau terminal à l'aéroport de Roissy abandonné par le gouvernement](#), Le Monde, 11 février 2021.

d. Ce collectif d'anciens élèves de l'ISAE-SUPAERO et de salariés du secteur aéronautique a été fondé sous le nom de Supaéro-Décarbo avant de prendre son nom actuel.

avons lorsqu'ils permettent d'éviter la construction d'infrastructures lourdes (notamment des tunnels) ou de diminuer l'empreinte au sol, préservant ainsi la biodiversité, ainsi que la contribution importante du secteur aérien à la fois à la paix et à l'économie mondiale. Le secteur aérien reconnaît son impact sur le climat mais promet des solutions technologiques qui permettront de rendre le trafic aérien durable. Alexandre de Juniac, directeur général de l'IATA ^a, affirme ainsi qu'« [arrêter ou réduire fortement les vols] aurait de graves conséquences pour les personnes, les emplois et les économies du monde entier. Ce serait un pas en arrière vers une société isolée, plus petite, plus pauvre et plus limitée. Travaillons ensemble pour rendre l'aviation durable. Le problème, c'est le CO₂. Nous pouvons faire quelque chose de significatif pour le réduire, et nous le faisons. » ^b Cette ambition se traduit dans de nombreux programmes industriels, parfois en partenariat avec la puissance publique, visant à développer une aviation bas-carbone. Au niveau européen le partenariat Clean Aviation cherche à définir une feuille de route pour arriver à la neutralité carbone en 2050 ^c. Dans cette veine, 2021 doit voir la mise en place sous l'égide de l'OACI ^d de CORSIA, un système de compensation carbone pour les émissions de l'aviation internationale. Par ailleurs, de nombreuses innovations technologiques et opérationnelles sont envisagées pour atténuer l'impact climatique du secteur aérien. Airbus a notamment dévoilé fin 2020 son plan ZEROe qui vise à développer des avions à hydrogène d'ici 2030–2035 ^e alors que Boeing a pour objectif de savoir réaliser ses vols commerciaux avec des carburants 100 % renouvelables ^f.

... qui concerne l'ISAE-SUPAERO

L'ISAE-SUPAERO est concerné au premier plan par ces débats qui l'appellent à se positionner pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'Institut a démontré sa vocation historique à apporter des solutions technologiques aux grands défis de l'aviation. Dès sa création, des étudiants des promotions 1910 et 1913 de l'École supérieure d'aéronautique (ancêtre de l'ISAE-SUPAERO) ont ainsi contribué au développement de la turbine de Coanda et de l'hélice Éclair de Bloch–Dassault. Cette culture s'est maintenue jusqu'à ce jour, l'ISAE-SUPAERO ayant récemment participé à de nombreux programmes aérospatiaux novateurs comme les programmes Caravelle, Concorde, Ariane, Rafale, A380, ... Répondre à des défis fait ainsi partie de la culture de l'établissement qui contribue actuellement à la recherche de solutions technologiques au problème du réchauffement climatique. On peut par exemple mentionner le projet Drone Mermoz ^g qui a pour ambition de participer au développement de technologies de rupture pour

a. L'[International Air Transport Association](#) ou IATA, fondée en 1945, est une organisation commerciale internationale de sociétés de transport aérien et un lobby. En novembre 2014, elle regroupe 250 compagnies qui représentent 84 % du trafic mondial de passagers (source : [Wikipedia, article IATA](#), site consulté le 11 mars 2021).

b. [Working Towards Ambitious Targets](#), IATA, consulté le 21 février 2021.

c. [Clean Aviation](#), consulté le 10 mai 2021.

d. L'[Organisation de l'aviation civile internationale](#) ou OACI, est un organisme onusien créé en 1944 par la convention de Chicago qui participe à l'élaboration des politiques et des normes qui permettent la standardisation du transport aéronautique international.

e. [ZEROe – Towards the world's first zero-emission commercial aircraft](#), Airbus, consulté le 3 mars 2021.

f. [Boeing opte pour le carburant 100 % renouvelable](#), Portail de l'IE, 26 janvier 2021.

g. Plus de détails concernant le projet Drone Mermoz sur la [page de présentation du projet](#).

l'aviation bas-carbone via la technologie hydrogène, ou encore les trois chaires industrielles avec Airbus, Daher et Safran orientées sur les architectures aéronaves et propulsion innovantes ^a.

Ensuite, le contexte institutionnel, industriel et social actuel pousse vers le développement de recherches visant à diminuer l'impact climatique de l'aviation. La Commission européenne a ainsi lancé un nouveau programme de financement de la recherche, Horizon Europe, dont un des quatre piliers est de contribuer « à répondre aux problématiques mondiales, dont les objectifs de développement durable » ^b (qui incluent le climat). Elle a aussi initié plusieurs partenariats public-privé, notamment le programme Clean Sky qui vise à réduire l'impact environnemental de l'aviation, répondre aux besoins de la société et assurer le leadership européen en matière aéronautique ^c, le programme Piles à Combustible et Hydrogène dont l'objectif est de faciliter l'introduction de ces technologies sur le marché européen ^d ou encore le programme SESAR qui cherche à améliorer la gestion du trafic aérien ^e.

Enfin, une proportion croissante des personnels et étudiants de l'ISAE-SUPAERO ressent la nécessité de s'engager pleinement dans cette voie. De nombreuses initiatives émergent ainsi. Au niveau de la communauté des chercheurs, on peut penser au collectif de chercheurs Labos 1.5, fondé en mars 2019 et qui compte aujourd'hui plus de 500 membres, dont l'objectif est « d'emmenner l'ensemble de la communauté de recherche française dans une démarche de transformation axée sur la réduction de son empreinte environnementale » ^f. Au niveau des étudiants, 700 étudiants du secteur aéronautique, dont 335 de l'ISAE-SUPAERO, ont signé en mai 2020 une tribune dans le journal Le Monde pour plaider en faveur d'une réduction du trafic aérien ^g. Cela traduit une montée de la prise de conscience écologique notamment des jeunes générations qui s'inquiètent de leur avenir et s'inscrit dans une démarche estudiantine plus large, comme la COP étudiante, le manifeste étudiant pour un réveil écologique ou encore la récente lettre ouverte des étudiants d'HEC pour un directeur « vert » ^h, qui cherche à mettre les enjeux environnementaux au cœur des programmes de formation. Continuer à attirer d'excellents étudiants nécessite donc de prendre en compte ces considérations, et les formations au sein de notre Institut ont en effet commencé à évoluer dans ce sens.

a. [Les chaires – Fondation ISAE-SUPAERO](#), consulté le 10 mai 2021.

b. [Présentation du programme Horizon Europe](#), consulté le 8 février 2021.

c. [History | Clean Sky](#), consulté le 10 mai 2021.

d. [Mission & Objectives](#), consulté le 10 mai 2021.

e. [SESAR Joint Undertaking](#), consulté le 10 mai 2021.

f. [Labos 1.5](#), consulté le 8 février 2021.

g. [Aéronautique: « La transition écologique impose une profonde transformation de notre industrie »](#), Le Monde, 29 mai 2020.

h. [Pascal Galinier, Les étudiants de HEC veulent un patron « vert » pour leur école](#), Le Monde, 13 janvier 2021.

Contenu du rapport

Objectifs

Les innovations technologiques seront-elles suffisantes pour rendre l’aviation durable ? Disposerons-nous de suffisamment de ressources énergétiques pour permettre la transition pour l’ensemble de la flotte ? Quel pourra être le niveau de trafic aérien durable de demain ? Ces questions traversent les débats publics et leurs réponses sous-tendent le positionnement des différents acteurs sur ce sujet : décarbonons l’aviation dit Alexandre de Juniac, clouons les avions au sol lui répond Stay Grounded ^a.

Si ces questions ont motivé l’écriture du présent rapport, son objectif n’est pas de prendre parti ni d’y répondre car les réponses dépendent en grande partie de choix de société et d’évolutions techno-économiques impossibles à prédire avec certitude. En revanche, **l’objectif de ce rapport est de fournir à chacun, à partir de notre position de scientifiques, les éléments nécessaires à la construction d’opinions éclairées sur ces questions, aussi objectivement que possible.** Par effet d’entraînement, nous espérons aussi via ce rapport susciter des débats en interne et ainsi participer à l’émergence d’un positionnement collectif sur ces enjeux cruciaux.

Méthodologie

Pour produire un document aussi objectif que possible, nous avons fait le choix de nous appuyer de manière quasi exclusive sur la littérature scientifique disponible : nous nous sommes basés sur d’autres sources seulement lorsqu’une information recherchée n’y était pas disponible. Ces autres sources sont nombreuses : en effet, les liens entre aviation et climat ont récemment fait l’objet de nombreux rapports, à la fois de la part d’acteurs institutionnels (l’Union européenne ou l’OACI par exemple), industriels (notamment IATA et ATAG ^b), privés (notamment des cabinets de conseil, McKinsey, Roland Berger ou BL Evolution, pour n’en citer que quelques-uns) ou encore associatifs ou issus de la société civile (par exemple Öko-Institut, ICCT, Transport & Environment,

a. [Stay Grounded](#) ou Rester sur Terre est une association qui milite pour la réduction du transport aérien et de ses impacts négatifs.

b. Le [Air Transport Action Group](#) ou ATAG est une coalition d’industries, de compagnies et d’organisations du secteur aérien. L’IATA est notamment l’un de ses membres.

Shift Project, Biofuelwatch ou Stay Grounded). Ces rapports se sont révélés être de précieuses sources d'information qui nous ont souvent permis de remonter à la source académique sous-jacente. En dernière instance et lorsque cela n'a pas été possible, nous avons cité ces rapports directement.

Travailler sur le climat nécessite de s'appuyer sur des chiffres qui peuvent varier d'une source à l'autre, comme par exemple l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre (GES), et qui sont soumis à des incertitudes plus ou moins fortes. Concernant les sources, nous avons fait le choix de prendre au maximum les données citées dans les rapports du GIEC, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Il s'agit d'un organisme intergouvernemental ouvert à tous les pays membres de l'ONU qui regroupe aujourd'hui 195 membres. Il vise à « fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade »^a. Nous nous sommes aussi basés sur le rapport spécial 1,5 °C du GIEC pour définir dans le chapitre 9 ce que serait une trajectoire compatible avec l'objectif de l'accord de Paris. Concernant les incertitudes, celles concernant l'impact climatique de l'aviation sont indiquées dans le chapitre 2, mais les incertitudes d'ordre plus général (par exemple sur les émissions de gaz à effet de serre ou les valeurs de forçage radiatif) sont omises dans un souci de clarté d'exposition.

Le GIEC ne produit pas à proprement parler de nouveaux résultats scientifiques, mais il synthétise l'ensemble des connaissances disponibles dans la littérature scientifique, qu'il assortit d'évaluations sur leur degré de confiance. Les rapports du GIEC se divisent en deux catégories :

- des **rapports d'évaluation**, ou *assessment report* : nous utilisons notamment des données des cinquième et sixième rapports d'évaluation (AR5 et AR6) qui datent respectivement de 2013 et 2021 ;
- des **rapports spéciaux** répondant à des problématiques données. Nous avons notamment pris des données du rapport spécial 1,5 °C de 2018, qui vise à décrire des trajectoires limitant le réchauffement climatique à +1,5 °C et à analyser les différences entre un réchauffement de +1,5 °C et de +2 °C.

Périmètre

Ce document décrit l'impact climatique de l'aviation, qui se décompose en effets CO₂ et non-CO₂ détaillés dans le chapitre 2. Il permet d'étudier et d'évaluer les leviers d'action pour diminuer cet impact. Si les effets non-CO₂ dominent actuellement largement les effets CO₂, nous nous concentrerons dans ce rapport principalement sur les effets CO₂ car ils ont un effet de long terme sur le climat et les incertitudes associées sont plus faibles. De plus, les méthodologies pour les étudier sont mieux établies. On peut par exemple les lier à la notion de budget carbone pour essayer de déterminer des trajectoires de trafic aérien alignées avec les objectifs de l'accord de Paris.

On décompose classiquement l'aviation en trois grands secteurs qui ensemble constituent l'aviation globale : l'aviation commerciale (passager et fret), l'aviation militaire et l'aviation générale ou privée (aviation d'affaires ou de loisir,

a. [GIEC](#), consulté le 3 mars 2021.

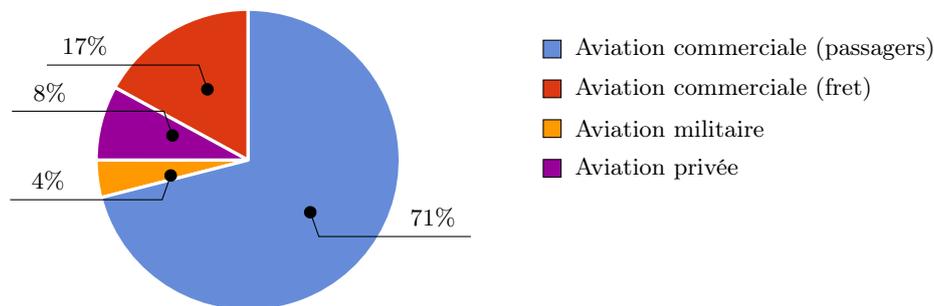


FIGURE 1 – Répartition des émissions de CO₂ de l'aviation globale en 2018 en fonction du type d'aviation. D'après la figure 1 de Gössling et Humpe¹.

secours. . .) Dans le reste du rapport, nous considérerons principalement l'aviation commerciale puisqu'elle représente l'essentiel des impacts climatiques de l'aviation, voir figure 1. En 2018, cette dernière représentait en effet 88 % des émissions de CO₂ de l'aviation globale, contre respectivement 8% et 4% pour l'aviation militaire et privée¹. Le chapitre 2 détaille cette distinction alors que le reste du rapport se concentre sur l'aviation commerciale. Cette dernière est composée d'avions suivant les normes FAR25/CS25, allant des avions régionaux aux avions long-courriers. Par conséquent, seules les caractéristiques techniques de ces avions sont considérées dans ce rapport. Ainsi, les différents leviers d'amélioration de l'efficacité discutés dans la partie III sont spécifiques à cette gamme d'avions. Pour simplifier, dans le reste du rapport et hors mention contraire (chapitre 2), on entend par « aviation » l'aviation commerciale.

Ce rapport se concentre essentiellement sur les aspects techniques du lien entre aviation et climat qui constituent en partie le cœur de métier de l'ISAE-SUPAERO. Il étudie en particulier les leviers techniques concernant l'avion à proprement parler que l'on peut actionner afin de diminuer les impacts CO₂ et leurs limites. Nous détaillons notamment dans la partie III les innovations techniques envisagées pour améliorer l'efficacité d'un avion, les nouveaux vecteurs énergétiques possibles pour décarboner l'aviation ainsi que les possibilités de lutte contre les effets non-CO₂. La partie IV se concentrera quant à elle sur l'étude de scénarios compatibles avec l'accord de Paris.

Des sujets importants sont toutefois peu détaillés ou laissés de côté. Nous n'abordons ainsi que rapidement les aspects opérationnels lorsque nous présentons dans le chapitre 7 les leviers envisagés pour diminuer les effets non-CO₂. Il s'agit d'une limitation du présent rapport, que nous envisageons de pallier lors de versions ultérieures en détaillant par exemple des sujets comme l'optimisation de trajectoires, la gestion du trafic aérien, les vols en formation ou l'utilisation de l'énergie des infrastructures aéroportuaires. Toutefois, l'impact de l'amélioration des opérations est considéré dans l'analyse de scénarios prospectifs au chapitre 9 en considérant les ordres de grandeur usuels. Par ailleurs, malgré l'importance de ces questions pour la transition du secteur aérien, nous n'abordons pas les aspects économiques (par exemple, l'impact des nouveaux vecteurs énergétiques sur le coût d'un vol ou encore l'importance de l'aviation dans l'économie mondiale), sociologiques (par exemple, qui vole et pourquoi, quels sont les besoins auxquels l'aviation répond) et de régulation (par exemple,

le rôle de la gouvernance du secteur aérien dans la lutte contre les impacts climatiques).

Organisation

Le document est structuré en cinq grandes parties, dont la première se conclut ici.

La deuxième partie (chapitres 1 à 3) dresse un constat environnemental de la situation actuelle. Le chapitre 1 explique tout d'abord les grands mécanismes du changement climatique. Ensuite, le chapitre 2 s'intéresse plus spécifiquement à l'impact climatique de l'aviation. Enfin, le chapitre 3 introduit une décomposition de Kaya spécifique à l'aviation, dont les termes représentent les leviers d'action pertinents pour modéliser l'évolution historique et future de son impact climatique.

La troisième partie (chapitres 4 à 7) présente les leviers d'action technologiques pour limiter l'impact climatique de l'aviation. Après une introduction sur le fonctionnement d'un avion dans le chapitre 4, différents leviers techniques sont détaillés : amélioration de l'efficacité (chapitre 5), décarbonation par l'utilisation de nouveaux vecteurs énergétiques (chapitre 6) et mesures pour lutter contre les effets non-CO₂ (chapitre 7).

La quatrième partie (chapitres 8 et 9) discute de différents scénarios pour l'aviation à horizon 2050. Nous présentons dans le chapitre 8 des éléments généraux de contexte sur les trajectoires futures pour l'aviation, notamment une méthodologie spécifique d'évaluation de durabilité de scénarios basée sur le concept de budget carbone. Le chapitre 9 présente quant à lui un état de l'art d'études académiques sur des scénarios prospectifs pour l'aviation ainsi que des résultats d'analyse de trajectoires à l'aide de CAST, un outil développé à l'ISAE-SUPAERO.

Le rapport se termine dans la cinquième partie par une conclusion qui dresse un bilan, ainsi qu'une présentation de pistes de réflexion visant à élargir le débat au-delà des questions énergie/climat traitées dans le rapport.

Deuxième partie

Impact environnemental de l'aviation

Cette partie vise à expliquer l'impact du secteur aérien sur le climat. Le chapitre 1 présente les grands mécanismes du changement climatique et se conclut par une introduction de la notion de limites planétaires qui est approfondie dans la dernière partie du rapport. Nous présentons dans le chapitre 2 l'état des connaissances scientifiques sur l'impact climatique de l'aviation. Enfin, le chapitre 3 permet d'introduire une décomposition de Kaya spécifique à l'aviation, dont les termes représentent les leviers d'action pertinents pour modéliser l'évolution historique et future de son impact climatique.

Chapitre 1

Le réchauffement climatique

1.1 Un double consensus scientifique

Concernant le climat, il y a dorénavant un double consensus scientifique fermement établi : d'une part, le climat terrestre se réchauffe, et d'autre part, ce réchauffement est d'origine anthropique.

1.1.1 La réalité du réchauffement climatique

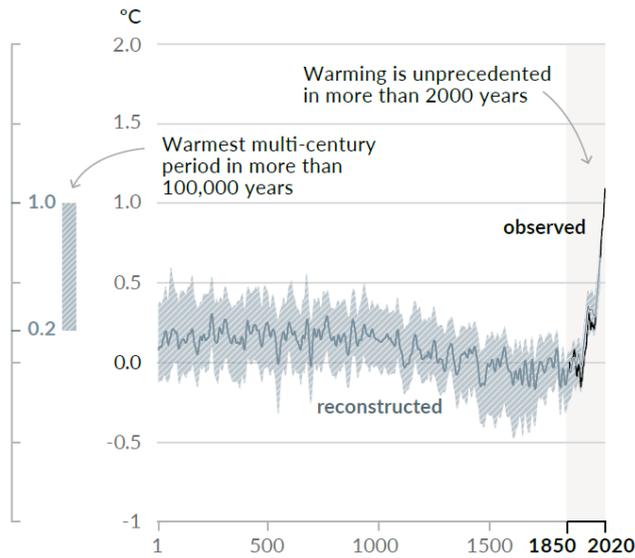
Le réchauffement climatique se confirme sur de nombreuses données : hausse de la température à la surface du globe comme illustré sur la figure 1.1 (+1,09 °C sur la décennie 2011–2020 par rapport à la période 1850–1900), hausse du niveau moyen des mers (+20 cm entre 1901 et 2018), acidification des océans (diminution du pH de 0,08 entre 1950 et 2015) ou encore fonte des glaces (diminution de 40% de la surface de la banquise arctique en septembre entre 1979–1988 et 2010–2019), sont des exemples de tendances moyennes (en espace et en temps) qui indiquent un réchauffement climatique global^{IPC21}. Ensemble, elles ne laissent aucune place au doute et font dire au GIEC que « le réchauffement climatique est sans équivoque »^{IPC14a}. Ces observations sont d'autant plus convaincantes qu'elles se doublent d'une explication mécanistique : non seulement les scientifiques observent le réchauffement climatique, mais ils savent aussi en expliquer les principaux mécanismes. Ces explications mécanistiques ont été validées à l'aide de modèles numériques qui simulent une évolution des températures passées compatible avec les observations^{FMA+13}, à l'image de la figure 1.1.

Entre les périodes 1850–1900 et 2011–2020, la température moyenne globale à la surface de la Terre a donc augmenté de 1,09 °C. Cette valeur correspond à une moyenne géographique et cache de fortes disparités puisque les températures se réchauffent presque deux fois plus vite au-dessus des terres émergées. Ainsi, la température moyenne au-dessus des terres a augmenté de 1,59 °C dans le même laps de temps, contre 0,88 °C au-dessus des océans^{IPC21}.

1.1.2 L'origine anthropique du réchauffement

La température moyenne globale est le fruit d'un équilibre énergétique entre l'énergie reçue du Soleil et l'énergie réémise par la Terre (cf. section 1.2). De nom-

a) Change in global surface temperature (decadal average) as reconstructed (1-2000) and observed (1850-2020)



b) Change in global surface temperature (annual average) as observed and simulated using human & natural and only natural factors (both 1850-2020)

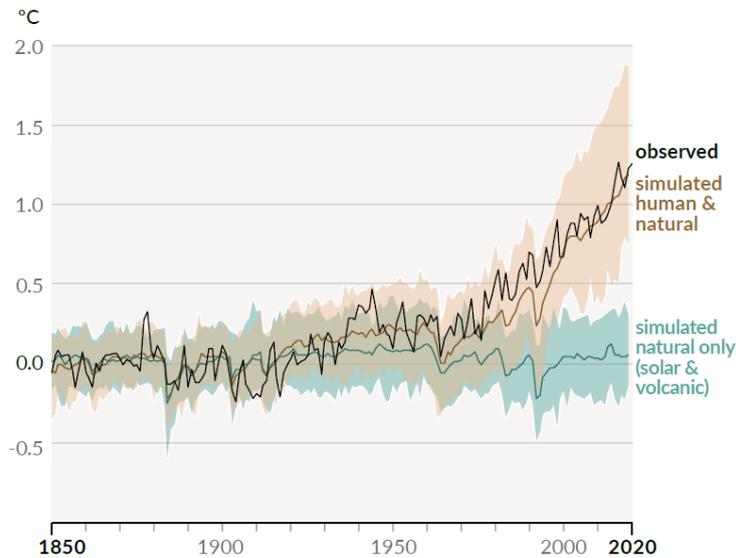


FIGURE 1.1 – Élévation de la température à la surface du globe par rapport à la période 1850–1900. En haut, l'élévation globale observée depuis 1850 (en noir) et reconstruite depuis l'an 1 (en bleu). En bas, la comparaison avec les modélisations, incluant ou non les effets anthropiques. D'après la figure SPM.1 *Changes in global surface temperature relative to 1850-1900* en page 7 du résumé aux décideurs du sixième rapport d'évaluation du groupe de travail I du GIEC^{IPCC21}.

breux facteurs gouvernent cet équilibre : certains ne sont pas d'origine humaine, comme l'activité solaire, les éruptions volcaniques ou encore les variations orbitales de la Terre, et d'autres le sont, comme les émissions de CO₂ fossile et des aérosols anthropiques ou encore la déforestation et le changement d'affectation des sols.

Jusqu'au début des années 2000, les débats étaient encore vifs dans la communauté scientifique sur la question de l'importance relative de chaque facteur et donc de l'origine humaine ou non du réchauffement climatique. Ainsi, le GIEC note prudemment dans son premier rapport d'évaluation en 1990 que « les émissions résultant des activités humaines augmentent substantiellement les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre », sans directement établir le lien avec le réchauffement passé, et étudie « comment les activités humaines pourraient changer le climat global »^{IPC10}. La question est désormais tranchée, le GIEC considérant ainsi depuis son troisième rapport d'évaluation de 2001 que « la plupart du réchauffement observé durant les 50 dernières années est attribuable aux activités humaines »^{IPC01}. En France, un débat a eu lieu à l'académie des sciences en 2010 qui a conclu que l'« augmentation [du réchauffement climatique] est principalement due à l'augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère », elle-même « incontestablement due à l'activité humaine »^{PBSC10}. Plus récemment à l'occasion de son sixième rapport d'évaluation de 2021, le GIEC a conclu à une influence sans équivoque des activités humaines sur la réchauffement de l'atmosphère, des océans et des terres^{IPC21}, à l'image de la correspondance entre les observations et les simulations de la figure 1.1. Ainsi, les activités humaines ont augmenté la température moyenne à la surface de +1,07 °C entre les périodes 1850–1900 et 2011–2020, contre une augmentation mesurée de +1,09 °C. La figure 1.2 illustre les contributions des différents facteurs naturels et humains au réchauffement observé et montre clairement que les facteurs humains dominent largement.

1.2 Le climat, fruit d'un équilibre énergétique soumis à des effets de rétroaction

1.2.1 Bilan radiatif

Le Soleil, comme tout corps chaud, émet de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques qui se propagent dans le vide et dont une partie arrive sur la Terre, lui procurant ainsi de l'énergie stockée sous forme de chaleur. La Terre, devenant ainsi un corps chaud, réémet à son tour de l'énergie, toujours sous forme d'ondes électromagnétiques. Lorsque le climat est à l'équilibre, le bilan énergétique de la Terre est nul : l'énergie qui lui arrive depuis le Soleil est égale à l'énergie qu'elle réémet, on parle alors d'**équilibre radiatif**. Aujourd'hui la Terre est en **déséquilibre radiatif** : elle réémet moins d'énergie qu'elle n'en reçoit. L'énergie en surplus est stockée dans les océans à plus de 90%. Le reste de ce surplus d'énergie contribue à réchauffer les surfaces continentales (~ 3%), faire fondre les glaces (~ 3%) et réchauffer l'atmosphère (~ 1%). La forte inertie des océans à restituer l'effet de cette accumulation d'énergie sur le climat explique les effets à long terme d'un déséquilibre radiatif.

La quantité d'énergie qui arrive sur Terre est décrite par la puissance surfacique moyenne, exprimée en watt par mètre carré et notée W m^{-2} . Cette

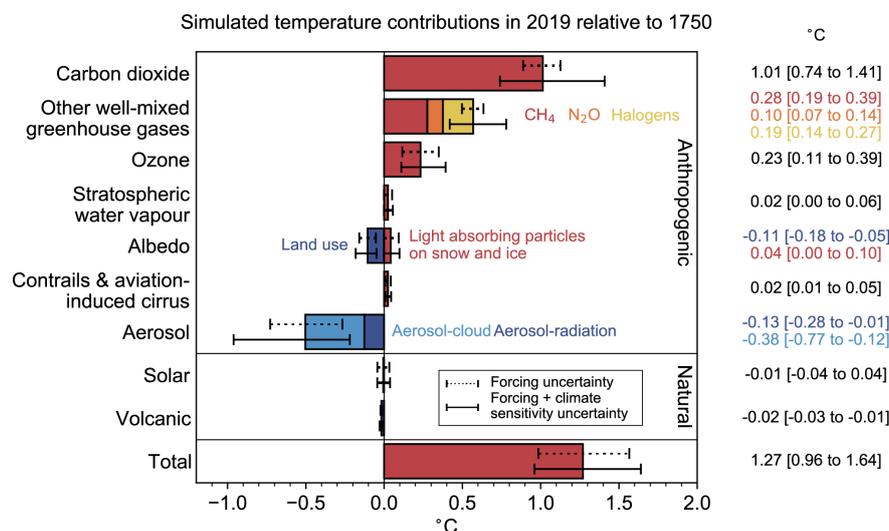


FIGURE 1.2 – Contribution des différents facteurs en terme de température simulée entre 1750 et 2019. La contribution anthropique résulte notamment des gaz à effet de serre qui augmentent les températures, hausse partiellement compensée par d’autres effets anthropiques, principalement les aérosols qui ont un effet global refroidissant. Les autres causes, notamment les causes naturelles représentent une contribution négligeable. D’après la figure 7.7 du chapitre 7 du sixième rapport d’évaluation du groupe de travail I du GIEC^{FSA+21}.

puissance surfacique moyenne vaut 340 W m^{-2} ce qui veut dire que chaque seconde, trois cent quarante joules d’énergie arrivent en moyenne sur chaque surface d’un mètre carré du haut de l’atmosphère terrestre. Il s’agit d’une moyenne à la fois temporelle et spatiale : à un instant donné, les surfaces non éclairées par le Soleil n’en reçoivent pas et les différences d’incidence des rayons solaires entraînent des différences en fonction de la latitude. La figure 1.3 décrit ce que deviennent ces 340 W m^{-2} indiqués par la flèche entrante jaune. L’addition des deux flèches sortantes jaune et orange suggère qu’il ressort moins d’énergie ($100+239=339 \text{ W m}^{-2}$) que ce qui arrive (340 W m^{-2}). Même si des incertitudes pèsent sur chacun des flux individuels, il est certain que le déséquilibre radiatif (la partie *imbalance* de la figure) est positif, *i.e.* la Terre émet moins d’énergie qu’elle n’en reçoit. Ce déséquilibre radiatif est estimé à $0,7 \text{ W m}^{-2}$ actuellement^{FSA+21}. Pour comprendre ce déséquilibre, deux mécanismes principaux sont en jeu^a : la réflexion des rayons solaires (quantifiée par l’**albédo**) et l’**effet de serre**. Nous présenterons aussi les **aérosols** qui jouent un rôle important sur l’albédo et l’effet de serre.

1.2.2 Albédo

Sur les 340 W m^{-2} incidents, 100 W m^{-2} sont directement réfléchis dans l’espace par les nuages, l’atmosphère et le sol : cette propriété de réflectance d’une

a. Il est à noter que la chaleur dégagée directement par les activités humaines (par exemple par le chauffage) est négligeable dans ce déséquilibre.

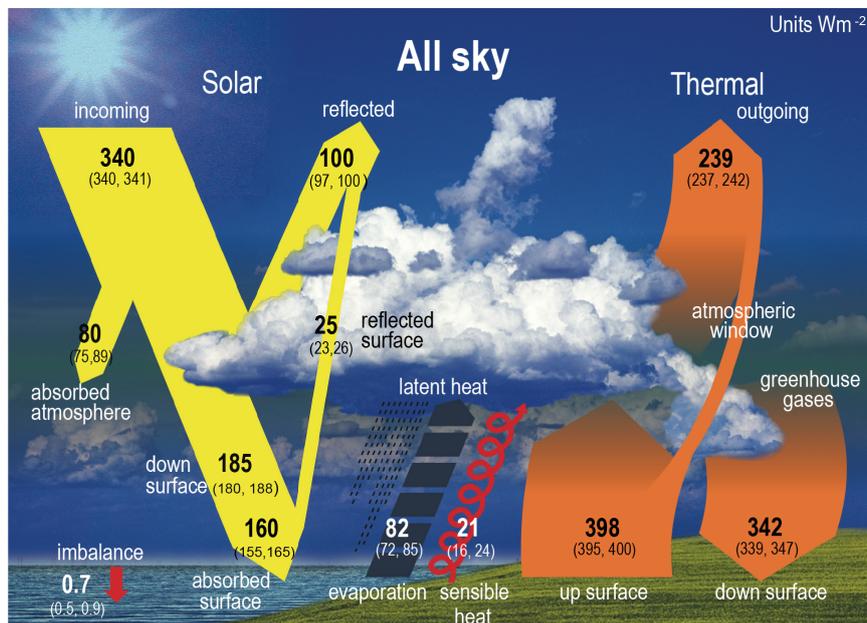


FIGURE 1.3 – Bilan radiatif de la Terre : sur les $340 W m^{-2}$ qui arrivent sur Terre par radiation solaire, $100 W m^{-2}$ sont directement réfléchis (effet albédo), $239 W m^{-2}$ sont réémis par la Terre dans un spectre différent (radiation thermique) et $0,7 W m^{-2}$ sont absorbés par la Terre et induisent son réchauffement. Les nombres entre parenthèses attachés aux flux d'énergie couvrent la gamme des valeurs en accord avec les contraintes d'observation. D'après la figure 7.7 du chapitre 7 du sixième rapport d'évaluation du groupe de travail I du GIEC^{FSA+21}.

surface est mesurée par un coefficient appelé l'**albédo**. Il s'agit d'un nombre sans unité compris entre 0 et 1 qui quantifie la proportion d'énergie réfléchi : l'albédo moyen de la Terre vaut donc environ $100/340 \approx 0,3$. Un albédo de 0 indique qu'une surface laisse passer ou absorbe l'intégralité du rayonnement solaire qui lui arrive, et un albédo de 1 qu'elle le réfléchit intégralement. Les nuages de basse altitude (type cumulus ou stratus) ont ainsi un albédo relativement élevé, pouvant aller jusqu'à 0,9 pour les cumulonimbus (qui empêchent effectivement de voir le Soleil) alors que les nuages de haute altitude (comme les cirrus induits par les traînées de condensation des avions) ont un albédo beaucoup plus faible, typiquement entre 0,2 et 0,4. Différents éléments de la surface terrestre ont des albédos très différents, par exemple plus de 0,8 pour la neige fraîche et moins de 0,1 pour l'eau.

1.2.3 Effet de serre

La quantité d'énergie restante, soit $340 - 100 = 240 W m^{-2}$, est donc absorbée par la Terre (dans les océans, la biosphère, la cryosphère, la lithosphère et l'atmosphère) sous forme de chaleur elle-même dissipée sous forme d'ondes électromagnétiques. Le spectre d'émission d'un corps chaud est gouverné par sa température via la loi de Planck : ainsi, le Soleil émet des ondes dont la longueur d'onde est comprise entre $0,2 \mu m$ et $3 \mu m$, alors que les ondes émises par

la Terre, corps beaucoup moins chaud, sont dans le spectre infra-rouge avec des longueurs d'onde comprises entre 3 μm et 70 μm .

Or, certains gaz constitutifs de l'atmosphère réagissent aux longueurs d'onde terrestres mais pas solaires : ainsi, ils « laissent passer » l'énergie entrante mais absorbent une partie de l'énergie réémise par la Terre, qu'ils transforment en chaleur. Ce sont les **gaz à effet de serre**. Seuls les gaz composés de plus de trois atomes peuvent absorber les ondes émises par la Terre dans le spectre infrarouge. Ainsi, le diazote (N_2), le dioxygène (O_2) et l'argon (Ar), qui constituent plus de 99,9 % de l'atmosphère terrestre, ne sont pas des gaz à effet de serre. Parmi les moins de 0,1 % de gaz restants, on trouve notamment de la vapeur d'eau (H_2O) qui est le principal gaz à effet de serre d'origine naturelle, de l'ozone (O_3), du dioxyde de carbone (CO_2) qui est le principal gaz à effet de serre d'origine anthropique, ainsi que du méthane (CH_4) et du protoxyde d'azote (N_2O).

Afin de respecter l'équilibre thermique du système Terre, plus l'effet de serre est fort et plus la température de la Terre doit être élevée afin que les gaz à effet de serre « laissent passer » suffisamment d'énergie sortante pour compenser l'énergie entrante. Cette explication est une bonne description de ce qui se passe notamment pour la vapeur d'eau. Néanmoins, pour le dioxyde de carbone, la situation est plus subtile. En effet, l'absorption sur toute la hauteur de l'atmosphère du rayonnement infrarouge par le dioxyde de carbone est quasi maximale. Ainsi, cette absorption ne dépend que très faiblement d'une variation de la concentration de ce gaz, on dit que l'*absorptivité est saturée*. En fait, une hausse de la concentration de CO_2 n'augmente l'effet de serre qu'indirectement en augmentant l'*altitude d'émission*, cf. l'article très pédagogique de Dufresne et Treiner pour plus de détails².

Les différents gaz à effet de serre ont un effet plus ou moins fort sur l'effet de serre et ont différentes durées de vie. Pour les comparer, on utilise habituellement le concept de potentiel de réchauffement global (PRG, ou GWP pour *global warming potential* en anglais) qui permet de convertir les émissions d'un gaz à effet de serre en équivalent CO_2 en prenant notamment en compte ces deux facteurs, puissance et durée : on parlera alors de CO_2 équivalent, notée $\text{CO}_2\text{-eq}$. Pour convertir des émissions d'un gaz en équivalent CO_2 , la méthode PRG met en équivalence l'impact climatique d'une impulsion d'émission d'une tonne du gaz considéré par rapport à une impulsion d'émission d'une tonne de CO_2 . Ce calcul nécessite de fixer un horizon temporel sur lequel l'impact climatique est évalué, qui est en général fixé à 100 ans (cf. annexe A pour plus de détails).

L'effet de serre est donc un phénomène naturel, en fait essentiel à l'habitabilité de la Terre : s'il n'y avait pas d'effet de serre, la température moyenne de la Terre serait d'environ -18°C contre $+15^\circ\text{C}$ aujourd'hui^{2 a}. Le problème n'est donc pas l'effet de serre, mais son renforcement dû aux émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique. La figure 1.4 illustre ainsi l'évolution des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique qui sont passées de 29 $\text{GtCO}_2\text{-eq}$ en 1970 à 57 $\text{GtCO}_2\text{-eq}$ en 2019. Ces émissions ont induit une hausse de la concentration atmosphérique des trois plus importants gaz à effet de serre d'origine anthropique que sont le dioxyde de carbone, le méthane et

a. Cette valeur de -18°C est obtenue en prenant l'albédo actuel de la Terre (0,3). Or, supprimer l'effet de serre implique de supprimer la vapeur d'eau qui est à l'origine de la création des nuages qui participent à l'albédo. Si l'on calcule la température de la Terre sans effet de serre et sans nuage (avec un albédo plus faible donc, de l'ordre de 0,1), on obtiendrait une température d'équilibre de la Terre de -2°C .

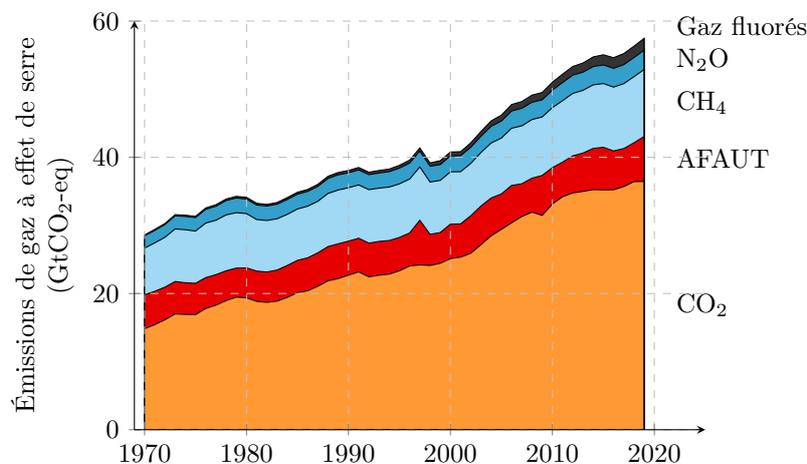


FIGURE 1.4 – Évolution des émissions de gaz à effet de serre entre 1970 et 2019. AFAUT est l’acronyme pour *agriculture, foresterie et autres utilisations des terres* et ne comprend ici que les émissions de CO₂ liées à ce secteur. Les émissions de méthane et de protoxyde d’azote du secteur AFAUT sont comptées dans les catégories CH₄ et N₂O. Les données pour le CO₂ viennent du Global Carbon Budget 2020⁴ et les données pour les autres gaz à effet de serre viennent de Olivier et Peters^{OP20}.

le protoxyde d’azote. Ainsi, le dioxyde de carbone représentait 0,028 % de la composition atmosphérique en 1750 et 0,040 %^{3 a} en 2018 et c’est cette hausse, en apparence minime, qui est la cause principale du réchauffement climatique actuel comme on le verra ci-dessous.

1.2.4 Aérosols

Les aérosols sont de fines particules liquides ou solides qui se trouvent dans l’atmosphère : suie, composés organiques, inorganiques (sulfates, ammoniums), cristaux de sel, poussières terrigènes^b, cendres volcaniques, etc⁵. Leur origine est aussi bien naturelle (éruptions volcaniques, tempêtes de sable) qu’anthropiques (particules émises lors de la combustion incomplète d’hydrocarbures principalement dans le secteur des transports, de l’industrie et de la production d’électricité), et ils ont généralement une durée de vie courte. Leur impact climatique est multiple. D’une part, ils interagissent avec le rayonnement solaire qu’ils peuvent disperser ou absorber : la dispersion a un effet refroidissant puisqu’elle participe à augmenter l’albédo terrestre, alors que l’absorption a un effet réchauffant similaire à l’effet de serre. Parmi les aérosols d’origine anthropique, il y a par exemple les sulfates et les nitrates qui ont un effet purement dispersif, ou encore le carbone noir (suie) qui absorbe le rayonnement solaire. Comme on le verra ci-dessous, les aérosols ont globalement un effet refroidissant sur le climat. Néanmoins ils ont aussi des effets délétères, notamment sanitaires⁶⁻⁸. D’autre part,

a. Ces faibles concentrations sont généralement exprimées en parties par million, ou ppm : 1 ppm = 0,0001 %. Exprimée dans cette unité, la concentration de CO₂ atmosphérique est estimée à 277 ppm en 1750 et à 410 ppm en 2019^{1PC21}.

b. Un composé terrigène provient de l’érosion des terres émergées. Les poussières terrigènes proviennent majoritairement des zones désertiques, c’est pour cette raison qu’on parle souvent de poussières désertiques.

les aérosols interagissent de manière complexe avec les nuages⁹ : ils peuvent modifier leur composition chimique et physique et ainsi influencer leurs propriétés radiatives ou encore les précipitations. La compréhension des interactions entre aérosols et nuages (notamment via la taille des gouttelettes d'eau nuageuse) représente actuellement un sujet important de recherche et ce sujet n'est pas abordé dans ce rapport.

1.2.5 Les effets de rétroaction

Prédire le climat est une tâche extrêmement difficile à cause des **effets de rétroaction** où une cause entraîne une conséquence qui agit elle-même sur la cause, soit pour l'amplifier (on parle alors de rétroaction positive) soit pour la diminuer (on parle alors de rétroaction négative). Prenons l'exemple de la rétroaction glace-albédo : une augmentation de la température (par exemple, via l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre) entraîne une fonte des glaces et donc une diminution de la couverture de glace qui est alors remplacée par de la végétation ou de l'eau. Or, l'albédo de la glace (*i.e.*, son pouvoir réfléchissant) est supérieur à celui de la végétation et de l'eau : cette baisse de la couverture de glace induit donc une baisse de l'albédo ce qui, comme expliqué plus haut, diminue l'énergie réémise par la Terre. Partant d'un réchauffement, on aboutit donc à un phénomène qui l'accroît en augmentant le déséquilibre radiatif. La rétroaction glace-albédo est donc un exemple de rétroaction positive. De nombreux autres effets de rétroaction participent à déterminer le climat de la Terre¹⁰, en particulier à cause des interactions entre l'océan et l'atmosphère, et rendent les conséquences d'un déséquilibre radiatif extrêmement difficiles à prédire. C'est justement pour cela que l'on parle tant du seuil des $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ que l'on abordera ci-dessous : c'est le seuil à partir duquel certaines rétroactions positives prennent des ampleurs importantes et donc augmentent fortement l'incertitude sur le niveau de perturbation du climat. Au-delà de $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ environ, les boucles de rétroaction induisent de très fortes incertitudes sur la perturbation du climat.

1.2.6 Forçage radiatif

Les éléments présentés ci-dessus permettent de comprendre les grands mécanismes à l'œuvre dans le bilan radiatif terrestre : le bilan instantané est gouverné par l'albédo et l'effet de serre, et la dynamique qui explique la manière dont le système climatique terrestre récupère d'un déséquilibre radiatif est complexe car soumise à des boucles de rétroaction faisant intervenir des phénomènes opérant sur différentes échelles de temps.

Comme mentionné précédemment, le déséquilibre radiatif de la Terre vaut actuellement $0,7\text{ W m}^{-2}$. Une notion complémentaire au déséquilibre radiatif est la notion de **forçage radiatif** : le forçage radiatif est le déséquilibre radiatif qui existerait si, toutes choses égales par ailleurs, la surface terrestre (terre+mer) et la troposphère ne s'étaient pas ajustées aux changements de forçages (gaz à effet de serre, albédo, aérosols, etc). En pratique, c'est surtout le forçage radiatif effectif, noté ERF pour l'anglais *Effective Radiative Forcing*, qui est calculé. Alors que le déséquilibre radiatif prend en compte, à un instant donné, tous les ajustements du système climatique suite à des changements de forçage et que le forçage radiatif n'en prend aucun en compte, le forçage radiatif effectif est

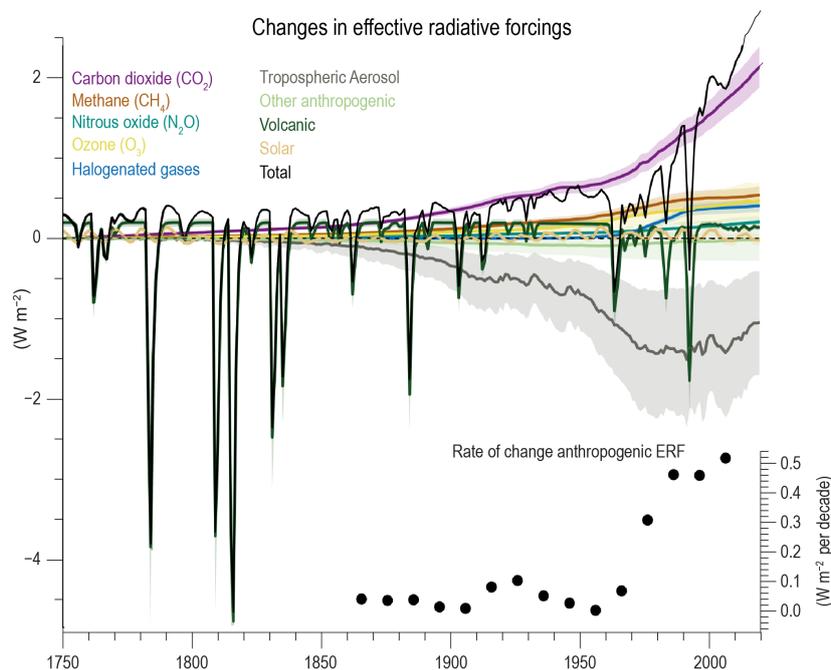


FIGURE 1.5 – Évolution du forçage radiatif entre 1750 et 2019 en fonction des différents mécanismes du système climatique. Les zones ombragées correspondent aux incertitudes (intervalles de confiance à 90 %), et illustrent que les aérosols représentent la plus grande source d'incertitude. D'après la figure 2.10 du chapitre 2 du sixième rapport d'évaluation du groupe de travail I du GIEC^{GTA+21}.

calculé après avoir permis aux températures atmosphériques, à la vapeur d'eau et aux nuages de s'ajuster, mais en maintenant la température de surface ou une partie des conditions de surface inchangées^a. Dans la suite de ce rapport et sauf mention explicite du contraire, les valeurs rapportées de forçage radiatif sont des valeurs de forçage radiatif effectif.

La figure 1.5 illustre l'évolution du forçage radiatif (ERF) depuis 1750, année de référence considérée comme le début de l'ère industrielle et à partir de laquelle le système climatique terrestre a commencé à sortir de son état d'équilibre radiatif. Elle considère tous les termes qui participent au forçage radiatif, à la fois les termes anthropiques (notamment les gaz à effet de serre et les aérosols) ainsi que naturels (activité solaire et volcanique). Certains effets accroissent le forçage radiatif, comme les gaz à effet de serre ou l'ozone troposphérique, alors que d'autres le diminuent, comme les aérosols, les émissions liées aux changements d'usage des sols ou l'ozone stratosphérique.

La figure 1.6 illustre la situation en 2019 : cette figure est donc le pendant de la figure 1.2 mais en terme de forçage radiatif, et non de température. On voit ainsi qu'en 2019, le forçage radiatif valait $2,72 \text{ W m}^{-2}$ au global et que les émissions de CO_2 en sont la cause principale. D'une manière informelle, on peut

a. Historiquement, l'ERF a été proposé pour améliorer le RF (pour l'anglais *Radiative Forcing*) qui était calculé en prenant en compte moins d'ajustements atmosphériques, cf. boîte 8.1 du chapitre 8 du cinquième rapport d'évaluation du GIEC^{MSB+13}.

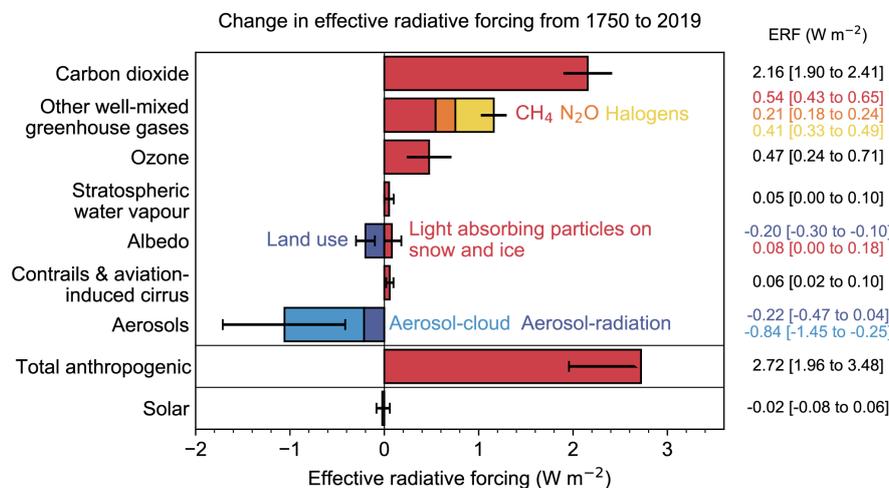


FIGURE 1.6 – Forçage radiatif entre 1750 et 2019. L’effet anthropique net sur le forçage radiatif vaut $2,72 \text{ W m}^{-2}$. Ce forçage radiatif positif est notamment dû aux gaz à effet de serre comme le CO_2 , contrebalancé en partie par le forçage radiatif négatif généré notamment par les aérosols. D’après la figure 7.6 du chapitre 7 du sixième rapport d’évaluation du groupe de travail I du GIEC^{FSA+21}.

interpréter ce chiffre de la manière suivante : si toutes les activités humaines qui ont eu lieu entre 1750 et 2019 avaient instantanément eu lieu en 1750, alors le système climatique terrestre serait passé d’un état d’équilibre à un état de déséquilibre radiatif, le déséquilibre valant $2,72 \text{ W m}^{-2}$.

Or on a vu précédemment que le déséquilibre radiatif terrestre vaut $0,7 \text{ W m}^{-2}$: cela signifie que depuis 1750, le système climatique a déjà réagi aux $2,72 \text{ W m}^{-2}$ de forçage radiatif. La Terre est en déséquilibre radiatif depuis au moins 1970 et a accumulé entre 1971 et 2018 de l’ordre de $434\,900 \text{ EJ}$ d’énergie. Une petite partie (1 %) de ce surplus énergétique s’est stockée dans l’atmosphère et a induit une partie de la hausse de la température de la surface du globe. L’immense majorité de ce surplus énergétique (91 %) s’est accumulé dans les océans, illustrant bien leur importance dans le système climatique terrestre^{GTA+21}. La lenteur de la diffusion de la chaleur des couches océaniques superficielles vers les couches profondes explique en grande partie l’inertie du système climatique terrestre.

1.3 Limiter le réchauffement climatique

1.3.1 Conséquences du réchauffement climatique

L’énergie reçue, l’albédo et la concentration de gaz à effet de serre déterminent donc la température d’équilibre de la Terre via des interactions complexes. Si, toutes choses égales par ailleurs, la concentration de gaz à effet de serre augmente comme c’est le cas actuellement, alors la température de la Terre doit elle aussi mécaniquement augmenter pour rétablir l’équilibre radiatif. Cet équilibre peut prendre des siècles à s’établir notamment à cause de la forte inertie thermique des océans. Les données climatiques enregistrées depuis la moitié

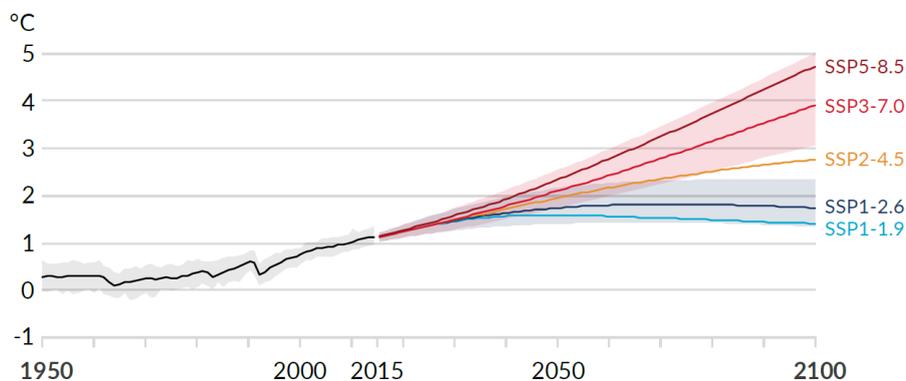


FIGURE 1.7 – Changement de température moyenne de la planète par rapport à la période 1850–1900. De 1950 à 2015, la figure représente la température observée (courbe noire) avec sa plage d’incertitudes (zone grise). De 2015 à 2100, cette courbe est prolongée pour une sélection de cinq scénarios du GIEC dits SSP (Shared Socioeconomic Pathways). Pour les scénarios SSP1-2.6 et SSP3-7.0, les fourchettes *Very likely* sont indiquées. D’après la figure SPM.8 *Human activities affect all the major climate system components, with some responding over decades and others over centuries* en page 29 du résumé aux décideurs du sixième rapport d’évaluation du groupe de travail I du GIEC^{IPCC21}.

du XX^e siècle permettent de connaître précisément la quantité de gaz à effet de serre émis dans l’atmosphère (cf. figure 1.4) ou encore l’évolution passée des températures (cf. figure 1.7). Si les trajectoires actuelles se poursuivent (scénario souvent qualifié de tendanciel ou *business-as-usual*), notamment si le taux de croissance des émissions reste constant, les modèles climatiques prévoient une augmentation de la températures moyenne globale d’ici 2100 pouvant atteindre de +3,3 °C à +5,7 °C (valeur médiane de +4,4 °C). Ce scénario ainsi que quatre autres, issus du sixième rapport d’évaluation du GIEC^{IPCC21}, sont représentés sur la figure 1.7.

L’espèce humaine n’a jamais connu de climat aussi chaud : il faut en effet remonter plusieurs millions d’années en arrière pour retrouver ces conditions climatiques alors que l’*Homo sapiens* n’est apparu qu’il y a environ 300 000 ans. La concentration actuelle de CO₂ atmosphérique (410 ppm en 2019^{IPCC21}) est elle déjà inédite depuis 3 millions d’années.

Cette hausse des températures pourrait avoir différentes conséquences majeures selon son intensité. La figure 1.8 synthétise les risques sur les principaux motifs de préoccupation tels que la menace sur les écosystèmes ou les événements météorologiques extrêmes. Plus la hausse de température est importante, plus les risques sont élevés. Des conséquences majeures apparaissent dès +1,5 °C. Les conséquences du réchauffement climatique sont variées et nombreuses. On peut par exemple citer la fonte des glaces, l’acidification des océans, la disparition des coraux d’eaux chaudes, la montée du niveau des mers, la baisse des rendements agricoles, le stress hydrique, les vagues de chaleur, les changements d’écosystèmes ou encore les impacts sur la biodiversité. Par exemple, à +4 °C des vagues de chaleur récurrentes associées à des taux d’humidité très élevés pourraient rendre de larges parties de la Terre inhabitables pour l’être humain¹¹.

Enfin, il est intéressant de noter certaines spécificités. La non-linéarité du

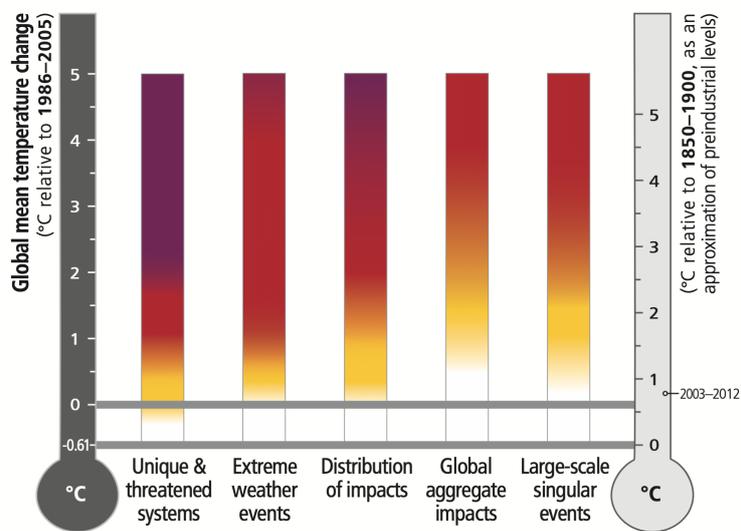


FIGURE 1.8 – Présentation des principaux risques associés au réchauffement climatique pour les cinq principaux motifs de préoccupation : la menace sur les systèmes écologiques et humains, les phénomènes météorologiques extrêmes, la répartition disproportionnée des impacts, les impacts mondiaux cumulés et les phénomènes particuliers de grande échelle. Plus la température augmente, plus les risques sur ces motifs de préoccupation augmentent. L'échelle de risque est indiquée sous le graphique. D'après la figure 1 de l'Assessment Box SPM.1 du résumé aux décideurs du cinquième rapport d'évaluation du WGII^{IPCC14b}.

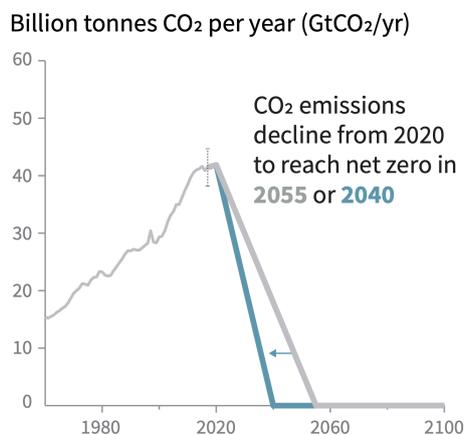


FIGURE 1.9 – Trajectoire schématique des émissions nettes de CO₂ permettant de limiter le réchauffement à +1,5 °C, avec une probabilité de réussite plus élevée pour la courbe bleue que pour la courbe grise. À ce jour, les émissions mondiales de CO₂ n’ont pas encore commencé à décroître. D’après la figure SPM.1 du résumé aux décideurs du rapport spécial 1,5 °C du GIEC^{IPCC18}.

Le système climatique terrestre implique par exemple que les conséquences peuvent être beaucoup plus accentuées à +2 °C qu’à +1,5 °C^{IPCC18}, et plus encore pour des températures supérieures à +2 °C. De plus, le seuil de +2 °C est en général pris comme le seuil à partir duquel des phénomènes d’emballement peuvent se mettre en place, et ainsi risquer de faire sortir le système climatique terrestre de son état d’équilibre historique¹² (cf. section 1.2.5).

1.3.2 L’accord de Paris

Ce constat scientifique alarmant est au cœur de l’accord de Paris, signé en 2015 par 196 pays lors de la COP21 pour faire face au défi climatique. Les signataires de cet accord se sont ainsi engagés dans l’article 2 à ^a

« [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 par rapport aux niveaux préindustriels. »

L’objectif de l’accord de Paris est donc d’essayer de limiter le réchauffement climatique à +1,5 °C. L’accord de Paris précise aussi que les efforts de tous les pays seront évalués tous les cinq ans, et qu’ils doivent atteindre la neutralité carbone dans la deuxième moitié du XXI^e siècle. Pour cela, les émissions de CO₂ doivent dès à présent décroître massivement comme illustré sur la figure 1.9, pour atteindre la neutralité carbone, *i.e.* une situation d’équilibre entre les émissions et les puits de CO₂ anthropiques. L’article 4 de l’accord de Paris vise d’ailleurs explicitement à « parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle ». Pour atteindre un tel objectif, il faut que la décroissance des émissions de CO₂ se poursuive à un rythme comparable

a. [Accord de Paris](#), UNFCCC, 2015.

à la baisse des émissions en 2020 suite à la crise du Covid-19^a, cf. section 8.1 pour plus de détails.

Malgré l’engouement qu’a suscité cet accord historique, plusieurs études ont montré que les actions menées sont encore insuffisantes : d’une part, les engagements pris correspondent à une trajectoire de +3 à +4 °C^{13,14,UNE20} et d’autre part, ces engagements ne sont pas tous respectés par les états^b. Ainsi, alors que les émissions devraient décroître dès à présent massivement pour respecter l’accord de Paris comme illustré schématiquement sur la figure 1.9, les émissions de CO₂ n’avaient toujours pas commencé à décroître avant la crise sanitaire, passant de 41,4 GtCO₂ en 2015 à 43,0 GtCO₂ en 2019⁴.

Limiter le réchauffement climatique à +1,5 °C reste physiquement possible : si l’on arrêta aujourd’hui les émissions de tous les gaz à effet de serre et d’aérosols, les températures, après avoir continué à augmenter pendant quelques années (notamment à cause de l’inertie climatique mais aussi en raison de la disparition des aérosols et donc l’arrêt de leur effet refroidissant), finiraient par se stabiliser rapidement puis par diminuer^{ADS+18}. Si ce scénario est physiquement possible, l’arrêt instantané et complet des émissions de gaz à effet de serre est bien sûr irréaliste : il y a une inertie pour mettre en place des mesures d’atténuation. En revanche, dans tous les scénarios plus réalistes étudiés par le GIEC, les températures des 10 à 20 prochaines années sont déjà largement déterminées quelle que soit la trajectoire envisagée^{KPA+13}, comme on peut le voir sur la figure 1.7. En d’autres termes, les actions que l’on prend aujourd’hui ne commenceront à avoir une influence significative que dans au moins deux décennies^c.

1.3.3 Budget carbone

Le budget carbone est un concept intéressant dans le cadre de l’atténuation du réchauffement climatique. Il s’agit de la quantité cumulée maximale de CO₂ que l’on peut émettre dans l’atmosphère avant d’atteindre la neutralité carbone^d tout en limitant le réchauffement climatique sous une température donnée. Les émissions sont calculées de façon nette, donc déduction faite des puits de carbone anthropiques (cf. chapitre 8), et par rapport à l’ère pré-industrielle. Concentration de CO₂ et température sont, dans une large mesure, reliées par une relation quasi-linéaire : il est ainsi estimé qu’un doublement de la concentration du CO₂ atmosphérique correspond à une élévation des températures située entre +2,3 et +4,7 °C¹⁵ (intervalle de confiance à 90 %). Le GIEC estime que, à partir de 2020, il ne faut pas émettre plus de 500 GtCO₂ pour limiter le réchauffement à +1,5 °C^{IPC21}. Cette valeur est la valeur médiane sur un ensemble de simulations climatiques, et est à ce titre souvent interprétée et présentée comme le budget qui présente une chance sur deux de limiter le réchauffement à +1,5 °C. En d’autres termes, pour avoir une chance sur deux de limiter le réchauffement à +1,5 °C, l’humanité ne doit pas émettre plus de 500 GtCO₂ avant d’arriver à la

a. Ce qui ne veut pas dire que la manière de faire baisser les émissions doit être similaire.

b. À ce propos, voir la condamnation de l’état français le 14 janvier 2021 à un euro symbolique, dans le cadre de l’« Affaire du siècle », pour ne pas avoir respecté ses engagements.

c. Voir aussi par exemple les éléments de focus thématique TFE.8 du résumé technique du cinquième rapport d’évaluation du GIEC^{SQP+13}.

d. La neutralité carbone signifie que la quantité de CO₂ émis par les activités humaines est égale à la quantité de CO₂ captée par les puits de carbone anthropiques.

neutralité carbone. À titre indicatif, ce budget correspond à 12 ans d'émissions au rythme actuel (à savoir 43,0 GtCO₂ en 2019³).

La notion de budget carbone est fondamentale car elle traduit que ce qui compte, ce sont les émissions cumulées : il ne s'agit pas juste d'arriver à la neutralité carbone, il s'agit que la trajectoire qui y mène respecte un certain budget total. Le budget carbone pour rester sous les +1,5 °C est très faible et fait dire à de nombreux scientifiques qu'il s'agit d'un objectif qu'il sera très difficile d'atteindre : par exemple, ce budget serait entièrement consommé par la simple utilisation des infrastructures existantes (centrales électriques, voitures, etc.) si celles-ci sont utilisées normalement jusqu'à leur fin de vie prévue¹⁶. Le budget carbone pour les +2 °C s'élève à 1350 GtCO₂^{IPCC21}, ce qui offre plus de marge de manœuvre comme nous l'illustrerons dans le chapitre 9.

1.4 Climat et énergie

1.4.1 Transition énergétique

Comme on le voit sur la figure 1.4, les émissions de CO₂ représentent 65 % des émissions anthropiques de gaz à effet de serre en 2019. Ces émissions sont dues à différents processus industriels (notamment métallurgie et cimenterie) mais aussi et surtout à la combustion d'énergies fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel), qui ont représenté près de 90 % des émissions de CO₂^{MGS+18}. Respecter le budget carbone pour limiter le réchauffement à +1,5 °C ou +2 °C est donc largement une question de diminution des émissions liées à l'énergie. Il existe trois leviers sur lesquels on peut jouer dans ce but :

- **l'efficacité**, où un même usage est réalisé en utilisant moins d'énergie ;
- **la décarbonation**, où une source d'énergie est remplacée par une autre source moins émettrice en CO₂ ;
- **la sobriété**, où les usages sont réduits.

Se passer des énergies fossiles est un défi gigantesque qu'une rapide perspective historique permet d'appréhender. On voit en effet sur la figure 1.10 qu'historiquement, les sources d'énergie n'ont fait que s'ajouter les unes aux autres et que chaque source d'énergie n'a fait qu'être plus exploitée. On voit en particulier une accélération nette à partir du milieu du XX^e siècle, phénomène que la communauté scientifique désigne par la « grande accélération »¹⁷.

En 2019, la production énergétique mondiale s'élève ainsi selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE) à 598 EJ, dont 81,3 % d'origine fossile^{IEA20c}. Ces 598 EJ d'énergie primaire sont rarement exploitables en l'état : il faut généralement extraire cette énergie ou la produire, éventuellement la transformer (par exemple, la raffiner dans le cas du pétrole ou liquéfier de l'hydrogène produit sous forme gazeuse) et la transporter pour pouvoir l'utiliser dans notre quotidien en tant qu'énergie finale. Ces étapes nécessitent de l'énergie et induisent des pertes, par exemple pendant le transport (fuite de gaz dans les pipelines ou effet Joule dans les câbles électriques) ou à cause des rendements des transformations. Ces pertes font que le gisement d'énergie finale disponible est d'environ 416 EJ par an, soit 69 % de l'énergie primaire.

On voit sur la figure 1.10 que remplacer l'intégralité des énergies fossiles par des énergies bas-carbone (nucléaire, renouvelables ou biomasse) représente un défi monumental puisqu'il s'agit à la fois d'inverser de manière drastique les

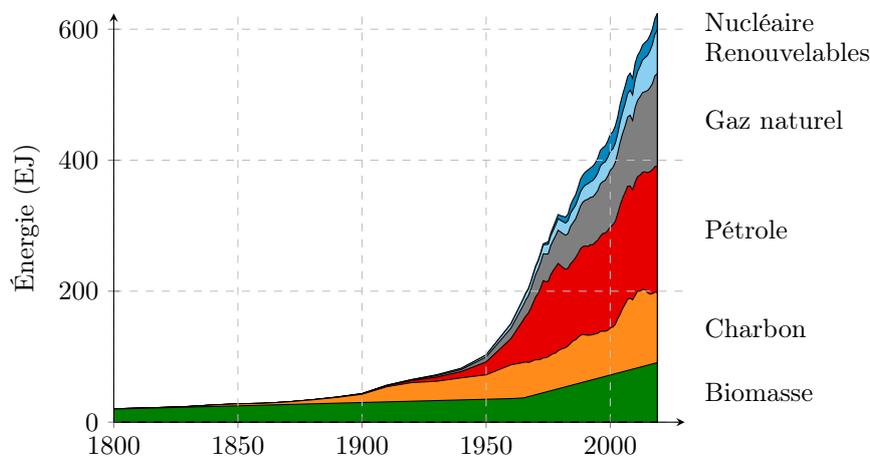


FIGURE 1.10 – Évolution du mix énergétique mondial entre 1800 et 2019. Données issues de [Our World in Data](#).

tendances pour les énergies fossiles, et dans le même temps d’amplifier considérablement la tendance des énergies renouvelables et nucléaire qui ne représentent en 2019 qu’environ 15 % de l’énergie primaire mondiale.

Dans le gisement mondial d’énergie finale, une partie (6,9 EJ, soit 19,3 %), se présente sous forme d’électricité qui est souvent vue comme une énergie bas-carbone. Si cela est vrai en France où l’électricité est produite à 70,6 % par de l’énergie nucléaire et à seulement 7,9 % par des énergies fossiles, la situation n’est pas la même au niveau mondial, où 10,2 % de l’électricité est produite à partir de nucléaire et 64,2 % à partir d’énergies fossiles^{IEA20c}. Cela se traduit par l’intensité carbone de l’électricité, qui vaut 9,9 gCO₂-eq/MJ au niveau français et 132 gCO₂-eq/MJ au niveau mondial^a. Ainsi, l’électrification ne participe à la réduction des gaz à effet de serre que dans la mesure où la production de l’électricité devient bas-carbone, donc à partir de biomasse, d’énergies renouvelables ou de nucléaire.

1.4.2 Limites énergétiques...

Cet exemple de l’électricité illustre un point important : dans un monde bas-carbone durable, l’énergie finale ne pourra plus être produite majoritairement à partir de l’extraction de réserves naturelles comme elle l’est aujourd’hui avec les énergies fossiles, mais elle nécessitera d’être produite essentiellement à partir de sources renouvelables (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse, ...) et de nucléaire. Cette remarque s’applique en particulier aux vecteurs énergétiques sur lesquels nous reviendrons dans le chapitre 6 : hydrogène et carburants de synthèse sont des vecteurs énergétiques qui nécessitent d’être produits.

Pour être plus précis : puisqu’on ne peut pas créer d’énergie d’après le premier principe de thermodynamique, il s’agit en fait de convertir des énergies dis-

a. Pour l’intensité carbone de l’électricité au niveau mondial nous avons utilisé la valeur indiquée par l’AIE. Pour l’intensité carbone de l’électricité française, nous sommes partis des valeurs indiquées par le Réseau de transport d’électricité ([production totale](#) et [émissions de CO₂](#)) qui indiquent une production de 1,9 EJ pour 19,2 MtCO₂-eq d’émissions.

ponibles de manière illimitée sur les échelles de temps considérées (les énergies renouvelables, à savoir le vent et l'énergie solaire et, dans une moindre mesure, l'énergie marémotrice et géothermique, auxquelles on peut ajouter la biomasse dès lors qu'elle est gérée de manière durable, notamment sans surexploitation forestière) en d'autres vecteurs énergétiques mieux à même de répondre à certains besoins (vecteurs énergétiques mobilisables quand on le souhaite, qui fournissent une puissance stable, ...)

En principe, ce gisement énergétique est colossal : en une heure, il arrive autant d'énergie sur Terre par rayonnement solaire que l'énergie utilisée par l'humanité en une année. Néanmoins, seule une petite fraction de cette énergie est récupérable : par exemple, le rendement de la photosynthèse est de l'ordre de 1 % et celui des panneaux solaires photovoltaïques de l'ordre de 20 %. Des limites existent aussi sur la surface que l'on peut consacrer à ces activités de « production » énergétique. Ainsi, seulement 29 % de la surface terrestre correspond à des terres émergées. Savoir s'il est possible de disposer d'autant d'énergie qu'aujourd'hui dans un monde durable reste une question ouverte¹⁸.

1.4.3 ... et planétaires

Plus largement, un monde durable doit opérer en respectant l'ensemble des limites planétaires, dont la disponibilité énergétique évoquée ci-dessus n'est qu'un exemple. D'autres limites planétaires incluent par exemple la biodiversité ou encore les ressources minières, toutes deux concernées au premier plan par la transition énergétique. En effet, la destruction des habitats est aujourd'hui la première cause de la chute de biodiversité des animaux terrestres. Ainsi, préserver la biodiversité nécessite de maintenir (voire restaurer) des terres vierges de l'influence humaine, et contraint donc les surfaces disponibles pour la production énergétique. De même, l'infrastructure de production d'électricité renouvelable (fermes éoliennes ou de panneaux photovoltaïques) nécessite une quantité accrue de ressources minières, par exemple de cuivre, dont certaines pourraient venir à manquer notamment pour des raisons d'augmentation des coûts d'extraction due à la baisse des concentrations. Dans le cadre de ce rapport nous nous concentrons sur les aspects énergie/climat liés à l'aviation. Néanmoins, penser la transition du secteur aérien, et en fait de tous les secteurs d'activité qui sont confrontés aux mêmes limites, nécessite de prendre en compte ces différentes limites planétaires pour éviter de n'avoir que « déplacé le problème », par exemple résolu le problème climatique en causant l'extinction de la biodiversité ou en conduisant à la raréfaction des ressources minières. Ces questions importantes seront abordées en conclusion de ce rapport.

Chapitre 2

Aviation et climat

2.1 Effets CO₂ et non-CO₂

Les impacts de l'aviation sur le climat, représentés sur la figure 2.1, sont de deux natures : les effets CO₂ et non-CO₂. On commence par présenter dans cette section ces deux types d'effets, puis on présente les différentes manières de les évaluer dans la section suivante.

2.1.1 Effets CO₂

Les effets CO₂ correspondent aux émissions de CO₂ liées à l'aviation dont l'impact climatique direct est le renforcement de l'effet de serre. On distingue essentiellement deux types d'émissions : les émissions liées à la combustion du kérosène et les émissions sur l'ensemble de son cycle de vie, *i.e.* les émissions dues à sa production, à son raffinage et à son transport. On pourrait aussi considérer les émissions sur l'ensemble du cycle de l'avion, liées donc à leur construction, maintenance et fin de vie, ainsi qu'aux infrastructures aéroportuaires. Néanmoins, ces émissions s'avèrent être faibles, de l'ordre de 2 % de l'ensemble des émissions de l'aviation¹⁹. Dans ce rapport, ces émissions ne sont pas prises en compte pour l'aviation globale, mais le sont lors de la réduction du périmètre à l'aviation commerciale.

2.1.2 Effets non-CO₂

L'impact de l'aviation sur le climat ne se limite pas aux seules émissions de CO₂ car la combustion du kérosène émet d'autres produits, notamment de la vapeur d'eau et des aérosols (suie et sulfate) qui entraînent la formation de traînées de condensation. Selon les phases de vol, la combustion du kérosène peut émettre aussi du protoxyde d'azote (N₂O) et du méthane (CH₄) mais ces émissions représentent au global moins de 1 % des émissions de CO₂-eq^a et sont donc habituellement négligées. Outre les effets de ces gaz, on distingue au moins cinq effets non-CO₂⁹ : la formation de cirrus induits par les traînées de condensation (*contrail cirrus*), l'effet des NO_x et de la vapeur d'eau sur les

a. Voir par exemple la [note FCCC/SBST A/2005/INF.2](#) du SBSTA ou la [base carbone](#) de l'ADEME.

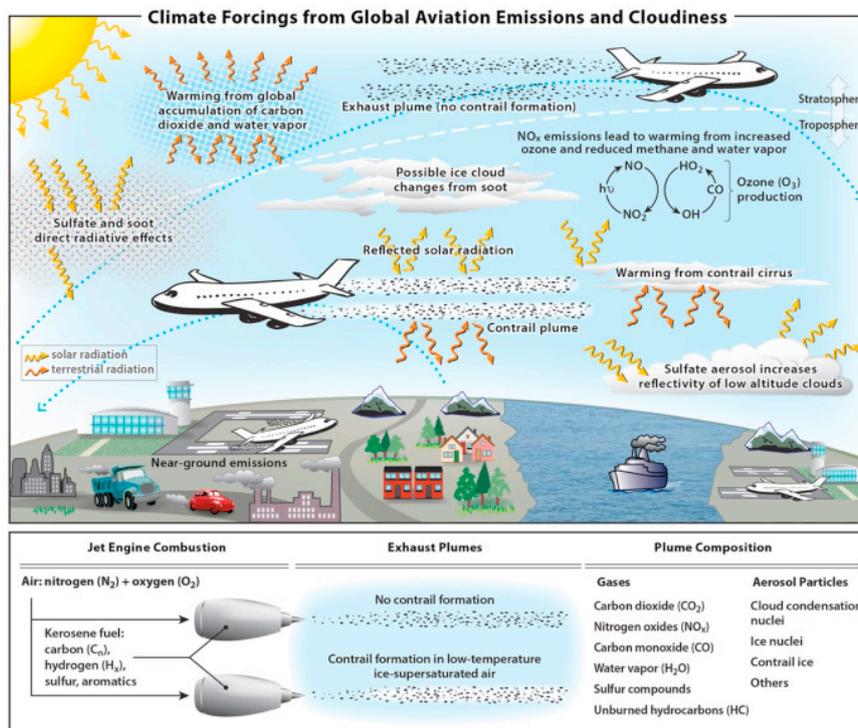


FIGURE 2.1 – Aperçu schématique des processus par lesquels les émissions de l’aviation et l’augmentation de la nébulosité des cirrus affectent le système climatique. Les contributions positives nettes au forçage radiatif (réchauffement) proviennent des émissions de CO₂, de vapeur d’eau, de NO_x et de suie, ainsi que des traînées linéaires et des cirrus induits par les traînées de condensation. Les contributions négatives au forçage radiatif (refroidissement) proviennent de la production d’aérosols sulfatés. Le réchauffement net dû aux émissions de NO_x est une somme de termes de réchauffement (augmentation de l’ozone à court terme) et de refroidissement (diminution du méthane et de la vapeur d’eau stratosphérique, et diminution de l’ozone à long terme). Le réchauffement net dû aux cirrus de traînée et aux NO_x est une somme sur le cycle jour/nuit. Ces contributions impliquent un grand nombre de processus chimiques, microphysiques, de transport (diffusion, convection) et radiatifs dans l’atmosphère globale. Les valeurs quantitatives du forçage radiatif associé à ces processus sont indiquées sur la figure 2.5 pour 2018. D’après la figure 1 (et sa légende) de Lee *et al.*⁹.

concentrations des gaz à effet de serre, les interactions aérosol-radiation et les interactions aérosol-nuage. Nous détaillons les effets non-CO₂ induits par les traînées de condensation, et plus succinctement les autres (cf. Lee *et al.*⁹ pour plus de détails).

Traînées de condensation

Un nuage est constitué de gouttelettes d’eau ou parfois de cristaux de glace en suspension dans l’atmosphère. Dans un air pur ne contenant aucun aérosol ni ions, ces gouttelettes se forment lorsque la vapeur d’eau est largement sursaturée en eau liquide, son humidité relative devant être bien supérieure à 100 % (de l’ordre de 500 %) ^{20,21}. Cela dépend notamment des conditions de température

et de pression de vapeur saturante et donc indirectement de l'altitude. Dans ces conditions, la vapeur d'eau contenue dans l'air se condense pour former les gouttelettes. Cette condensation peut néanmoins se produire pour les faibles niveaux de sursaturation rencontrés dans l'atmosphère (de l'ordre de 1 %) car elle est grandement facilitée par la présence d'aérosols servant de noyaux de condensation. Les nuages peuvent avoir un effet albédo refroidissant, mais ils participent à l'effet de serre et ont donc aussi un effet réchauffant. L'impact net dépend de nombreux paramètres du nuage comme ses caractéristiques microphysiques, sa profondeur optique, son altitude, sa durée de vie ou encore le moment de la journée auquel il est présent.

Les traînées de condensation sont des nuages fins et linéaires de particules de glace visibles derrière des aéronefs en vol. Elles se forment pour des raisons thermodynamiques similaires à la nuée de respiration qui se forme par temps froid lorsque l'on expulse de la vapeur d'eau en respirant : l'air ambiant froid et humide se mélange avec l'air chaud rejeté par la respiration (ou, pour un avion, par les moteurs), créant ainsi potentiellement des conditions de sursaturation en eau liquide où des gouttelettes sont formées par condensation. Dans le cas des effluents moteurs, cette condensation est fortement favorisée par le fait que la combustion rejette des aérosols qui servent de noyaux de condensation, notamment les particules de suie dont la capacité à servir de noyau de condensation est renforcée par les émissions concomitantes de soufre^{22,23}, ainsi que de charges électriques liées à la formation d'ions du fait des hautes températures atteintes dans la chambre de combustion^a. Les conditions atmosphériques ambiantes (température et humidité relative) gouvernent ce que vont devenir ces gouttelettes : si la vapeur d'eau est sursaturée en eau liquide, l'avion vole probablement dans un nuage d'eau liquide auquel elles s'ajouteront ; si elle est sous-saturée en glace, une traînée de condensation sera créée mais ne persistera pas plus de quelques minutes. Pour qu'une traînée se crée et persiste, il faut que la vapeur d'eau soit sous-saturée en eau liquide et sursaturée en glace : dans ce cas, les gouttelettes gèlent pour former des cristaux de glace. Les valeurs de température et d'humidité relative correspondant à cette situation sont décrites par le critère de Schmidt–Appleman²⁴. Dans un air sec et avec une faible sursaturation de glace, une traînée de condensation ne survit donc pas plus de quelques minutes. Mais dans une région avec une sursaturation en glace suffisante (*ice supersaturated region* en anglais), les particules de glace de la traînée grossissent par déposition des molécules de vapeur d'eau de l'air ambiant et la traînée peut subsister, voire se développer en des cirrus de traînées indistinguables des cirrus naturels (les *contrail cirrus* des figures 2.1 et 2.5) si la sursaturation en glace est suffisamment élevée. Les avions passent 10 à 15 % de leur temps en régime de croisière dans de telles régions^{21–23}.

Par ailleurs, les tourbillons de sillage qui se développent en aval de l'aéronef jouent un rôle important dans la phase initiale du développement des traînées de condensation à l'altitude de vol car ils captent et emprisonnent dans leur cœur une large partie des effluents moteurs (principalement de la vapeur d'eau)^{23,25}. La durée de vie de ces tourbillons, de l'ordre de quelques minutes sur une distance qui peut atteindre jusqu'à 30 km en aval des plus gros avions, dépend principalement de la répartition de charge aérodynamique sur la voilure

a. Dans le cas des nuages naturels, cette condensation est déclenchée non pas par des forçages externes comme pour la respiration ou les avions, mais par des mouvements d'air ascendants induits par les forces de flottabilité.

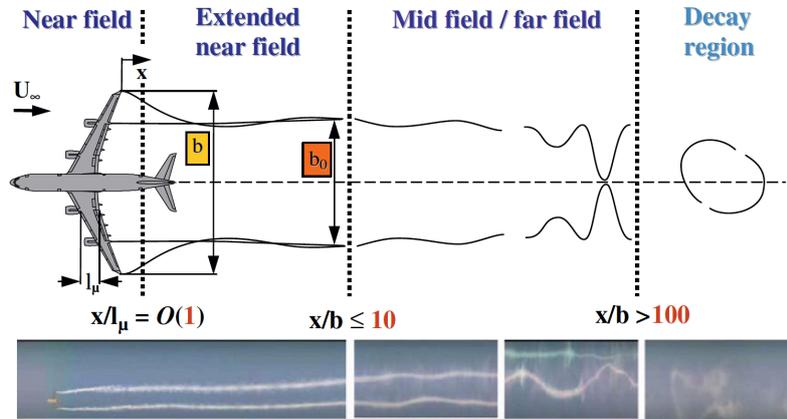


FIGURE 2.2 – Schématisation des différentes étapes de l'évolution des tourbillons de sillage d'un avion, d'après Breitsamter²⁶. La corde aérodynamique moyenne est notée l_μ et l'envergure de l'avion b .

et sur l'empennage horizontal, et augmente avec la taille et la masse de l'avion²⁶. L'évolution de ces tourbillons de sillage est représentée à la figure 2.2 en fonction de la distance en aval x normalisée par l'envergure b de l'appareil. Dans le champ proche ($x/b < 1$), le sillage prend la forme d'une distribution multipolaire de tourbillons générés à chaque discontinuité de surface. Elle dépend de la configuration avion, en particulier de la position et du nombre des moteurs sur l'architecture (bimoteurs, quadrimoteurs, moteurs le long du fuselage, propulsion distribuée...) ainsi que du braquage des parties mobiles (volets, ailerons et empennage)²⁶. Ces tourbillons interagissent entre eux (fusions et dislocations) et avec les jets moteurs dans le champ proche étendu ($1 \leq x/b \leq 10$) pour conduire à la concentration de la vorticité en une paire de tourbillons contrarotatifs. C'est au cours de cette étape que les effluents moteur sont piégés dans le cœur des tourbillons^a. Ensuite les tourbillons persistent sur des distances de l'ordre d'une centaine d'envergures dans une zone appelée le champ lointain ou phase vortex. Ils présentent un mouvement vertical descendant auto-induit²⁶ qui les conduit à une altitude où la vapeur d'eau peut être sous-saturée, induisant ainsi une diminution de la concentration de cristaux de glace par sublimation²³. Au cours de leur descente dans l'atmosphère stratifiée, une traînée secondaire se développe dans le sillage de la paire par phénomène de diffusion visqueuse^{27,28}. Cette phase de leur évolution inclut le développement progressif des instabilités naturelles des tourbillons de sillage qui mènent in fine à leur atténuation et à leur dispersion via un phénomène de reconnexion conduisant le plus souvent à l'apparition d'anneaux tourbillonnaires²⁶. Ainsi, au-delà des processus thermodynamiques et micro-physiques pilotés par la composition des effluents moteurs et les conditions météo ambiantes, la formation et la persistance des traînées de condensation dépendent aussi de l'évolution et de la dynamique des tourbillons de sillage au cours la phase vortex. Au-delà, le sillage rentre dans la région de dissipation où les conditions atmosphériques pilotent l'évolution des traînées

a. Sous certaines conditions atmosphériques, la condensation de la vapeur d'eau constitue alors un marqueur qui permet de visualiser les tourbillons de sillage autrement invisibles.

de condensation et leur transformation éventuelle en cirrus induits (conditions thermodynamiques et météo, turbulence, diffusion et dissipation).

Autres effets non-CO₂

Nous présentons ici succinctement les autres effets non-CO₂, notamment les effets dus aux NO_x, à la vapeur d'eau, aux interactions aérosol-radiation et aux interactions aérosol-nuage. Les effets dus aux NO_x renforcent le forçage radiatif, alors que ceux liés à la vapeur d'eau et aux interactions aérosol-radiation sont très faibles. À l'heure actuelle, de fortes incertitudes pèsent sur l'impact des interactions aérosol-nuage et font que celles-ci ne sont pas prises en compte dans l'impact climatique du secteur aérien. La description ci-dessous des autres effets non-CO₂ correspond à des passages extraits de manière presque littérale de l'article de Lee *et al.*⁹.

NO_x. La haute température de la combustion produit des oxydes azotés NO et NO₂ de dénomination générique NO_x qui induisent des réactions chimiques avec un impact à la fois positif et négatif sur le climat. À court terme, les NO_x réagissent avec l'oxygène de l'air pour créer de l'ozone (O₃), ce qui augmente le forçage radiatif puisque l'ozone est un gaz à effet de serre, cf. figure 1.5. De manière concurrente, les NO_x participent à la réduction des effets du méthane (CH₄) dont ils réduisent la durée de vie et l'abondance, ce qui participe à diminuer le forçage radiatif. À plus long terme, la réduction du méthane induit une diminution de l'ozone et de la vapeur d'eau stratosphérique, ce qui induit des forçages radiatifs négatifs. Lorsque toutes ces réactions sont prises en compte, il ressort que la contribution des NO_x à l'effet de serre constitue un terme de forçage positif, *i.e.* qui contribue positivement à l'effet de serre et à l'élévation de la température atmosphérique, comme on va le voir ci-après à la figure 2.5.

Vapeur d'eau. Les avions volent à une altitude moyenne de 10 000 m, ce qui les positionne dans la troposphère aux basses latitudes et dans la basse stratosphère aux hautes latitudes. En effet, la position de la tropopause diminue avec la latitude et passe d'environ 17 km au niveau de l'équateur à 7 km au niveau des pôles. Ainsi, une grande partie des émissions annuelles des avions de la flotte mondiale se produit dans la basse stratosphère, principalement dans l'hémisphère nord. L'accumulation de ces émissions de vapeur d'eau modifie le contenu en eau de la basse stratosphère et donc le bilan radiatif de la vapeur d'eau⁹.

Interactions aérosol-radiation. Les interactions aérosol-radiation sont dues aux particules fines émises lors de la combustion, notamment de la suie (définie comme un mélange de carbone noir et organique) et des précurseurs d'aérosols de sulfate (SO₄²⁻) et de nitrate (NO₃). L'aérosol de suie est formé par la condensation des composés aromatiques non brûlés dans la chambre de combustion et l'aérosol de sulfate par l'oxydation du soufre dans le carburant. Le soufre est principalement émis sous forme de SO₂, tandis qu'une petite fraction (~3 %) est émise sous forme de H₂SO₄ oxydé. La plupart des aérosols de sulfate sont produits après l'émission de composés précurseurs de soufre par oxydation dans l'atmosphère ambiante. Les deux types d'aérosols créent du forçage radiatif à partir des interactions aérosol-rayonnement : la suie absorbe le rayonnement à

ondes courtes, ce qui entraîne un réchauffement net, et l'aérosol de sulfate diffuse le rayonnement à ondes courtes entrant, ce qui entraîne un refroidissement net. À titre d'exemple, les émissions mondiales de l'aviation en l'an 2000 ont augmenté la masse des aérosols de suie et de sulfate de quelques pour cent et le nombre d'aérosols de 10 à 30 % près des couloirs de vol du trafic aérien dans les régions extra-tropicales du nord.

Interactions aérosol-nuage. Les interactions aérosol-nuage sont les processus par lesquels les aérosols influencent la formation des nuages. Par exemple, les gouttelettes de nuage et les cristaux de glace se nucléent sur les aérosols. Les particules de suie et de sulfate de l'aviation sont les principaux aérosols primaires et secondaires des avions. L'aérosol de sulfate de l'aviation affecte principalement les nuages liquides dans l'atmosphère de fond. L'aérosol de sulfate est très efficace en tant que noyau de condensation de nuages pour les nuages liquides et pour favoriser la congélation homogène des particules de solution à des températures froides, ce qui permet de nucléer les nuages de glace⁹.

2.2 Évaluation de l'impact climatique de l'aviation

2.2.1 Méthodologie et périmètre (aviation globale)

Plusieurs approches peuvent être utilisées pour évaluer l'impact climatique de l'aviation. La plus simple consiste à évaluer les effets CO₂ : c'est une méthode robuste, car les émissions de CO₂ sont connues avec un faible niveau d'incertitudes, mais incomplète car elle néglige les effets non-CO₂. C'est celle que nous commencerons par présenter dans la section 2.2.2. Une méthode plus complète, car permettant de prendre en compte les effets non-CO₂, consiste à évaluer l'impact sur le forçage radiatif (exprimé en forçage radiatif effectif, cf. chapitre 1), nous la présenterons dans la section 2.2.3.

Par ailleurs, on peut s'intéresser à l'impact récent, *i.e.* pour une année ou une période donnée récente, ou alors à l'impact historique cumulé depuis la période pré-industrielle. L'impact historique est pertinent car, comme expliqué en section 1.3.3, ce sont bien les émissions cumulées qui comptent pour déterminer la température d'équilibre de la Terre. Néanmoins, du point de vue de la gouvernance de la lutte contre le réchauffement climatique, ce sont plutôt les émissions récentes qui comptent : ainsi, pour des activités humaines introduites récemment et avec un volume significatif au cours de l'ère industrielle, comme le numérique ou l'aviation, leur part des émissions cumulées globales est, sauf événement exceptionnel, inférieure à la part de leur contribution actuelle. Réciproquement, il ne serait pas pertinent de prendre en compte des activités ayant cessé au moment de formuler des recommandations pour le présent, et ce même si elles représentent une contribution significative aux émissions cumulées par le passé. Dans la suite nous présentons donc des valeurs représentant l'impact climatique de l'aviation pour les deux méthodes. Ces chiffres sont résumés dans le tableau 2.1 et sont basés sur les données de l'AIE pour les émissions de CO₂ et les données de Lee *et al.* pour les effets non-CO₂.

Dans les sections 2.2.2 et 2.2.3, nous nous intéressons uniquement aux émissions dues à la combustion du kérosène et à l'aviation globale, *i.e.* l'aviation

Période	CO ₂		ERF	
	GtCO ₂	% des émissions	mW m ⁻²	% de l'ERF anthropique
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	—

TABLEAU 2.1 – Impact climatique de l’aviation globale sans prise en compte des émissions hors combustion de CO₂. La colonne CO₂ présente les émissions de CO₂ du secteur aérien sur les périodes considérées et le pourcentage des émissions anthropiques totales qu’elles représentent. La colonne ERF rapporte l’impact du trafic aérien sur le forçage radiatif et le pourcentage qu’il représente par rapport à l’ERF anthropique total. Les valeurs médianes sont utilisées pour les calculs, et les incertitudes, lorsqu’elles sont connues, sont rapportées dans le corps du texte. La part de l’ERF de 2018 n’est pas rapportée car ces parts annuelles sont soumises à de fortes fluctuations, cf. le corps du texte pour plus de détails. Les sources et la méthodologie de calcul sont détaillées dans l’annexe B.

commerciale mais aussi l’aviation militaire et privée (cf. section 2.2.5 pour plus de détails). La section 2.2.4 intègre les émissions dues à la production du kérosène et la section 2.2.5 restreint le périmètre à l’aviation commerciale, qui est plus pertinente pour la suite du rapport.

Lorsque les incertitudes sur un chiffre donné sont connues, nous rapportons après la valeur les bornes de l’intervalle de confiance à 90 %. Par exemple, lorsque nous disons que l’aviation globale a généré un forçage radiatif de 100,9 mW m⁻² [55-145] entre 1750 et 2018, 100,9 mW m⁻² correspond à la valeur médiane, et la probabilité que la valeur réelle soit comprise entre 55 mW m⁻² et 145 mW m⁻² vaut 90 %.

2.2.2 Évaluation des émissions de CO₂

Nous commençons par présenter les chiffres concernant les effets CO₂. En 2018, l’aviation globale a émis 1,0 GtCO₂ par la combustion du kérosène^a, ce qui représente 2,4 % du total des émissions de CO₂ anthropiques^b la même année (pour le détail de ces calculs et des suivants, cf. l’annexe B). Si maintenant on regarde l’impact historique cumulé à partir de 1750, date communément considérée comme le début de l’ère pré-industrielle et prise comme référence climatique, on trouve que les émissions de l’aviation représentent 1,4 % des émissions anthropiques cumulées entre 1750 et 2018 (cf. tableau 2.1).

Ces deux valeurs sont en augmentation tendancielle depuis 1960 comme le montre la figure 2.3. Cela signifie que l’aviation prend une place de plus en plus importante dans les émissions mondiales de CO₂, ce que l’on vérifie sur la figure 2.4 qui montre que, depuis 1990, les émissions du secteur aérien sont celles qui ont crû le plus fortement, à égalité avec les industries de génération d’électricité et légèrement plus vite que le secteur des transports (hors aviation). On remarque aussi sur la figure 2.3 que la part de l’aviation dans les émissions

a. Ce chiffre comprend toute l’aviation, à savoir l’aviation commerciale mais aussi l’aviation privée et militaire, qui représente environ 12 % des émissions¹. Nous reviendrons sur ce point dans la section 2.2.5.

b. Y compris les émissions liées à l’usage des sols.

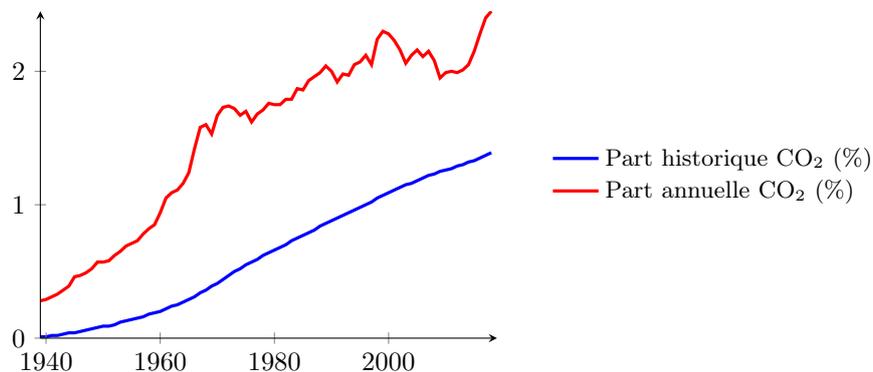


FIGURE 2.3 – Évolution des parts historiques et récentes (annuelles) de l'aviation dans les émissions de CO₂ mondiales. La part historique (en bleu) correspond à la valeur des émissions cumulées de l'aviation depuis 1750 divisée par la valeur des émissions cumulées mondiales. La part annuelle (en rouge) correspond à la valeur des émissions annuelles de l'aviation divisée par la valeur des émissions annuelles mondiales. Calculs effectués à partir des données de [Our World In Data](#) pour les émissions anthropiques de CO₂, et des données de l'AIE pour les émissions de CO₂ de l'aviation.

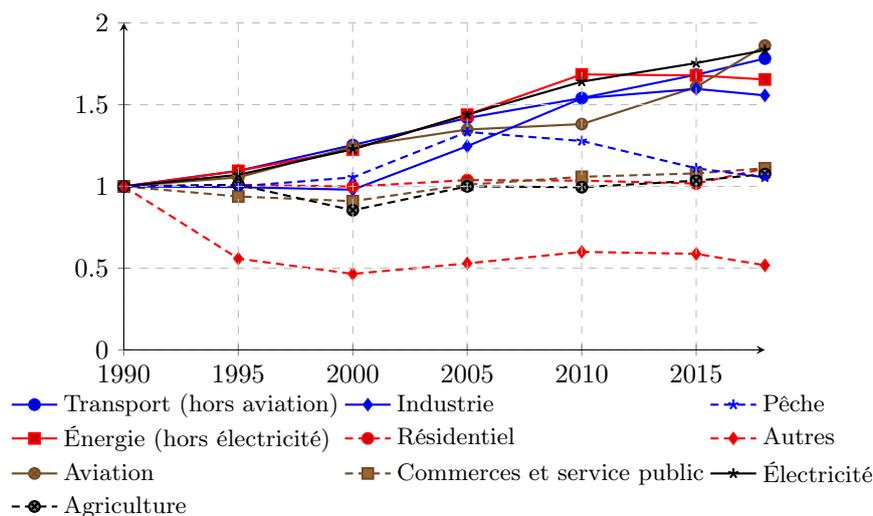


FIGURE 2.4 – Évolution des émissions de CO₂ rapportées à leur niveau de 1990 des différents secteurs d'activité, d'après les données de l'AIE.

historiques cumulées de CO₂ est plus faible que sa part actuelle. Cela s'explique par le fait que les émissions de l'aviation croissent plus rapidement que celles des autres secteurs mais aussi parce que les émissions du secteur aérien n'ont démarré qu'en 1940, année communément prise comme référence pour estimer les impacts climatiques de l'aviation, alors que l'impact sur le forçage radiatif est évalué depuis 1750. Sur la période 1940–2018, les émissions du secteur aérien ont représenté 1,7 % des émissions totales, soit effectivement plus que les 1,4 % sur la période 1750–2018.

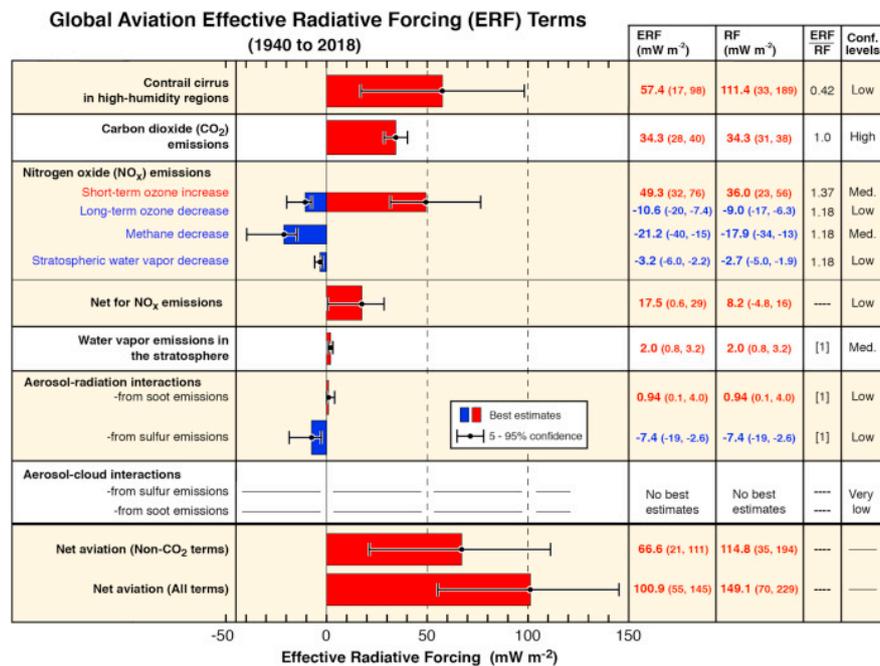


FIGURE 2.5 – Décomposition des termes de forçage radiatif dus à l’aviation globale de 1940 à 2018. Les barres et les moustaches indiquent respectivement les meilleures estimations du forçage radiatif et les intervalles de confiance à 90 %. Les barres rouges indiquent les termes de réchauffement et les barres bleues les termes de refroidissement. D’après la figure 3 (et sa légende) de Lee *et al.*⁹

2.2.3 Évaluation de l’impact de l’aviation sur le forçage radiatif

Pour estimer l’impact climatique de l’aviation en incluant les effets CO₂ et non-CO₂, nous utilisons les résultats de Lee *et al.*⁹ qui évaluent cet impact en terme de forçage radiatif (effectif). Les effets non-CO₂ sont de natures variées et plus difficiles à évaluer que les effets CO₂. Ils sont notamment la source principale des incertitudes pour évaluer l’impact climatique de l’aviation, et certains effets, tels que les interactions entre les aérosols et les nuages, ne sont pas encore suffisamment bien compris pour être pris en compte. Ces incertitudes sont rapportées sur la figure 2.5 et sont discutées plus en détails ci-dessous. Comme pour les effets CO₂, on peut chercher à évaluer leur impact absolu ou relatif, et historique ou récent. Comme nous le verrons ci-dessous, l’évaluation de la part récente en terme de forçage radiatif pose de nouveaux problèmes méthodologiques par rapport à celle du CO₂.

Impact sur le forçage radiatif depuis l’ère pré-industrielle

Lee *et al.*⁹ ont calculé qu’entre 1750 et 2018, l’aviation globale a induit une hausse du forçage radiatif de 100,9 mW m⁻² [55-145]. La figure 2.5 détaille la manière dont ce chiffre se répartit entre les effets CO₂ et les cinq effets non-CO₂ évoqués plus haut. Il en ressort que les effets non-CO₂ sont prépondérants : ils

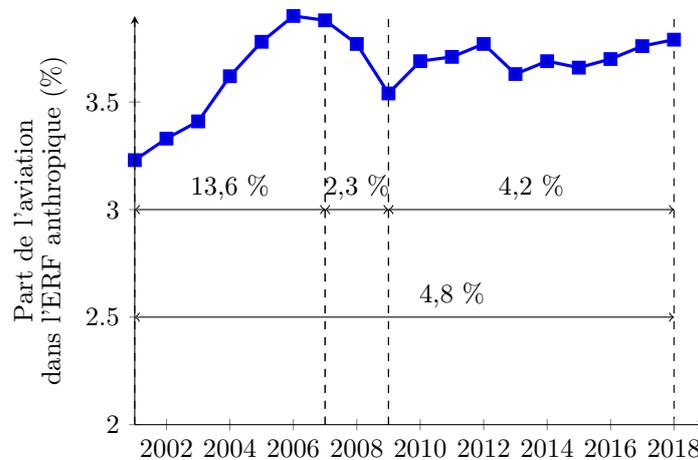


FIGURE 2.6 – Évolution de la part de l’aviation dans le forçage radiatif anthropique calculé depuis 1750. Ainsi, la valeur de la courbe en 2010 correspond au rapport entre la hausse du forçage radiatif anthropique due à l’aviation entre 1750 et 2010, divisé par le forçage radiatif anthropique sur la même période. Les valeurs au-dessus des flèches représentent la « part » plus récente de l’ERF anthropique due à l’aviation sur la période considérée. Calculs effectués à partir des données de Lee *et al.*⁹ pour les valeurs de forçage radiatif dû à l’aviation, et du sixième rapport d’évaluation du GIEC pour les valeurs du forçage radiatif anthropique^{FSA+21}.

sont responsables de 66 % du forçage radiatif, soit $66,6 \text{ mW m}^{-2}$ [21-121] alors que les effets CO_2 contribuent à hauteur de $34,3 \text{ mW m}^{-2}$ [28-40]^a. Les traînées de condensation et les NO_x sont les effets non- CO_2 prédominants puisqu’ils ont respectivement induit une hausse du forçage radiatif de $57,4 \text{ mW m}^{-2}$ [17-98] et de $17,5 \text{ mW m}^{-2}$ [0,6-29].

Pour appréhender ce que représente cette hausse de $100,9 \text{ mW m}^{-2}$ du forçage radiatif entre 1750 et 2018, ainsi que pour des questions de gouvernance de la lutte contre le réchauffement climatique, il est important de déterminer la proportion du réchauffement que ces $100,9 \text{ mW m}^{-2}$ représentent parmi les activités humaines. En utilisant la valeur récente de forçage radiatif anthropique, estimée à $2,66 \text{ W m}^{-2}$ entre 1750 et 2018^{FSA+21}, on voit que l’aviation a été responsable de 3,8 % du réchauffement climatique sur cette même période^b.

Par ailleurs, les données disponibles^c permettent de tracer l’évolution de la part de l’aviation dans la hausse du forçage radiatif anthropique total. Cette évolution est tracée en figure 2.6 et exhibe un comportement très différent de la figure analogue pour les émissions de CO_2 (courbe bleue sur la figure 2.3). En effet, alors que pour les effets CO_2 l’impact historique croît essentiellement linéairement dans le temps, reflétant ainsi le caractère cumulatif du CO_2 , l’impact historique en terme de forçage radiatif a fluctué depuis 2001. En effet, une forte

a. Ce chiffre ne prend pas en compte les émissions hors combustion.

b. Lorsque Lee *et al.* ont réalisé leurs estimations, la valeur du forçage radiatif anthropique n’était connu que jusqu’en 2011. Sur la période 1750–2011, ils estimaient ainsi que l’aviation avait été responsable de 3,5 % [3,4-4,0] du réchauffement climatique. La valeur de 3,8 % est donc une mise à jour de ce chiffre.

c. Nous remercions Laurent Terray de nous avoir fourni les sources de la figure 2.10 du sixième rapport d’évaluation du GIEC^{FSA+21}.

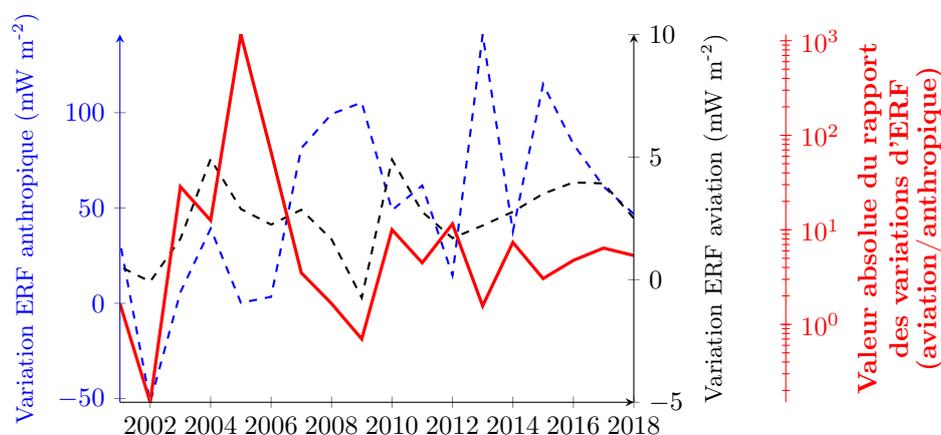


FIGURE 2.7 – Bleu pointillé : évolution annuelle du forçage radiatif anthropique. Noir pointillé : évolution annuelle du forçage radiatif dû à l’aviation. Rouge plein : valeur absolue du rapport des deux courbes. Cette dernière courbe représente donc, pour chaque année, la valeur absolue de la « part » de l’évolution annuelle du forçage radiatif anthropique due à l’aviation. La valeur absolue est considérée afin de pouvoir prendre une échelle logarithmique pour la courbe rouge. En 2002, le rapport est positif mais il résulte d’un rapport de deux valeurs négatives puisque cette année, le forçage radiatif anthropique et le forçage radiatif dû à l’aviation ont diminué. Seule la valeur du rapport en 2009 est négative, année où le forçage radiatif anthropique a augmenté, mais celui de l’aviation a diminué.

croissance de la part de l’aviation a lieu de 2001 à 2007, suivie d’une décroissance de 2007 à 2009, notamment due à la diminution de l’ERF de l’aviation comme on le verra sur la figure 2.7. En revanche, contrairement à la part des émissions de CO_2 qui a connu une nouvelle croissance rapide après 2010 (cf. figure 2.3), la part historique de l’ERF de l’aviation augmente faiblement depuis 2009. Cette faible variation est due à la diminution des émissions mondiales d’aérosols, visible sur la figure 1.5, qui entraîne une hausse du forçage radiatif anthropique.

Impact récent sur le forçage radiatif

Lee *et al.*⁹ fournissent les données de l’impact de l’aviation sur le forçage radiatif pour chaque année entre 2000 et 2018, ce qui, combiné avec les variations annuelles du forçage radiatif anthropique, permet de tracer l’analogie de la courbe rouge de la figure 2.3, mais pour l’impact sur le forçage radiatif et non plus simplement l’impact des émissions de CO_2 . La courbe rouge de la figure 2.7 représente ainsi la valeur absolue du rapport, année après année, entre la variation annuelle du forçage radiatif dû à l’aviation et la variation annuelle du forçage radiatif anthropique total. Par exemple, on voit qu’en 2012, l’aviation a été responsable de 11 % de la hausse du forçage radiatif anthropique total. À première vue, il est tentant d’interpréter ce rapport comme la part de l’aviation dans la variation annuelle du forçage radiatif. Néanmoins, cette interprétation est à prendre avec précaution car, contrairement aux valeurs d’émissions annuelles de CO_2 qui sont positives, l’évolution annuelle du forçage radiatif résulte d’une différence entre des termes positifs et négatifs. Le rapport entre la varia-

tion annuelle du forçage radiatif de l’aviation et la variation annuelle du forçage radiatif anthropique peut ainsi être négatif si l’aviation augmente le forçage radiatif une année où le forçage radiatif anthropique diminue (ou inversement), et il peut aussi être plus grand que 1 si l’aviation induit une hausse du forçage radiatif supérieure à la hausse du forçage radiatif anthropique, ce qui peut arriver si les effets refroidissants sont très forts. Ainsi en 2009, le forçage radiatif anthropique a augmenté alors que l’aviation a induit une baisse du forçage radiatif, correspondant à une « part » négative ; et en 2005, le forçage radiatif anthropique a augmenté de $0,2 \text{ mW m}^{-2}$ alors que l’aviation a induit une hausse de $2,9 \text{ mW m}^{-2}$, induisant une « part » supérieure à 1000 %, cf. figure 2.7.

Par ailleurs, au-delà de l’interprétation délicate de ce chiffre, la « part » de la variation annuelle du forçage radiatif due à l’aviation est soumise à de très fortes fluctuations et, contrairement à ce que l’on a observé pour le CO_2 (courbe rouge de la figure 2.3), aucune tendance claire ne se dégage sur la période 2000–2018, comme l’indiquent les pourcentages par période sur la figure 2.6. Une solution possible est de lisser ces variations sur plusieurs années. Par exemple, sur la période de 2000 à 2018, l’aviation a représenté 4,8 % de la hausse du forçage radiatif, soit une valeur plus grande que les 3,8% sur la période 1750–2018. Depuis 2014, la variation annuelle est plus stable et oscille entre 3 % et 7 %, avec une moyenne de 5,4 %. La valeur disponible la plus récente, en 2018, s’élève à 5,3 %.

Incertitudes

Les différentes valeurs présentées ci-dessus sont soumises à des incertitudes qui sont rapportées sur la figure 2.5 et que nous avons précisées dans le texte lorsque cela était possible. On voit ainsi que les plus fortes incertitudes sont dues aux effets non- CO_2 , notamment l’effet sur le forçage radiatif des cirrus induits par les traînées de condensation mais aussi des NO_x . Par ailleurs, les incertitudes sont tellement fortes concernant les interactions aérosol-nuage que ces effets ne sont pas inclus dans l’estimation de Lee *et al.*⁹ Elles pourraient néanmoins complètement changer la vision que l’on a de l’impact climatique de l’aviation : pour les interactions aérosol-nuage dues aux émissions de suie, Lee *et al.* rapportent en effet des valeurs s’étalant sur une très large plage allant de -500 mW m^{-2} à 300 mW m^{-2} .

Si nous nous sommes contentés ci-dessus de rapporter et expliquer les chiffres de Lee *et al.*⁹, de nombreux autres travaux récents permettent de réduire les incertitudes. Grewe *et al.*²⁹ préconisent par exemple une modification de la méthodologie pour estimer l’impact des NO_x afin de prendre en compte l’aspect non-linéaire du système chimique dans lequel ces émissions ont lieu. Selon eux, la non-prise en compte de cette non-linéarité sous-estime l’impact des NO_x . Par ailleurs, Kärcher *et al.*³⁰ ont récemment montré que les valeurs extrêmes (positives et négatives) de l’impact sur le forçage radiatif des interactions aérosol-nuage évoquées ci-dessus étaient probablement surestimées. S’ils ne donnent pas d’estimation de la valeur du forçage radiatif, ils concluent que l’impact des interactions aérosol-nuage dues aux émissions de suie est probablement beaucoup plus faible que celui dû aux cirrus induits par les traînées de condensation et pourrait même être négligeable. Cette discussion montre la nécessité de recherches supplémentaires pour réduire les incertitudes qui pèsent sur les effets non- CO_2 .

2.2.4 Prise en compte des émissions de CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie du kérosène

Dans le cadre de ce rapport, nous aurons besoin d'inclure les émissions de CO₂ hors combustion, liées au cycle de vie du kérosène (extraction, transport, raffinage). En effet, nous allons par la suite essayer de comprendre dans quelle mesure des changements de vecteur énergétique peuvent diminuer l'impact climatique de l'aviation. Or, si l'on ne considère que les émissions de CO₂ liées à la combustion du carburant, alors l'impact d'un remplacement du kérosène par un biocarburant, par exemple, est négligeable car la combustion de carburant d'origine fossile ou végétale émet quasiment autant de CO₂. En fait, l'intérêt potentiel des biocarburants réside dans le fait que le CO₂ émis pendant leur combustion a été capté pendant la croissance de la biomasse : il provient donc de l'air et non des réserves géologiques, et ces émissions ne viennent pas s'ajouter au CO₂ de l'atmosphère puisqu'il en aura été préalablement capté. Ce calcul nécessite donc de faire des comparaisons sur l'ensemble du cycle de vie. Ce raisonnement est aussi indispensable pour d'autres solutions technologiques comme l'avion électrique ou l'avion à hydrogène : électricité et hydrogène ne sont en effet que des vecteurs énergétiques, qui, s'ils n'émettent effectivement aucun CO₂ pour propulser l'avion, nécessitent d'être produits en amont et c'est lors de cette étape que se situent potentiellement les émissions de CO₂. De manière générale, l'analyse en cycle de vie est la méthode la plus objective pour avoir une vision exhaustive des impacts environnementaux et permet d'éviter des transferts de ces impacts en amont ou en aval du périmètre de l'étude.

Les émissions de CO₂ sur l'ensemble du cycle de vie du kérosène dépendent de plusieurs facteurs, comme par exemple le lieu de production qui influence les émissions dues au transport et à l'extraction. Ces émissions représentent environ 20 % des émissions liées à la combustion : ainsi, alors que la combustion d'un kilogramme de kérosène émet 3,13 kg de CO₂, nous avons retenu la valeur standard de 3,77 kgCO₂/kg^a lorsque l'on inclut les émissions sur l'ensemble du cycle de vie du kérosène (cf. annexe B.1 pour une discussion de cette valeur). Il est important de réaliser que cette valeur est une valeur représentative puisque, comme expliqué ci-dessus, les émissions hors combustion du kérosène dépendent notamment de son lieu de production.

Les résultats obtenus en considérant cette méthodologie sont récapitulés dans le tableau 2.2. On trouve alors que les émissions de l'aviation en considérant l'ensemble du cycle de vie du kérosène s'élèvent à 1,2 GtCO₂ en 2018, soit 2,9 % des émissions mondiales de CO₂ la même année^b.

2.2.5 Réduction du périmètre à l'aviation commerciale

Si considérer l'aviation globale est pertinent pour être exhaustif dans les impacts des aéronefs dans leur ensemble, il est préférable de se concentrer sur l'aviation commerciale pour évaluer des scénarios prospectifs. En effet, comme

a. En fait, les émissions hors combustion comprennent en faible quantité des émissions d'autres gaz à effet de serre que le CO₂, et cette valeur de 3,77 est en fait mesuré en CO₂-eq. Néanmoins, pour des raisons expliquées dans l'annexe B.1, nous considérerons qu'il s'agit d'émissions de CO₂.

b. N'ayant pas de données concernant les émissions hors combustion sur toute la période considérée, nous ne chercherons pas à estimer la part de l'aviation dans les émissions cumulées en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie du kérosène.

Période	CO ₂		ERF	
	GtCO ₂	% des émissions	mW m ⁻²	% de l'ERF anthropique
2000–2018	18,0	2,6 %	46,6	5,0 %
2018	1,2	2,9 %	2,7	—

TABLEAU 2.2 – Impact climatique de l’aviation incluant les émissions de CO₂ liées à la production du carburant. La colonne CO₂ présente les émissions de CO₂ du secteur aérien sur les périodes considérées et le pourcentage des émissions anthropiques totales qu’elles représentent. La colonne ERF rapporte l’impact du trafic aérien sur le forçage radiatif et le pourcentage qu’il représente par rapport à l’ERF anthropique total sur la période considérée. La part de l’ERF de 2018 n’est pas rapportée car ces parts annuelles sont soumises à de fortes fluctuations. Les sources et la méthodologie de calcul sont détaillées dans l’annexe B.

Période	CO ₂		ERF	
	GtCO ₂	% des émissions	mW m ⁻²	% de l'ERF anthropique
Émissions directes				
2000–2018	13,0	1,8 %	45,1	4,9 %
2018	0,9	2,1 %	4,1	—
Émissions globales				
2000–2018	16,0	2,3 %	47,6	5,1 %
2018	1,1	2,6 %	4,2	—

TABLEAU 2.3 – Impact climatique de l’aviation commerciale. La colonne CO₂ présente les émissions de CO₂ de l’aviation commerciale sur les périodes considérées et le pourcentage des émissions anthropiques totales qu’elles représentent. La colonne ERF rapporte l’impact sur le forçage radiatif et le pourcentage qu’il représente. Les résultats sont donnés pour les émissions directes (combustion du kérosène) et globales (combustion du kérosène, production du carburant, autres phases du cycle de vie). La part de l’ERF de 2018 n’est pas rapportée car ces parts annuelles sont soumises à de fortes fluctuations.

nous le verrons dans la suite, des hypothèses seront par exemple faites sur l’évolution du trafic, les améliorations technologiques ou le taux de remplissage des avions. Ces hypothèses concernent donc exclusivement l’aviation commerciale et il n’est pas justifié de les appliquer à l’aviation militaire et privée, dont les évolutions du trafic et de l’efficacité obéissent à d’autres logiques.

La méthodologie pour réduire le périmètre à l’aviation commerciale est plus complexe et est décrite dans l’annexe B.5. Les résultats obtenus avec cette méthode sont présentés dans le tableau 2.3. Ainsi, en incluant l’ensemble des phases du cycle de vie, l’aviation commerciale représente 2,6 % des émissions de CO₂ en 2018 et est responsable de 5,1 % du forçage radiatif effectif récent (2000–2018).

2.3 Comparaison des effets CO₂ et non-CO₂

Une différence fondamentale entre les effets CO₂ et non-CO₂ tient à leurs échelles de temps différentes. Ainsi, alors qu’une partie du CO₂ émis reste dans

l’atmosphère pendant des siècles³¹, les cirrus de traînées persistent au plus quelques jours^{23,32} et les aérosols restent au plus un an dans l’atmosphère (et au maximum un mois s’ils sont émis dans la troposphère)⁵. En conséquence, l’impact des effets CO₂ est cumulatif et sur le long terme, alors que l’impact des effets non-CO₂ est instantané et sur le court terme. Il s’ensuit que l’impact des effets CO₂ dépend de la valeur absolue des émissions cumulées de CO₂, alors que, toutes choses égales par ailleurs, l’impact des effets non-CO₂ dépend principalement de la variation des émissions annuelles de l’aviation.

Prenons un exemple très simple pour illustrer qualitativement ce point, et imaginons que, toutes choses égales par ailleurs, le trafic aérien reste constant pendant une longue période, ce qui implique un taux constant d’émission de CO₂. Plusieurs effets climatiques se compensent et font que ces émissions à taux constant induisent une augmentation à peu près linéaire de la température. C’est le principe de sensibilité climatique, capturé par un coefficient de proportionnalité entre température et émissions de CO₂ appelé TCRE pour l’anglais *transient climate response to cumulative carbon emissions*. Bien que le trafic aérien reste constant, les effets CO₂ ont donc un impact linéaire sur la température, ce qui traduit leur effet cumulatif. La situation concernant les effets non-CO₂ est très différente. Considérons les traînées de condensation, qui sont responsables de la majeure partie de ces effets. Si l’on fait un bilan d’une année sur l’autre, alors en première approximation, l’effet des traînées une certaine année est le même que l’effet des traînées l’année précédente, ce qui fait que l’impact des effets non-CO₂ est constant. Ainsi, à trafic constant, l’impact des effets CO₂ augmente quand celui des effets non-CO₂ est stable. Le même raisonnement montre que :

- si le trafic croît, alors (toutes choses égales par ailleurs) les effets non-CO₂ induisent une hausse du forçage radiatif ;
- et donc de manière symétrique, si le trafic décroît, alors (toutes choses égales par ailleurs) les effets non-CO₂ induisent une baisse du forçage radiatif.

La variation des effets non-CO₂ dépend donc grandement de la variation du trafic et leur impact peut donc évoluer dans le temps, alors que, de par leur nature cumulative et de long terme, les effets CO₂ sont beaucoup moins liés à court terme aux variations du trafic. Cette corrélation entre l’évolution de l’impact des effets non-CO₂ avec l’évolution du trafic est explicite sur la figure 2.8 qui trace l’évolution des taux annuels de variation du forçage radiatif dû à l’aviation et du trafic (mesuré en avion.km). On voit ainsi une forte corrélation : l’impact climatique de l’aviation augmente lorsque le trafic augmente, et diminue lorsqu’il diminue. Par ailleurs, l’amplitude des hausses et des baisses de l’impact climatique est étroitement lié à celle de l’évolution du trafic. Les années 2002 et 2009 sont à ce titre particulièrement instructives : sur la période 2000–2018, il s’agit des seules années où le trafic a baissé (suite à des crises économiques mondiales), et ces baisses de trafic se sont traduites par un impact climatique négatif (effet refroidissant relatif de l’aviation). Outre l’évolution du trafic aérien, des stratégies spécifiques, détaillées dans le chapitre 7, pourraient aussi permettre de diminuer le forçage radiatif de ces effets non-CO₂.

Dans les chapitres 8 et 9 sur les scénarios de transition du secteur aérien, l’analyse sera principalement effectuée sur les émissions de CO₂. En effet, elles ont un effet de long terme sur le climat et les incertitudes associées sont plus faibles. De plus, les méthodologies associées sont mieux établies, à l’image de la

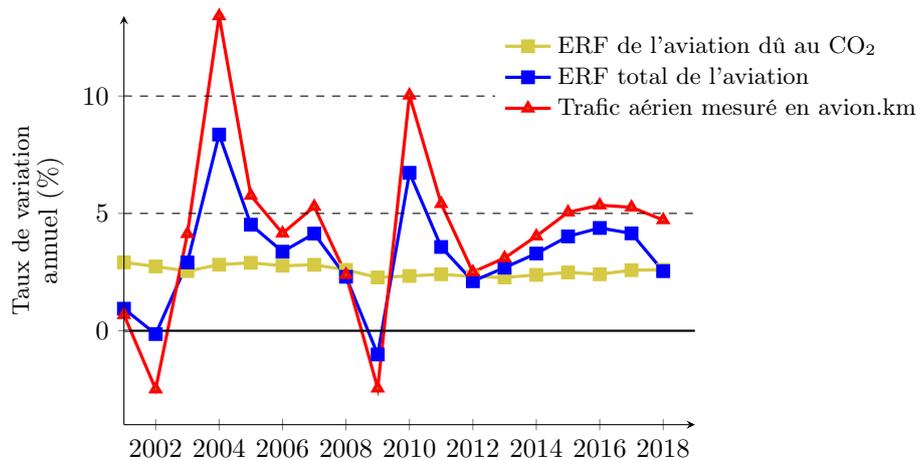


FIGURE 2.8 – La courbe bleue indique le taux de variation annuel du forçage radiatif dû à l’aviation, la courbe marron indique le taux de variation annuel du forçage radiatif dû aux effets CO₂ de l’aviation et la courbe rouge indique la variation du trafic (mesuré en kilomètres parcourus par les avions) entre 2001 et 2018. On voit une très forte corrélation entre la variation de l’impact de l’aviation et la variation du trafic, due à l’impact à court-terme des effets non-CO₂. L’effet cumulatif des effets CO₂ se traduit par un taux de variation annuel de leur impact très stable. À noter l’année 2009, où le trafic a baissé et l’aviation a contribué à (localement) diminuer le forçage radiatif. À l’inverse, en 2004, le trafic a crû de 13 % et l’impact climatique de l’aviation de 8 %. La courbe bleue a été générée en utilisant les données de Lee *et al.*⁹, et la courbe rouge a été générée à partir des données OACI disponibles sur airlines.org.

notion de budget carbone. Nous proposerons néanmoins des approches possibles pour intégrer les effets non-CO₂, notamment celles qui utilisent la métrique équivalente PRG* détaillée dans l’annexe A, particulièrement pertinente pour estimer l’impact des effets non-CO₂ de l’aviation. Nous analyserons alors quelques scénarios afin de donner des tendances générales sur les stratégies spécifiques aux effets non-CO₂.

2.4 Réglementation environnementale

Il est important de mentionner que l’impact climatique, mais aussi plus largement environnemental, d’un avion est traité par les réglementations. En effet, pour la certification d’un avion, des exigences environnementales sont mises en place. Il s’agit par exemple des spécifications CS-34 et CS-36 de l’Agence européenne de la sécurité aérienne (EASA), couvrant le bruit, les NO_x et vapeurs des gaz brûlés, mais aussi depuis 2017 le CO₂ au niveau avion complet et les particules fines au niveau moteur. Aujourd’hui, chaque avion et chaque moteur, pour être certifié, doit répondre à ces exigences environnementales. Les autorités de certification, telles que l’EASA, suivent les recommandations de l’OACI présentes dans l’annexe 16 de la convention de Chicago^{Pro17} qui concernent la protection environnementale.

2.5 Impact du changement climatique sur l’avion

Les différents impacts de l’aviation sur le climat ont été présentés dans les sections précédentes. Toutefois, le lien entre aviation et climat n’est pas à sens unique et il existe aussi une rétroaction entre le changement climatique et l’aviation. Le transport aérien s’est développé dans le cadre d’un climat historiquement stable, en particulier les conditions climatiques locales ont largement déterminé l’emplacement des aéroports, la disposition des pistes d’atterrissage et les couloirs aériens. Dans un contexte d’évolution du climat, il devient nécessaire d’identifier les impacts associés aux modifications des propriétés physiques de l’atmosphère et plus largement au changement climatique, afin d’adapter dans la mesure du possible les infrastructures et les avions à ces nouvelles conditions.

Il n’existe pas encore suffisamment d’études pour établir un consensus sur l’ampleur des impacts que le changement climatique aura sur l’aviation. Toutefois, il s’agit d’un sujet de préoccupation majeur car 74 % des acteurs du transport aérien (notamment états, aéroports et compagnies aériennes) estiment que le secteur de l’aviation est déjà ou sera impacté dans un futur proche par le changement climatique^{gro18}. Les impacts du changement climatique sur l’aviation peuvent être de deux natures :

- les impacts directs, liés aux conséquences physiques du changement climatique (hausse de la température de l’air, modification des régimes de vents, montée du niveau des océans, etc.) ;
- les impacts indirects induits par ces changements au niveau économique et social, comme les modifications des habitudes touristiques et l’acceptabilité sociale. En particulier la hausse des températures (vagues de chaleur) pourrait conduire à une modification de l’attractivité de certaines régions touristiques³³. Des destinations estivales très prisées actuellement, comme la Grèce, pourraient ainsi voir la demande touristique chuter et ce dès la décennie 2020–2030, avec une réduction encore plus marquée (baisse de 40 % du nombre de touristes pendant l’été) au-delà de 2040^{TD10}.

Les impacts indirects sont essentiellement de nature économique et sociale et sortent donc du cadre de ce rapport. Nous détaillons ci-dessous les impacts directs les plus notables. Le tableau de la figure 2.9 présente une liste des impacts directs du changement climatique sur l’aviation, ainsi que les acteurs concernés (aéroports, compagnies aériennes, contrôle aérien).

2.5.1 Vulnérabilité des aéroports

Les principales menaces auxquelles vont faire face les aéroports sont dues à la montée des océans (submersions) et aux changements des régimes de précipitations (inondations). Les conséquences pour les aéroports peuvent être ponctuelles (certaines pistes sont indisponibles à cause des inondations) ou permanentes (aéroport inutilisable à cause de la montée du niveau des mers). Dans tous les cas, des conséquences sont aussi à prévoir sur les routes aériennes qui peuvent être interrompues, notamment par manque de disponibilité d’infrastructures au sol.

Pour identifier les aéroports les plus vulnérables face à la montée du niveau des mers, la méthode consiste à déterminer ceux qui se situent dans une zone de faible élévation côtière, définie comme la zone continue le long des côtes où

Climate risk	Impact	Actors	Key:								
 Precipitation change	<ul style="list-style-type: none"> • disruption to operations e.g. airfield flooding, ground subsidence • reduction in airport throughput • drainage system capacity • inundation of underground infrastructure (e.g. electrical) • inundation of ground transport access (passengers and staff) • loss of local utilities provision (e.g. power). 	→ AO ANSP → AO ANSP AO AO → AO ANSP  → AO ANSP 	<table border="1"> <tr> <td>Aircraft operators</td> <td>→</td> </tr> <tr> <td>Airport operators</td> <td>AO</td> </tr> <tr> <td>ANSP</td> <td>ANSP</td> </tr> <tr> <td>External</td> <td></td> </tr> </table>	Aircraft operators	→	Airport operators	AO	ANSP	ANSP	External	
Aircraft operators	→										
Airport operators	AO										
ANSP	ANSP										
External											
 Temperature change	<ul style="list-style-type: none"> • Changes in aircraft performance • Changes in noise impact due to changes in performance • heat damage to airport surface (runway, taxiway) • increased heating and cooling requirements • Increased pressure on local utilities e.g. water and power (for cooling). 	→ ANSP → AO ANSP AO AO 									
 Sea-level rise	<ul style="list-style-type: none"> • loss of airport capacity • impacts on en-route capacity due to lack of ground capacity • loss of airport infrastructure • loss of ground transport access 	→ AO ANSP → ANSP AO → AO ANSP 									
 Wind changes	<ul style="list-style-type: none"> • convective weather: disruption to operations • convective weather: route extensions • jet stream: increase in en-route turbulence • local wind patterns: disruption to operations and changes to distribution of noise impact 	→ AO ANSP → ANSP → AO → AO									
 Extreme events*	<ul style="list-style-type: none"> • disruption to operations, route extensions • disruption to ground transport access • disruption to utilities supply 	→ AO ANSP → AO  AO 									

FIGURE 2.9 – Vue d’ensemble des impacts potentiels liés au changement climatique sur l’aviation d’après Burbidge³⁴. Note : ANSP (Air Navigation Service Provider) regroupe les services d’aide à la navigation (gestion du trafic aérien, météorologie, etc.).

les terres sont à moins de 10 mètres au-dessus du niveau des océans. De cette manière, 1238 aéroports de différentes tailles sont identifiés, une grande partie d’entre eux étant situés aux États-Unis, en Asie du Sud et du Sud-Est, en Australie et dans des régions insulaires (Indonésie, Polynésie française, Bahamas, etc). Les 20 aéroports les plus fréquentés de la zone de faible élévation côtière représentent 18 % de l’ensemble des passagers transportés en 2018 et 25 % du fret aérien mondial (1,85 % du PIB mondial). L’augmentation du niveau des mers placerait une centaine de ces aéroports sous le niveau des océans d’ici à 2100³⁵. L’adaptation de ces aéroports pour les préserver des submersions (constructions de digues, hausse artificielle du niveau du sol ou infrastructures en mer) coûterait 57 milliards de dollars³⁵.

2.5.2 Modification des régimes de vent

Le changement climatique va aussi induire des modifications physiques au niveau de l’atmosphère, en particulier pour les courants atmosphériques tels que le courant-jet (*Jet Stream*). Ces courants aériens naissent à l’interface entre la troposphère (zone où la température décroît avec l’altitude) et la stratosphère (zone où la température croît avec l’altitude). Cette interface (la tropopause) se situe à une altitude moyenne de 11 km donc au niveau des couloirs aériens et présente des variations allant de 7 km à 17 km d’altitude en fonction de la latitude et de la saison. La majeure partie de ces courants circulent d’ouest en est et s’étirent sur plusieurs milliers de kilomètres pour quelques kilomètres d’épaisseur. Dans chaque hémisphère, il existe un courant-jet subtropical de faible intensité, situé entre 10 km et 16 km d’altitude, et un courant-jet polaire de forte intensité, situé entre 7 km et 12 km d’altitude. Au cœur de ces courants, la vitesse moyenne du vent est d’environ 25 m s^{-1} et peut atteindre ponctuellement environ 100 m s^{-1} .

Ces courants ont un impact fort sur les temps de vol des avions. Par exemple,

Intensité CAT	Cas 1		Cas 2		Cas 3		Cas 4	
	10 km	12 km	10 km	12 km	10 km	12km	10 km	12 km
Modérée	+30,8	+19,6	+46,5	+30,0	+143,3	+74,4	+34,3	+26,0
Sévère	+34,7	+20,5	+51,6	+34,2	+181,4	+88,0	+51,1	+40,2

TABLEAU 2.4 – Augmentation des turbulences en ciel clair entre l’ère pré-industrielle et la période 2050–2080 (en %), pour deux altitudes de croisière. Cas 1 : moyenne globale (monde) sur la période de décembre à février ; Cas 2 : moyenne globale (monde) sur la période de mars à mai ; Cas 3 : moyenne annuelle (Atlantique Nord) ; Cas 4 : moyenne annuelle (Afrique). Les données sont issues de Storer *et al.*³⁹.

un trajet New-York–Paris nécessite une heure de moins que le trajet inverse. La position et l’intensité du courant-jet sont soumis à de fortes variations journalières et saisonnières. Les conséquences du changement climatique sur la trajectoire du courant-jet vont être doubles³⁶ :

1. elle sera plus sinueuse, ce qui augmentera la probabilité d’événements météorologiques extrêmes aux moyennes latitude ;
2. elle sera décalée en moyenne vers le Nord d’environ 1 degré de latitude, tout en renforçant l’intensité moyenne du courant-jet.

L’impact sur le temps de trajet au-dessus de l’océan Atlantique Nord devrait être faible, de l’ordre de quelques minutes maximum à l’horizon 2100³⁷. Toutefois, le renforcement du courant-jet aura un impact significatif sur la production de zones turbulentes comme nous allons maintenant le détailler.

2.5.3 Impact sur la turbulence

En augmentant la probabilité d’occurrence d’évènements extrêmes, le changement climatique va aussi avoir un impact sur les phénomènes météorologiques, qui sont responsables de 12 % des accidents aériens^a, dont 65 % sont liés aux turbulences en ciel clair³⁸. Le principal mécanisme à l’origine de la création des turbulences en ciel clair est le cisaillement de la couche d’air, par exemple dû au courant-jet. Ces phénomènes turbulents peuvent être modérés (baisse rapide de l’altitude de vol de l’ordre de quelques mètres - les boissons sont renversées sur le sol) à sévères (baisse brutale de l’altitude de vol de l’ordre de quelques dizaines de mètre - les personnes qui ne sont pas attachées peuvent être éjectées de leur siège). En renforçant l’intensité du courant-jet, le changement climatique va augmenter la probabilité d’occurrence des évènements turbulents modérés à sévères, comme le montrent les résultats du tableau 2.4.

Cet impact sur les turbulences en ciel clair dépend largement de la zone géographique et de la période de l’année considérées³⁹. L’impact le plus fort concerne la période d’avril à mai pour laquelle la probabilité d’occurrence des turbulences modérées à sévères augmente d’environ 50 %. Cet effet est renforcé dans la zone de l’Atlantique Nord avec une probabilité augmentée de 150 % environ.

a. Les accidents correspondent essentiellement à des dommages physiques aux personnes ou aux appareils, les décès imputables aux turbulences demeurant rares. Le coût annuel de ces accidents est estimé dans une fourchette de 150 à 500 millions de dollars.

2.5.4 Impact sur les conditions givrantes

Le risque de givrage est un problème qui affecte les opérations au sol ou en vol, nécessitant de disposer de systèmes anti-givrage (préventif) ou de dégivrage (curatif), tant embarqués sur l'aéronef que disponibles au sol. Le givre se forme dans des conditions particulières de température et d'humidité. Dans les basses couches de l'atmosphère, il est dû à la présence de gouttelettes surfondues dans un environnement à température négative (entre 0 °C et -20 °C environ), qui se forment préférentiellement dans des régions atmosphériques chargées en vapeur d'eau (plus de 50 % d'humidité relative). Le réchauffement climatique devrait faire remonter plus haut en altitude les zones où ces conditions peuvent se rencontrer. Dans les hautes couches de l'atmosphère, la création de givre est liée à la présence d'une grande quantité de cristaux de glace très froids (< -50 °C), souvent au sommet de nuages convectifs. La formation de cumulonimbus plus intense et l'élévation de la tropopause entraînée par la hausse de température contribueraient ainsi à augmenter la probabilité de rencontrer des conditions givrantes dans les hautes couches de l'atmosphère.

2.5.5 Impact sur la performance des avions

Outre les effets sur les infrastructures, il existe un ensemble d'impacts directs de la hausse des températures sur la performance des avions. En particulier, plus l'air est chaud, moins il est dense, ce qui réduit la portance des avions et la poussée des moteurs (ces notions seront introduites et détaillées dans le chapitre 4). Ces impacts se font déjà sentir lors d'épisodes extrêmes. Par exemple, en 2019, suite aux fortes chaleurs à l'aéroport de Phoenix, une vingtaine de vols ont été annulés et plus d'une centaine de Boeing 737 ont été soumis à des restrictions de masse pour pouvoir décoller⁴⁰. L'impact sur la masse maximale autorisée au décollage augmente rapidement avec la température⁴¹ : pour l'aéroport de Phoenix, un Boeing 737 est ainsi soumis à une réduction de masse de l'ordre de 450 kg pour une température au sol de 38 °C et à une réduction de masse de 4500 kg à 47 °C (soit environ 6 % de sa masse maximale au décollage). Des chiffres similaires ont été obtenus pour des Airbus A320 en considérant l'aéroport de Madrid et des températures au sol du même ordre de grandeur^{Pra20}.

Compte tenu des effets du réchauffement climatique, la distance moyenne de décollage en été pourrait augmenter de 1 % à 6 % suivant la localisation de l'aéroport pour la période 2021–2050 par rapport à la période 1976–2005, tout en réduisant le taux de montée maximal⁴². Dans le cas d'un scénario conduisant à un réchauffement global de l'ordre de 5 °C en 2100, et considérant les avions actuels, la réduction du poids maximal au décollage est estimée à 5 % toute l'année, en particulier dans l'hémisphère nord aux hautes latitudes. Cela correspond à une réduction de la charge utile de 10 % à 20 % environ⁴³. En revanche, dans le cas d'un scénario où le réchauffement global ne dépasse pas 2 °C, la réduction de charge utile reste en moyenne inférieure à 1 %.

Chapitre 3

Identité de Kaya

Comme discuté en section 1.3.2, l'objectif de l'accord de Paris de limiter le réchauffement climatique bien en deçà de 2 °C nécessite une réduction drastique des émissions de GES, et en particulier des émissions de CO₂. L'identité de Kaya présentée dans ce chapitre permet d'identifier les différents leviers d'action **et constitue la clé de lecture de la suite de ce référentiel**. Après l'avoir énoncée dans le cas général, une version adaptée au secteur aérien est présentée et discutée.

3.1 Formulation historique

L'identité de Kaya, introduite par l'économiste japonais Yoichi Kaya en 1993⁴⁴, propose une décomposition des émissions de CO₂ en quatre facteurs faisant intervenir les émissions de CO₂, l'énergie utilisée (E), le produit intérieur brut (PIB) et la population mondiale :

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{CO}_2 & = & \frac{\text{CO}_2}{\text{E}} & \times & \frac{\text{E}}{\text{PIB}} & \times & \frac{\text{PIB}}{\text{Pop}} & \times & \text{Pop} & (3.1) \\
 \underbrace{\text{Émissions}} & & \underbrace{\text{Intensité}} & & \underbrace{\text{Intensité}} & & \underbrace{\text{PIB par}} & & \underbrace{\text{Population}} & \\
 \text{de CO}_2 & & \text{carbone} & & \text{énergétique} & & \text{habitant} & & & \\
 \text{MtCO}_2 & & \text{MtCO}_2/\text{EJ} & & \text{EJ}/\text{€} & & \text{€/hab} & & \text{hab} &
 \end{array}$$

où les quatre termes dont dépendent les émissions de CO₂ sont :

- l'**intensité carbone de l'énergie utilisée** mesurée par la quantité de CO₂ libérée pour chaque unité d'énergie utilisée ;
- l'**intensité énergétique de l'économie** donnant la quantité d'énergie utilisée pour produire un euro de richesse (biens et services) ;
- le **PIB par habitant** indiquant le niveau d'activité économique ou de richesse ;
- la **population mondiale**.

Chacun des termes de cette identité constitue un levier pour diminuer les émissions mondiales de CO₂, les trois premiers correspondant respectivement aux trois leviers évoqués à la section 1.4 : décarbonation, efficacité et sobriété. Cette identité constitue un outil efficace pour analyser l'évolution des émissions de

CO₂ et elle est notamment utilisée par le GIEC^{IPCC00} et par l'AIE^{IEA20a} tant pour une analyse historique que pour une approche prospective.

3.2 Application au secteur aérien

Le principe de décomposition des émissions de CO₂ en différents facteurs à la base de l'identité de Kaya peut être adapté au secteur aérien pour analyser l'évolution de ses émissions. On peut aboutir à une décomposition des émissions en trois termes qui correspondent aux différents leviers sur lesquels on peut jouer pour réduire l'empreinte carbone du secteur. On écrira par exemple

$$\underbrace{\text{CO}_2}_{\substack{\text{Émissions} \\ \text{de CO}_2 \\ \text{MtCO}_2}} = \underbrace{\frac{\text{CO}_2}{\text{E}}}_{\substack{\text{Intensité} \\ \text{carbone} \\ \text{MtCO}_2/\text{EJ}}} \times \underbrace{\frac{\text{E}}{\text{Trafic}}}_{\substack{\text{Intensité} \\ \text{énergétique} \\ \text{EJ/pass.km}}} \times \underbrace{\text{Trafic}}_{\substack{\text{Trafic} \\ \text{pass.km}}} \quad (3.2)$$

où l'on identifie les trois termes suivants :

- l'**intensité carbone** est la quantité de CO₂ libérée pour chaque unité d'énergie utilisée^a ;
- l'**intensité énergétique** est la quantité d'énergie utilisée pour qu'un passager fasse un kilomètre ;
- le **trafic** est la distance parcourue par l'ensemble des passagers et il est mesuré en passager-kilomètre^b (*Revenue Passenger Kilometer* ou RPK).

Ces trois termes correspondent aux trois leviers de la section 1.4, et les émissions totales sont simplement données par leur produit : l'intensité énergétique correspond au levier de l'efficacité, l'intensité carbone à celui de la décarbonation, et le trafic à celui de la sobriété.

Avant de considérer la décomposition de Kaya dans le cadre d'une approche prospective, il est intéressant d'étudier l'évolution historique des émissions de CO₂ du secteur aérien à l'aune de l'identité (3.2). La figure 3.1 illustre l'évolution de ces trois termes et des émissions totales de CO₂ entre 1973 et 2018 en partant d'une base 1 en 1973. On voit ainsi que l'intensité carbone n'a pas bougé, ce qui reflète le fait que le vecteur énergétique est le même depuis 1973^c. L'intensité énergétique a elle diminué de 79 % en 45 ans, ce qui correspond à une amélioration de l'efficacité énergétique moyenne de 3,5 % par an. Comme le montre

a. Dans la décomposition de Kaya de ce chapitre, nous considérons uniquement le CO₂ émis lors de la combustion du kérosène et pas sur l'ensemble de son cycle de vie par manque de données historiques sur les émissions amont.

b. Cette unité de mesure, notée pass.km, est utilisée pour mesurer le trafic aérien et correspond au total des distances parcourues par tous les passagers. Ainsi, lorsqu'un avion effectue un trajet de 1000 km avec 50 passagers à son bord, le trafic correspondant est de $1\,000 \times 50 = 5\,000$ pass.km ce qui correspond bien à la distance totale parcourue par l'ensemble des passagers. Cette métrique, qui tient compte du taux de remplissage de l'avion, peut être comparée au siège.km qui correspond au nombre de places théoriquement disponibles multiplié par le nombre de kilomètres parcourus, cf. décomposition (3.3). Pour un taux de remplissage de 100 % les deux métriques sont équivalentes.

c. Sur la figure 3.1, les valeurs de l'intensité carbone ne résultent pas d'un calcul mais sont prises comme constantes. C'est aussi la méthodologie utilisée par Lee *et al.*⁹, qui considère que l'intensité carbone du kérosène est restée constante depuis 1990. Certaines données de l'AIE suggèrent une baisse marginale de l'intensité carbone depuis 1973, de l'ordre de 1 %, cf. les données d'[émission](#) et de [consommation](#) de l'aviation internationale.

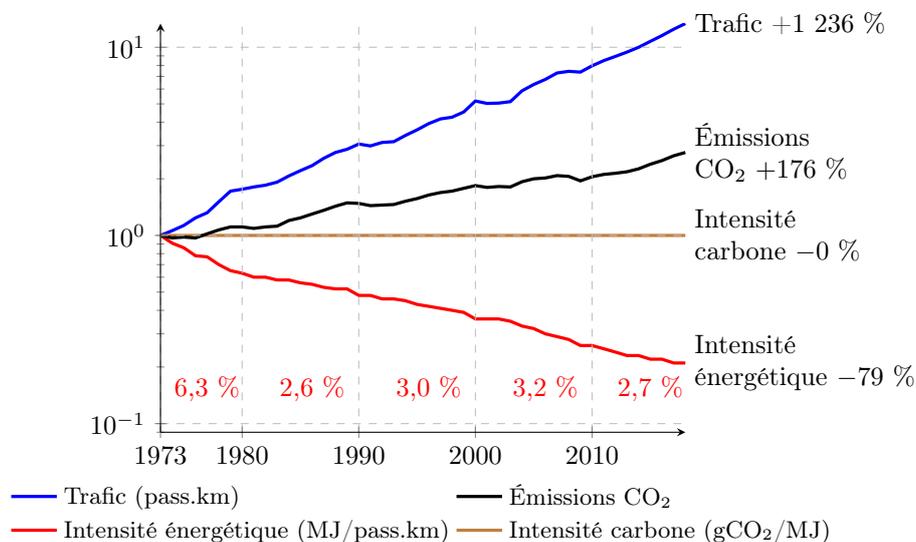


FIGURE 3.1 – Évolution des termes de la décomposition de Kaya (3.2) des émissions de l’aviation entre 1973 et 2018. Base 1 en 1973. L’échelle des ordonnées est logarithmique. Pour chaque décennie, le taux composé de variation annuelle de l’intensité énergétique est indiqué. Ainsi, entre 1980 et 1990, l’intensité a diminué à un taux composé de 2,6 % par an. Calculs effectués à partir des données de l’AIE et de l’OACI.

la figure 3.1, cette baisse n’est pas constante, les gains annuels allant de 2,6 % à 6,3 % en fonction des décennies. Ces baisses de consommation par pass.km ont été possibles grâce aux améliorations techniques réalisées en parallèle sur l’aérodynamique, la propulsion ou encore les systèmes avion (voir chapitre 4). Cette amélioration de l’efficacité énergétique du secteur aérien est plus de deux fois plus élevée que la moyenne mondiale calculée sur l’ensemble des secteurs d’activité. En effet, l’intensité énergétique dans le monde tous secteurs confondus a diminué de 36 % sur la période 1990–2018^{IEA20b}, soit une amélioration annuelle moyenne de 1,5 %. Cette comparaison indique que l’industrie aéronautique est depuis plusieurs décennies un secteur de très forte innovation. De plus, les améliorations technologiques, notamment en sûreté, aéroacoustique et furtivité électromagnétique, ont très souvent bénéficié à de nombreux autres secteurs comme ceux du transport et de l’énergie. Cette capacité historique d’innovation laisse présager que le secteur aéronautique sera en capacité d’apporter des solutions technologiques permettant de réduire significativement les émissions d’un avion.

Néanmoins, dans le même laps de temps, le trafic a augmenté beaucoup plus vite, à un rythme annuel de 5,9 %, passant ainsi de 618 milliards de passager-kilomètres en 1973 à 8257 en 2018. Cela a conduit in fine à une augmentation des émissions de CO₂ de 176 % entre 1973 et 2018. Ce phénomène s’explique en partie par l’effet rebond, phénomène mis en exergue dès 1865 par l’économiste William Stanley Jevons dans son livre « *La question du charbon* » : ce paradoxe stipule que des gains d’efficacité peuvent conduire à une augmentation globale des ressources consommées, et non une diminution comme on pourrait s’y attendre, en raison d’un accroissement des usages existants et du développement

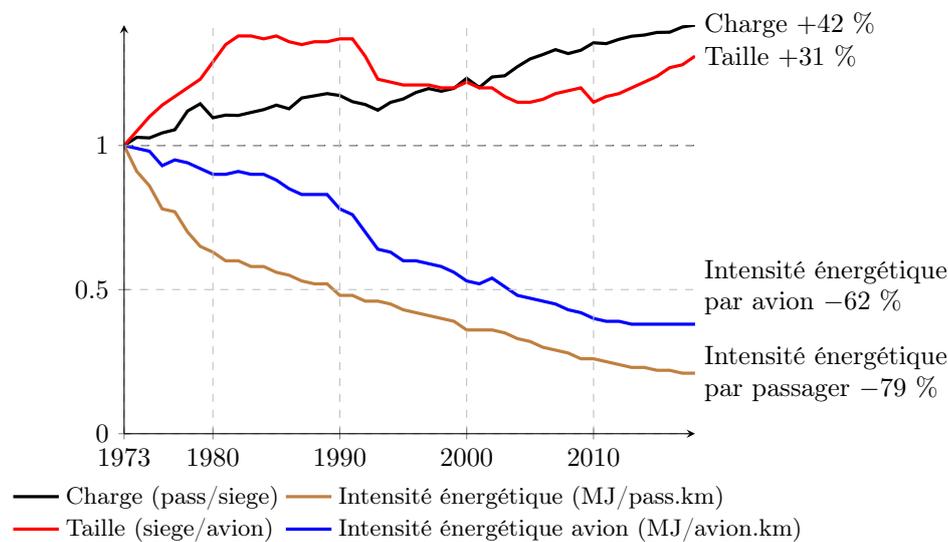


FIGURE 3.2 – Évolution des termes de la décomposition de Kaya (3.3) de l’intensité énergétique par passager entre 1973 et 2018. Calculs effectués à partir des données de l’AIE et de l’OACI.

de nouveaux usages rendus possibles par l’amélioration de l’efficacité et la baisse des coûts.

Il est possible de raffiner la décomposition de Kaya (3.2) en décomposant le terme d’intensité énergétique de la façon suivante :

$$\underbrace{\frac{E}{\text{pass.km}}}_{\substack{\text{Intensité} \\ \text{énergétique} \\ \text{par passager}}} = \underbrace{\frac{E}{\text{avion.km}}}_{\substack{\text{Intensité} \\ \text{énergétique} \\ \text{par avion}}} \times \underbrace{\frac{1}{\text{siege/avion}}}_{\substack{\text{Inverse} \\ \text{de la capacité} \\ \text{par avion}}} \times \underbrace{\frac{1}{\text{pass/siege}}}_{\substack{\text{Inverse} \\ \text{du taux de} \\ \text{remplissage}}} \quad (3.3)$$

de façon à faire apparaître trois nouveaux leviers sur lesquels jouer : le taux de remplissage, la capacité de l’avion et l’intensité énergétique mesurée en énergie à fournir pour faire parcourir un kilomètre à un avion (et non plus à un passager). L’évolution de ces différents termes depuis 1973 est représentée sur la figure 3.2, qui montre que l’amélioration de l’efficacité énergétique par passager est une combinaison de ces trois termes : des avions plus grands, mieux remplis et plus efficaces.

Au-delà cette analyse historique, l’identité de Kaya transposée au secteur aérien à l’équation (3.2) constitue un outil utile pour analyser et évaluer des scénarios prospectifs d’évolution de l’aviation commerciale. **Elle constitue la clé de lecture de la suite de ce référentiel.** La partie III se focalise sur les leviers technologiques pris de manière individuelle et considère leur potentiel d’évolution à l’horizon 2050 : le chapitre 5 décrit les perspectives d’amélioration technologique des avions correspondant au terme d’intensité énergétique alors que le chapitre 6 envisage les pistes de décarbonation du vecteur énergétique des avions correspondant au terme d’intensité carbone. Cette partie inclut également un dernier chapitre 7 sur les solutions technologiques envisageables

pour réduire les effets non-CO₂, même si ces aspects ne peuvent pas être analysés à l'aide de l'identité de Kaya de par sa construction même. En revanche, nous n'abordons pas dans cette partie le dernier levier de l'identité de Kaya correspondant au trafic car celui-ci relève exclusivement de choix économiques, politiques et sociétaux qui se situent hors du cadre scientifique de ce rapport. Ce troisième levier est ici considéré comme une variable d'ajustement pour évaluer la compatibilité avec l'objectif de l'accord de Paris de plusieurs scénarios d'évolution du secteur aérien construits à partir de différentes hypothèses sur les deux leviers technologiques. C'est l'objectif de la partie IV de ce référentiel qui décrit dans le chapitre 8 le contexte et les hypothèses retenues pour l'analyse de différents scénarios conduite au chapitre 9.

Troisième partie

Leviers technologiques

Limiter l'impact climatique de l'aviation nécessite de réduire les effets CO₂ et non-CO₂. Nous présentons dans cette partie les principaux leviers techniques et opérationnels envisagés à l'heure actuelle. Hors mention spécifique, l'ensemble de cette partie se concentre sur l'aviation commerciale, c'est-à-dire sur des gammes d'avions allant des avions régionaux aux long-courriers. Après une introduction aux principes de fonctionnement d'un avion, nous faisons un tour d'horizon des mesures permettant d'améliorer l'efficacité des avions, puis les mesures de décarbonation et nous abordons enfin les leviers pour diminuer les effets non-CO₂.

Chapitre 4

Principes généraux sur les avions

L'objectif de ce chapitre à visée pédagogique est de présenter les notions et principes de fonctionnement d'un avion afin de comprendre les sources de sa consommation énergétique dans les chapitres suivants. Après avoir rappelé comment un avion vole, le chapitre détaille plus spécifiquement l'aérodynamique, la propulsion et les systèmes avion. Ces éléments seront utiles dans la suite de cette partie pour identifier les différents leviers technologiques permettant de réduire sa consommation de carburant.

4.1 Comment vole un avion ?

La première étape est de bien comprendre comment fonctionne un avion. En vol de croisière, l'avion est à l'équilibre et il est soumis à quatre forces principales représentées sur la figure 4.1 : son **poïds** (*weight*), sa **portance** (*lift*), sa **traînée** (*drag*) et la **poussée** des moteurs (*thrust*). La portance et la traînée sont deux composantes d'une seule et même force appelée résultante des efforts aérodynamiques qui donne la contribution des forces de pression et de frottement exercées par l'air sur l'avion. La portance correspond à la composante de la force aérodynamique perpendiculaire à la direction de la vitesse d'avancement de l'avion, elle permet de compenser son poids. La traînée est la composante tangentielle de cette force aérodynamique et il s'agit d'une force résistive qui s'oppose à l'avancement de l'aéronef.

Ces deux forces aérodynamiques, la portance \vec{L} et la traînée \vec{D} , peuvent être exprimées via les équations (4.1) et (4.2)

$$\vec{L} = \frac{1}{2}\rho SV^2 C_L \vec{e}_z \quad (4.1)$$

$$\vec{D} = \frac{1}{2}\rho SV^2 C_D \vec{e}_x \quad (4.2)$$

avec ρ la densité de l'air à l'altitude de vol, S la surface de la voilure de l'avion, V la vitesse de l'avion et C_L et C_D des coefficients sans dimension qui dépendent de la géométrie de l'aile, de l'incidence et du régime de vol.

En utilisant le principe fondamental de la dynamique, la somme de ces forces est nulle en régime de croisière (vitesse et altitude constantes). Ainsi, la poussée

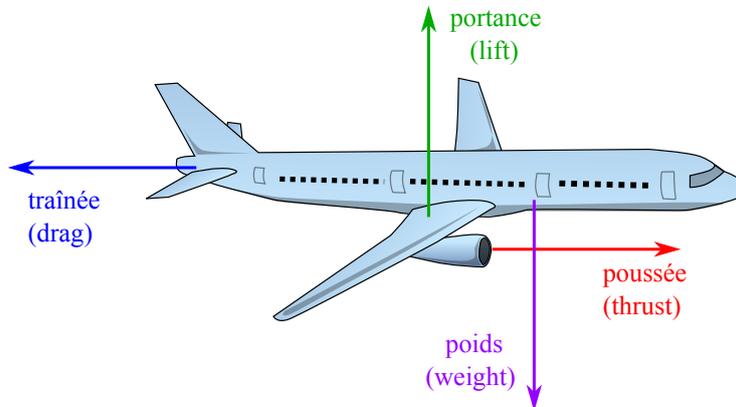


FIGURE 4.1 – Représentation schématique des 4 forces principales sur un avion.

des moteurs permet de maintenir la vitesse de l'avion constante pour à la fois assurer la génération de portance qui équilibre le poids et compenser la force de traînée.

4.2 Aérodynamique de l'avion

Compte-tenu de l'équilibre du vol en croisière schématisé à la figure 4.1, l'enjeu principal de la conception aérodynamique d'un avion consiste à maximiser la portance pour pouvoir transporter une plus grande masse utile tout en minimisant la traînée pour réduire la consommation de carburant. L'efficacité aérodynamique peut être alors mesurée simplement par la finesse définie comme le rapport entre les coefficients de portance et de traînée :

$$f = \frac{C_L}{C_D}. \quad (4.3)$$

Ainsi, à coefficient de portance donné, une augmentation de la finesse résulte nécessairement en une diminution de la traînée. Bien que d'un point de vue physique la traînée n'ait que deux origines (pression et frottement), les aviateurs ont l'habitude de décomposer la traînée d'un avion en différents postes dont deux sont prédominants. D'une part, la **traînée de frottement** D_f (*skin friction drag*), qui représente entre 45 et 50 % de la traînée totale⁴⁵, est essentiellement due au frottement de l'air sur les surfaces mouillées de l'avion^a, mais elle contient également un peu de traînée de pression et est également appelée traînée de profil ou traînée minimale incompressible. D'autre part, la **traînée induite** D_i , qui représente entre 40 à 45 % de la traînée totale⁴⁵, correspond à la traînée induite par la génération de portance sur une aile d'envergure finie. Enfin, les autres postes, qui représentent environ 10 % de la traînée totale⁴⁵, incluent la traînée de compressibilité (ou traînée d'onde), la traînée d'équilibrage de l'avion et les traînées parasites.

Comme mentionné en section 4.1, les coefficients aérodynamiques de l'avion dépendent de l'incidence, de la géométrie de l'aéronef et du régime de vol. Ainsi,

a. La « surface mouillée » d'un avion correspond à la surface qui est en contact avec l'écoulement d'air, elle exclut donc les surfaces où il y a des décollements.

on peut écrire pour le coefficient de traînée :

$$C_D = f(\alpha, \lambda, Re, M) \quad (4.4)$$

où α désigne l'incidence, $\lambda = b^2/S$ l'allongement de l'aile avec b son envergure et S sa surface, Re et M les nombres de Reynolds et de Mach de vol.

Le nombre de Reynolds, défini par $Re = (V L)/\nu$ avec V la vitesse de l'avion, L la longueur caractéristique de l'aile^a et ν la viscosité cinématique de l'air, mesure l'importance relative des forces d'inertie (qui promeuvent le mouvement) et des forces de viscosité (qui s'opposent au mouvement). À faible nombre de Reynolds, l'écoulement est dit laminaire alors qu'il devient turbulent à grand nombre de Reynolds ($Re \gtrsim 10^3 - 10^4$). L'intensité du frottement de l'air sur la paroi augmente significativement lorsque l'écoulement passe d'un régime laminaire à un régime turbulent : la dépendance du coefficient de traînée de frottement au nombre de Reynolds (et donc à la vitesse de vol) passe de $C_{D_f} \sim Re^{-\frac{1}{2}}$ en régime laminaire à $C_{D_f} \sim Re^{-\frac{1}{5}}$ en régime turbulent. Compte-tenu des Reynolds rencontrés sur un avion de l'ordre du million ($Re \sim 10^6 - 10^8$), l'écoulement y est en général turbulent et le frottement contribue pour environ la moitié de la traînée totale.

Le nombre de Mach, défini comme le rapport $M = V/a$ entre la vitesse de vol V et la vitesse du son dans l'air a , pilote le régime d'écoulement : le régime subsonique correspond à des nombres de Mach sous l'unité ($M < 1$) alors que le régime supersonique est atteint pour des nombres de Mach supérieurs à 1 ($M > 1$). En régime supersonique des phénomènes irréversibles spécifiques (zones supersoniques, ondes de choc) sont à l'origine d'une composante additionnelle appelée traînée de compressibilité (ou traînée d'onde). Les avions de ligne actuels volent en régime subsonique et la forme de leurs ailes a été conçue pour minimiser cette composante de la traînée via l'introduction des profils supercritiques et d'un angle de flèche. Elle ne compte que pour 1 % à 2 % de la traînée totale.

La traînée induite est l'autre composante principale comptant pour près de la moitié de la traînée totale d'un avion. Elle résulte de la génération de portance sur une aile d'envergure finie où le contournement de l'air en bout d'aile due à la différence de pression entre l'intrados et l'extrados induit l'apparition de tourbillons de sillage (ou tourbillons marginaux) contra-rotatifs. Ces tourbillons induisent un mouvement vertical descendant au niveau de l'aile qui réduit l'incidence locale vue par le profil de l'aile, ce qui résulte en une projection non nulle de la portance locale selon la direction de la vitesse de vol, contribuant ainsi à la traînée, voir figure 4.2. Cette composante de la traînée diminue avec l'allongement de l'aile comme $C_{D_i} \sim \lambda^{-1}$.

4.3 Propulsion de l'avion

La motorisation de l'avion constitue un élément primordial du système avion puisqu'elle permet de produire la poussée nécessaire à la génération de portance tout en compensant la traînée. La majorité des motorisations équipant

a. La longueur caractéristique de l'aile est sa corde aérodynamique moyenne mais en fonction de la partie de l'aéronef que l'on considère, on pourra choisir une longueur caractéristique différente (par exemple l'envergure b pour l'avion ou le diamètre de la nacelle moteur).

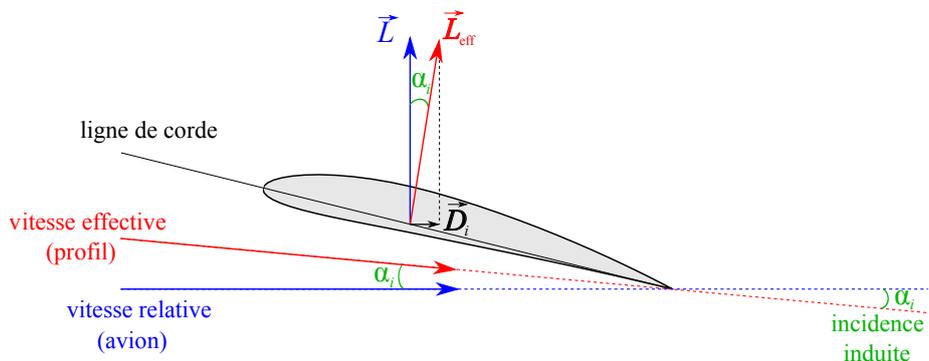


FIGURE 4.2 – La traînée induite est liée au mouvement vertical descendant (*downwash*) induit par le contournement de l’air en bout d’aile. La force de portance locale \vec{L}_{eff} n’est pas perpendiculaire à la direction de la vitesse de vol et sa projection selon cette direction donne une contribution à la traînée appelée traînée induite (*induced drag*) \vec{D}_i .

les grands avions commerciaux actuels (plus de 10 places) repose sur l’utilisation d’une turbine à gaz. Il s’agit d’une machine thermodynamique tournante composée d’un compresseur avec plusieurs étages, d’une chambre de combustion et d’une turbine également multi-étagée. L’énergie mécanique récupérée sur la turbine, obtenue via la combustion du kérosène avec l’air dans la chambre de combustion, permet d’entraîner le compresseur. L’énergie disponible restante contenue dans l’écoulement en sortie de la turbine à gaz peut alors être utilisée pour générer la force propulsive. En fonction de la manière de convertir cette énergie disponible, on distingue deux grandes familles de motorisation dont les principes de fonctionnement sont illustrés en figure 4.3 :

- les **turbofans** ou **turboréacteurs** : le fluide chaud en sortie de turbine est accéléré dans une tuyère pour générer la poussée de l’avion. On parle de turbofan simple flux. Les moteurs actuels des avions commerciaux sont dits double flux : un flux secondaire vient s’ajouter au flux primaire qui passe dans la turbine à gaz. Ce flux secondaire passe directement de la soufflante^a vers une tuyère d’éjection sans passer par la chambre de combustion pour générer une poussée additionnelle à celle produite par le flux primaire. La poussée du flux secondaire est supérieure à celle du flux primaire et sa contribution à la poussée totale augmente avec le taux de dilution, qui correspond au rapport des débits masse entre le flux secondaire et le flux primaire. Ce type d’architecture moteur permet d’améliorer l’efficacité du moteur de manière substantielle par rapport au turbofan mono-flux. Les moteurs civils les plus puissants délivrent une puissance maximale de l’ordre de 80 MW (GE90 qui équipe le Boeing 777).
- les **turbopropulseurs** : la majeure partie de l’énergie disponible est convertie en énergie mécanique à l’aide d’une turbine libre et permet, via un réducteur, la rotation d’une hélice qui génère l’essentiel de la poussée de l’avion^b. Typiquement, ce type de moteur peut délivrer une

a. La soufflante (ou *fan*), qui constitue le premier étage de compression commun aux deux flux, présente un faible taux de compression et une grande dimension. Elle est entraînée par la turbine basse-pression de la turbine à gaz.

b. La poussée résiduelle générée par le jet de sortie de la turbine à gaz ne contribue que

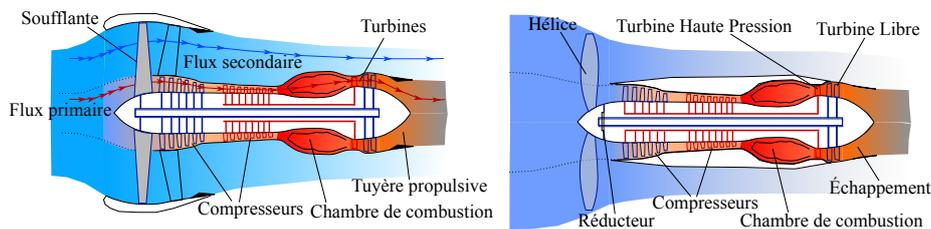


FIGURE 4.3 – (gauche) Schéma en coupe présentant le principe de fonctionnement d'un turboréacteur à double flux. En sortie du moteur, le flux primaire est repéré par la flèche rouge tandis que le flux secondaire par la flèche bleue. (droite) Schéma en coupe présentant le principe de fonctionnement d'un turbopropulseur.

puissance maximale de l'ordre de 10 MW (TP400 qui équipe l'Airbus A400M). Ce type de moteur ne permet pas d'atteindre des vitesses de vol aussi élevées que celles permises par l'utilisation d'un turbofan car la vitesse de l'écoulement en bout des pales de l'hélice ne doit pas trop dépasser la limite sonique (environ $M \sim 1,4$) sous peine de dégrader l'aérodynamique de l'hélice et donc la performance moteur. Ainsi, il est nécessaire de limiter la vitesse de rotation de l'hélice (donc la vitesse de vol) et/ou la taille de l'hélice (donc la puissance moteur et la capacité de l'avion).

La performance de ces deux familles de moteurs d'avions est mesurée par un rendement appelé rendement thermopropulsif. Ce rendement global des moteurs se décompose en un produit de deux termes : le **rendement thermique** et le **rendement propulsif**. Le rendement thermique est défini comme le rapport entre l'augmentation d'énergie cinétique de l'air traversant le moteur et l'énergie produite par la combustion du kérosène. Or l'apport d'énergie au moment de la combustion ne sert pas uniquement à accélérer l'écoulement puisque une partie contribue à l'augmentation de l'énergie interne du fluide^a, donc au réchauffement des gaz d'éjection. Ainsi, le rendement thermique mesure les pertes associées à l'énergie thermique résiduelle des gaz d'éjection. Le rendement propulsif correspond au rapport entre le travail mécanique de la force propulsive et l'énergie cinétique apportée à l'air traversant le moteur. La génération de poussée nécessite l'accélération de l'écoulement à la traversée du système propulsif ce qui résulte en une vitesse d'éjection du flux moteur supérieure à la vitesse de vol. Paradoxalement, cette énergie cinétique résiduelle perdue dans l'atmosphère constitue la seconde source de perte énergétique et est mesurée par le rendement propulsif. Au final, le rendement thermopropulsif mesure les pertes correspondant à l'énergie totale^b résiduelle des gaz d'éjection. Par exemple, le rendement global des turbofans à double flux qui équipent la plupart des avions civils actuels est aujourd'hui d'environ 25 % (rendement propulsif environ 60 % et rendement thermique environ 40 %). Quant aux turbopropulseurs, leurs rendements propulsifs sont meilleurs que ceux des turbofans, mais la vitesse et l'altitude de vol sont limitées. Un autre indicateur couramment utilisé pour

pour 10 % maximum de la force propulsive.

a. L'énergie interne (ou énergie thermique) d'un fluide correspond à l'énergie d'agitation moléculaire, mesurée par la température du fluide.

b. L'énergie totale d'un fluide est la somme de son énergie cinétique et de son énergie interne.

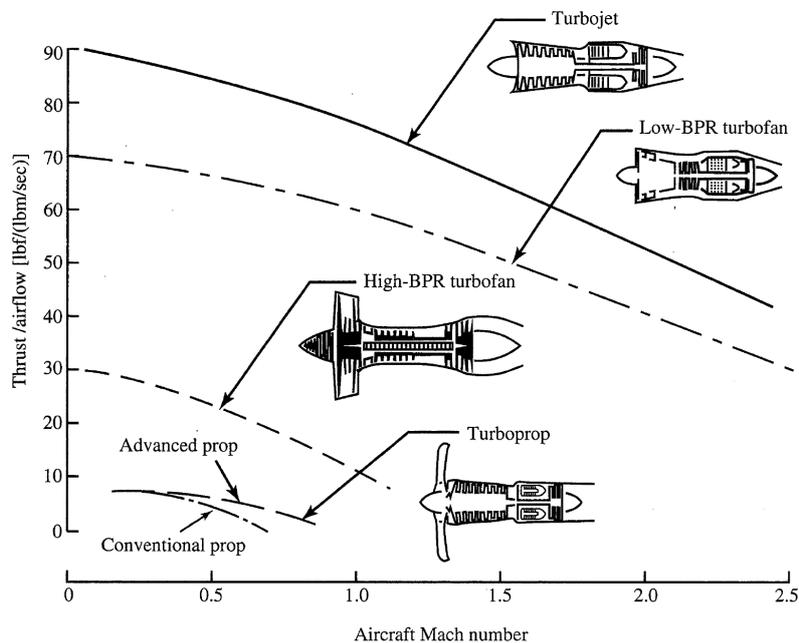


FIGURE 4.4 – Répartition des différents types de motorisation possibles pour propulser un avion en fonction de leur poussée spécifique^a et leur Mach de vol d’après la figure 1-17a de Mattingly⁴⁶.

mesurer la performance de la motorisation des avions est la **consommation spécifique** C_s . Il s’agit du rapport entre le débit carburant et la force de poussée. Elle mesure la quantité de carburant nécessaire pour produire une unité de poussée. À vitesse de vol constante, elle correspond tout simplement à l’inverse du rendement thermopropulsif.

Ces deux familles de moteurs reposent actuellement sur une turbine à gaz dont la chambre de combustion, dite isobare, fonctionne à pression constante (cycle de Brayton). Or il existe également des motorisations à hélice (*propeller*) basées sur le moteur à pistons où la chambre de combustion, dite isochore, fonctionne à volume constant (cycle de Humphrey). Le choix du type de motorisation dépend avant tout de la puissance requise, comme le montre la figure 4.4 : faible puissance avec les moteurs à pistons (faible vitesse à faible altitude), forte puissance avec les turbofans (grande vitesse à haute altitude). Historiquement, les avions ont utilisé des moteurs à pistons jusqu’au début des années 60 où le recours généralisé aux architectures turbofan et turbopropulseur a été essentiellement dicté par un besoin d’augmentation de la puissance pour embarquer un plus grand nombre de passagers par avion. Or, le passage des moteurs isochores aux moteurs isobares s’est traduit par une perte d’efficacité comme illustré à la figure 4.5. En effet, les moteurs isochores présentent une meilleure efficacité de leur cycle thermodynamique liée à la possibilité d’isoler la phase de combustion dans le fonctionnement de la turbine à gaz. Dans un moteur à combustion isobare, une grande partie du pouvoir calorifique du kérosène est perdue sous forme

a. La poussée spécifique est la poussée produite par unité de débit d’air traversant le moteur.

Long haul aircraft fuel efficiency

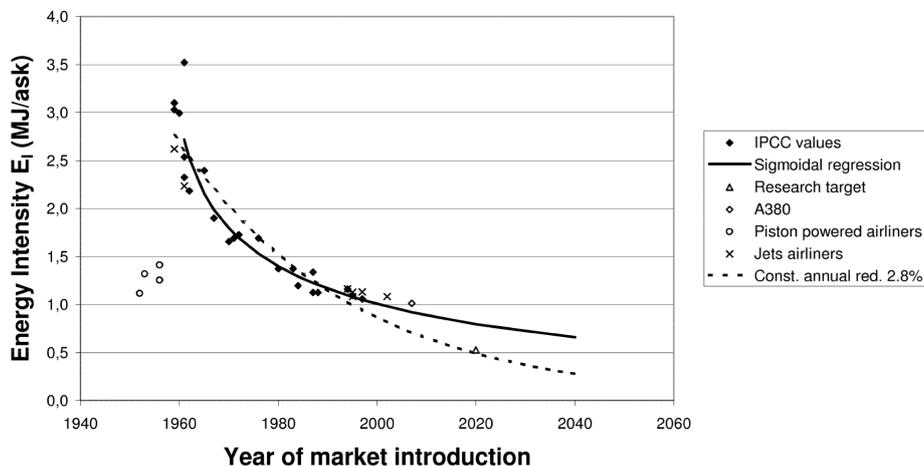


FIGURE 4.5 – Évolution de l'efficacité énergétique (mesurée en MJ/siege.km) depuis 1950 d'après Peeters et Middel⁴⁷.

de chaleur cédée à l'air qui traverse le moteur. Néanmoins, grâce à des améliorations continues, les rendements des motorisations à combustion isobare ont retrouvé ceux des moteurs à combustion isochore au début des années 2000⁴⁷. Il est également important de mentionner que les moteurs ne sont pas optimisés pour un point de fonctionnement car ils doivent opérer durant différentes phases de vol (taxi, décollage, montée, croisière et descente) caractérisées par des pressions/températures et vitesses d'entrée d'air différentes ainsi que différents niveaux de poussée. De ce fait, il faut par exemple réaliser une croisière de deux heures environ pour que la consommation de la phase croisière équilibre celle des autres phases du vol.

4.4 Les systèmes avion

4.4.1 Présentation des systèmes avion

En plus des fonctions propulsives et selon les différentes phases du vol, un avion a aussi besoin d'assurer des fonctions supplémentaires telles que la sécurité, la navigation ou les communications. Ces fonctions sont réalisées par différents systèmes qui ont besoin de puissance et d'énergie provenant des moteurs de l'avion. Ils peuvent représenter entre 5 et 10 % de la consommation totale de carburant de l'avion. Par exemple, pour un avion court-courrier, les systèmes permettant de gérer les opérations au sol représentent environ 6 % de la consommation de carburant du vol⁴⁸. Ils représentent également une masse embarquée supplémentaire et peuvent induire une traînée parasite qui dégrade les performances de l'avion. Les principaux systèmes avion sont décrits dans la suite.

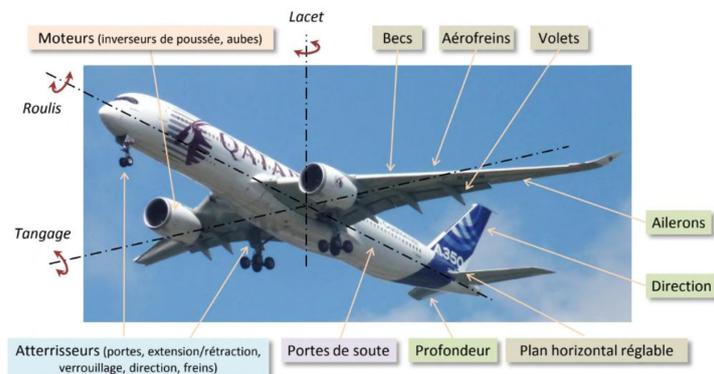


FIGURE 4.6 – Besoins en actionnement d’un avion commercial d’après Maré⁴⁹.

Commandes de vol

L’altitude de l’avion doit pouvoir être contrôlée ce qui est assuré par le système de commandes de vol. Le système de commandes de vol est lui-même composé du système de contrôle cockpit (manches, manettes, palonniers), du système avionique (calculateurs, bus), des systèmes d’actionnement et des surfaces de contrôle primaires et secondaires. Le système de commandes de vol primaires est composé des surfaces de contrôle (également appelées gouvernes) : les ailerons pour le contrôle du roulis, la gouverne de profondeur pour le tangage, la gouverne de direction pour l’équilibre en lacet ainsi que les actionneurs associés. Le système de commandes de vol secondaires est composé des surfaces de contrôle becs et volets (dispositifs hypersustentateurs) qui vont permettre lorsqu’elles sont déployées d’augmenter la portance à basse vitesse (décollage, descente et atterrissage). Il est aussi composé du plan horizontal réglable qui va assurer un bon équilibrage de l’avion durant tout le vol. Les aérofreins sont utilisés en braquage symétrique pour réduire la portance durant la phase de descente afin que cette dernière se fasse plus rapidement. Ils sont totalement déployés à l’atterrissage toujours pour réduire la portance afin de plaquer l’avion au sol et augmenter l’efficacité du freinage (par augmentation de la traînée) et ainsi réduire la distance d’atterrissage. En braquage asymétrique, les aérofreins peuvent également servir à produire du roulis en plus de contrôler la portance ce qui fait qu’en fonction des constructeurs et des modèles ils sont considérés comme des commandes de vol primaires et non secondaires. Il est possible également de considérer que le système propulsif et son système d’inverseurs de poussée (et son système d’actionnement) font partie du système de commandes de vol car une variation de poussée induit un changement d’altitude de l’avion. Les systèmes de commandes de vol utilisent majoritairement de la puissance électrique pour le cockpit et l’avionique (relativement faible) et de la puissance hydraulique pour les actionneurs qui doivent contrer les efforts aérodynamiques sur les gouvernes. Une vue d’ensemble du besoin en actionnement d’un avion commercial est donnée dans la figure 4.6.

Conditionnement d’air et protection givre

Le système de conditionnement d’air (ECS pour *Environmental Control Sys-*

tem) est un autre système majeur qui permet de maintenir un environnement viable et confortable, en terme de température et de pression dans le cockpit et dans la cabine, pour les pilotes, le personnel de bord et les passagers mais aussi de renouveler l'air (oxygène) correctement. Pour fonctionner, ce système a besoin de vannes, de compresseurs généralement alimentés par une puissance pneumatique mais aussi de ventilateurs généralement alimentés par une puissance électrique. Sur la plupart des avions actuels, la majorité de la puissance requise pour l'ECS est prélevée sur les moteurs.

Le système de dégivrage (*de-icing*) ou d'anti-givrage (*anti-icing*) est un système supplémentaire qui assure la présence d'une quantité limitée voire une absence de givre sur différentes parties de l'avion. Par exemple, le bord d'attaque de la voilure est protégé afin de ne pas dégrader sa performance aérodynamique. De même, le système est présent sur la lèvre d'entrée de la nacelle moteur pour éviter que du givre ne vienne endommager les aubes de la soufflante ou dégrader les performances aérodynamiques de l'entrée d'air. La technologie la plus répandue pour ce système est l'utilisation de l'air chaud prélevé au niveau d'un étage compresseur (puis refroidi partiellement par un échangeur et l'air prélevé au niveau du flux secondaire) qui vient chauffer le bord d'attaque. Une autre technologie à source de puissance pneumatique est l'utilisation de boudins gonflables qui fracturent la glace par déformation mécanique.

Distribution et gestion de puissance

Ensuite, une fonction importante réalisée par d'autres systèmes est la distribution et la gestion de puissance. Sur la majorité des avions il existe plusieurs systèmes de distribution de puissance hydraulique, de puissance pneumatique et de puissance électrique pour des raisons de sécurité. La puissance hydraulique et la puissance électrique peuvent être fournies par les moteurs grâce à des boîtes d'accessoires qui transforment la puissance mécanique de l'arbre du compresseur du turboréacteur via des systèmes d'engrenages eux-mêmes reliés respectivement à une pompe et à un générateur électrique. La puissance pneumatique est elle obtenue par prélèvement d'air comprimé au niveau d'un étage de compression du moteur. Au sol (et en cas de panne moteur), la génération de puissance pneumatique et électrique est assurée par le groupe auxiliaire de puissance (APU pour *Auxiliary Power Unit*) généralement situé dans la queue de l'avion ou bien en se connectant à des ground carts ou encore à l'External Power de l'aéroport. Ces différents systèmes de distribution contiennent des composants permettant la distribution de puissance (tubes hydrauliques, tubes pneumatiques, câbles électriques et connecteurs) aux différents systèmes et équipements décrits précédemment. Des composants pour la gestion de la puissance comme pour le stockage (accumulateurs et batteries) sont également nécessaires pour la garantir localement une puissance stable et disponible rapidement. Les composants actifs (alimentés) pour doser ou réguler (valves hydrauliques, vannes pneumatiques, convertisseurs de puissance électrique) sont également nécessaires pour ajuster les niveaux de puissance aux différentes charges (systèmes et équipements). Ces systèmes de distribution et leurs composants représenteront une masse additionnelle et leurs composants actifs une puissance supplémentaire à fournir.

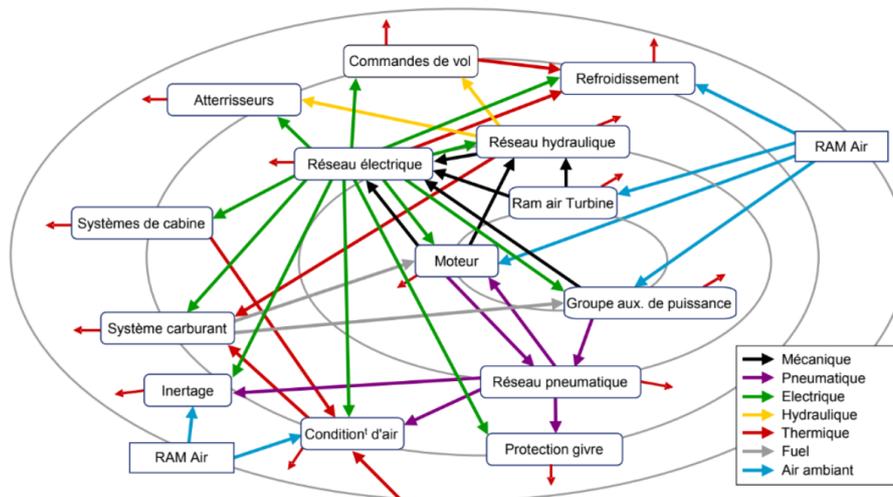


FIGURE 4.7 – Système avion et flux de puissance d'un avion commercial de type Airbus A320^{49,50}.

Autres systèmes

Enfin, d'autres systèmes peuvent être mentionnés comme les systèmes carburant qui assureront l'alimentation du turboréacteur en carburant stocké dans les réservoirs. Ils utilisent des composants et équipements comme des vannes et des pompes qui ont besoin de puissance et d'énergie pour fonctionner. Le système de train d'atterrissage, alimenté jusqu'à présent par une puissance hydraulique, permet le déploiement/rétractation des trains ainsi que l'orientation du train avant. Des systèmes de secours sont également embarqués et représentent notamment une masse morte comme l'éolienne de secours (RAT pour *Ram Air Turbine*) qui est déployée pour générer une puissance de secours en cas de panne totale de génération de puissance (turboréacteur et groupe auxiliaire de puissance) afin d'alimenter les systèmes essentiels pour atterrir en urgence comme pour le système de commandes de vol. Enfin, il est possible de mentionner les charges commerciales (four, éclairage, divertissement, connectivité) qui représentent une consommation de puissance électrique non négligeable. Les systèmes avion et les flux de puissance associés sont illustrés en figure 4.7.

4.4.2 Impact des systèmes sur la consommation

Cette section se concentre sur les systèmes non propulsifs. Pour mesurer l'impact des systèmes sur la consommation des avions il faut mesurer leur impact sur la traînée, la consommation de puissance et la masse à vide de l'avion. Le principal contributeur à la traînée est le système de conditionnement d'air qui requiert des entrées d'air comme source froide des échangeurs air/air. Concernant la masse, les systèmes correspondent à environ 14 % de la masse à vide d'un avion monocouloir, soit environ 5800 kg. Concernant la consommation de puissance, la puissance totale des systèmes est d'environ 1,2 MW pour un avion de type monocouloir, à comparer aux 20 MW de puissance nécessaire pour la propulsion, soit 5,7 % de la puissance totale. Le tableau 4.1 récapitule les masses

et les puissances des principaux systèmes avion.

Système	Puissance [kW]	Masse [kg]
Conditionnement d'air	520	950
Protection givre voilure	240	160
Protection givre nacelle	180	/
Génération et distribution (hydr.)	30	760
Génération et distribution (elec.)	50	1320
Commandes de vol	85	/
Charges commerciales	60	/
Systèmes train d'atterrissage	56	/
Systèmes carburant	15	/
Avionique	10	/

TABLEAU 4.1 – Impact des systèmes sur la consommation de puissance (max.) et sur la masse à vide pour un avion monocouloir. Les masses ne sont pas données pour tous les systèmes considérés.

L'ordre de grandeur de consommation de puissance des systèmes représente les valeurs maximales qui peuvent être générées durant les opérations de l'avion. En réalité, ces valeurs dépendent des charges appliquées sur ces systèmes comme par exemple les efforts et vitesses de déplacement pour les systèmes d'actionnement ou encore les conditions de température et de pression et flux thermiques pour le système de conditionnement d'air. Ces charges dépendent donc des conditions environnementales de l'avion (zone de turbulences et rafales, jour chaud/froid, vol de jour/nuit, etc.) car elles dictent la physique responsable des charges (frottements mécaniques, échanges thermiques, etc). Ces charges dépendent également des conditions opérationnelles de l'avion (nombre de passagers, vitesse de montée/descente, quantité de carburant au décollage, etc.), des phases de vol comme illustré à la figure 4.8 et des exigences de sécurité.

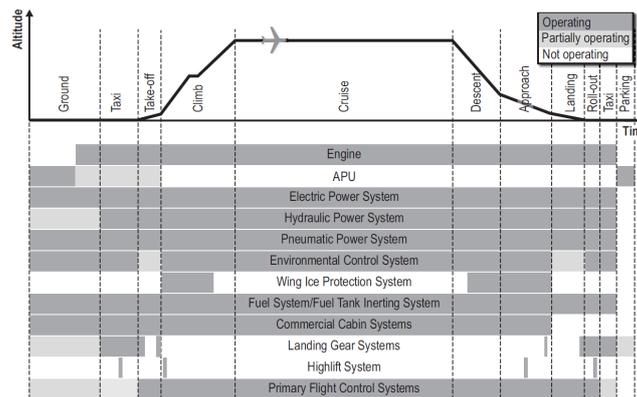


FIGURE 4.8 – Opération des systèmes avion en fonction des phases de vol sur un profil de vol standard⁵⁰.

De ce fait, la traînée et la consommation de puissance de chacun des systèmes évoluent fortement et leur traduction en terme de consommation carburant est

très complexe et directement liée aux opérations. En revanche, leurs points de fonctionnement extrêmes sont dimensionnants et peuvent permettre d'obtenir une estimation de leur masse.

4.5 Quel est l'impact de la vitesse sur la consommation d'un avion ?

Avant d'introduire plus en détail les pistes d'amélioration de la consommation énergétique d'un avion, il est intéressant d'évaluer l'influence de la vitesse de vol V sur la consommation d'un avion. Deux cas sont étudiés ici : un avion existant et un avion à concevoir. Des informations complémentaires sur l'impact de l'altitude de vol seront aussi données.

4.5.1 Cas d'un avion existant

Considérons un avion donné dont on réduit la vitesse de vol. Qualitativement, pour équilibrer son poids en volant moins vite, l'avion doit maintenir sa portance en jouant sur les termes de l'équation (4.1) :

- soit en augmentant son coefficient de portance C_L , par exemple en augmentant son incidence ou en utilisant des dispositifs hypersustentateurs tels que les volets, ce qui induira une augmentation du coefficient de traînée ;
- soit en volant à une altitude plus basse où la densité de l'air est plus élevée, ce qui entraîne une conservation du terme ρV^2 dans l'équation (4.1) et donc une conservation de la traînée.

Par conséquent, une diminution de la vitesse de vol ne peut pas induire de diminution de la traînée D et donc de la poussée nécessaire au vol. Ainsi, une diminution de la vitesse de vol n'entraîne pas de diminution de la consommation de carburant, toute chose étant égale par ailleurs^a.

Une analyse alternative consiste à considérer l'évolution des deux termes principaux de la traînée avec la vitesse de vol, comme illustré sur la figure 4.9. D'une part, la traînée de frottement augmente avec la vitesse selon une dépendance de l'ordre de $D_f \sim V^{1,8}$. D'autre part, la traînée induite diminue avec le carré de la vitesse avec en première approximation $D_i \sim V^{-2}$. Il existe donc une vitesse optimale pour laquelle l'avion a été conçu d'un point de vue aérodynamique. Ainsi, faire voler un avion existant à toute autre vitesse que sa vitesse optimale se traduit par une augmentation de sa consommation de carburant.

4.5.2 Cas d'un avion à concevoir

Néanmoins, le cas d'un avion à concevoir est différent. En effet, il est possible de réduire la consommation de carburant en volant moins vite par un changement de motorisation, *i.e.* le turbofan est remplacé par un turbopropulseur. En volant à des nombres de Mach de l'ordre de 0,6 (au lieu de 0,8), des gains d'efficacité de l'ordre de 20 % sont possibles, grâce à un meilleur rendement propulsif des turbopropulseurs. À titre d'exemple, un Bombardier CRJ700 (de 68 à 70 places, turbofan) consomme environ 51 de kérosène pour 100 pass.km,

a. Une modification de l'altitude de vol aura un impact sur la performance des moteurs.

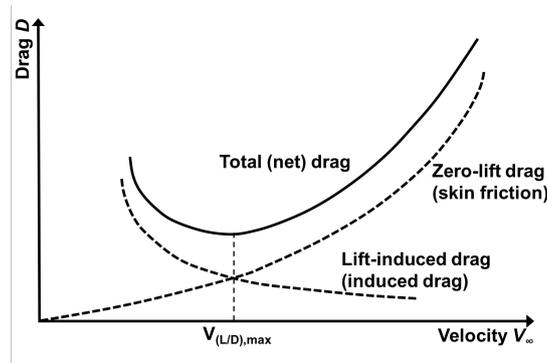


FIGURE 4.9 – Évolution de la traînée totale d’un avion en fonction de la vitesse de vol. Les deux contributions principales à la traînée totale sont représentées : la traînée de frottement (*skin friction drag*) et la traînée induite (*induced drag*). La figure est reproduite d’après^{Kir11}.

alors qu’un ATR 72 (de 68 à 78 places, turbopropulseur) consomme aux alentours de 31 pour 100 pass.km. Pour un avion existant, ce gain de consommation sera amputé par l’augmentation de la traînée résultant d’une vitesse de vol non optimale. En revanche, si ce changement de motorisation est apporté pour la conception d’un nouvel avion, le design aérodynamique de l’appareil en amont permettra de combiner ce gain avec ceux résultant d’une aérodynamique spécifiquement conçue pour ce point de vol. Néanmoins, un tel changement de motorisation s’accompagne d’une diminution de puissance qui limite la masse totale de l’aéronef et n’est donc applicable que pour des avions de petite ou moyenne capacité (typiquement de l’ordre de 100 à 150 passagers au maximum).

4.5.3 Remarques complémentaires sur l’altitude de vol

De façon complémentaire, il est intéressant de s’attarder sur l’altitude de vol d’un avion. À vitesse fixée, il existe une altitude optimale de vol pour minimiser la consommation de carburant d’un avion. Cette altitude augmente au cours du vol au fur et à mesure que l’avion s’allège en brûlant du carburant. L’altitude de vol a aussi un impact sur la performance des moteurs et sur la formation des traînées de condensation, qui se forment préférentiellement à une altitude comprise entre 7 km et 12 km.

4.6 Comment améliorer l’efficacité d’un avion ?

Pour clarifier le propos, dans ce document, la notion d’efficacité est liée à la consommation de carburant par passager-kilomètre introduite au chapitre 3. Afin d’identifier les leviers d’action permettant de réduire la consommation de carburant, il est nécessaire de préciser les phénomènes à l’origine de la consommation de carburant, qui peuvent être de deux types : ceux qui sont nécessaires à la mission de l’avion (par exemple, se sustenter) et ceux qui sont subis et qu’il convient de réduire autant que possible (par exemple la traînée).

En croisière, la performance d’un avion conventionnel peut être estimée sim-

plement grâce à l'équation (4.5) dite de Bréguet–Leduc :

$$R = \frac{V}{g} \frac{f}{C_s} \ln \left(\frac{M_i}{M_f} \right) \quad (4.5)$$

où R est la distance franchissable, V la vitesse de vol, g l'accélération de la pesanteur terrestre, C_s la consommation spécifique des moteurs, f la finesse, M_i la masse totale en début de croisière et M_f la masse totale en fin de croisière. La masse finale correspond donc à la masse initiale moins la masse de carburant M_{fuel} consommé pendant la phase de croisière, *i.e.* $M_i = M_f + M_{\text{fuel}}$. Cette formule n'est valable que pour des avions consommant du carburant et exclut donc les avions à propulsion électrique ou hybride-électrique dont la performance doit être évaluée autrement ^a. L'équation (4.5) peut être réécrite sous la forme suivante en introduisant la masse de carburant consommé pour la mission M_{fuel} :

$$M_{\text{fuel}} = M_f \left(e^{\frac{gRC_s}{fV}} - 1 \right) \quad (4.6)$$

Sous cette forme (4.6), on identifie trois leviers possibles pour améliorer l'efficacité de l'avion, c'est-à-dire pour diminuer sa consommation de carburant pour une mission donnée (à distance franchissable R fixée) :

- améliorer les performances des moteurs en diminuant la consommation spécifique C_s ;
- améliorer la performance aérodynamique de l'avion en augmentant la finesse f et dans une moindre mesure la vitesse de vol V ^b ;
- alléger l'avion en diminuant sa masse à vide (hors chargement et carburant) via le coefficient M_f .

Outre ces trois leviers, l'amélioration des systèmes avion qui pèsent sur la consommation des moteurs représente une dernière piste pour réduire significativement la consommation des avions. En effet, ces systèmes avion ont un impact sur la consommation via leur masse, leur consommation énergétique prélevée sur les moteurs ainsi que leur éventuelle traînée parasite.

Historiquement, ces trois leviers ont été considérés séparément : la consommation spécifique des moteurs concerne le motoriste, la finesse est essentiellement du ressort du concepteur de la forme avion, alors que le poids de l'avion est une responsabilité partagée par l'ensemble des acteurs (avionneurs et équipementiers). L'optimisation de la consommation de carburant de l'avion peut se faire selon deux objectifs distincts compte tenu de l'équation (4.6). Soit on cherche à diminuer la masse de carburant consommée M_{fuel} à distance franchissable R fixée, soit on veut augmenter le rayon d'action de l'appareil pour une même quantité de kérosène brûlé. Dans les deux cas, le motoriste cherchera à minimiser la consommation spécifique C_s tout en assurant la poussée nécessaire, tandis que le concepteur de l'avion cherchera surtout à minimiser la valeur du paramètre $\frac{1}{V \cdot f}$.

Les différents termes de l'équation (4.5) ne sont toutefois pas indépendants les uns des autres. Par exemple, le choix de la vitesse de vol V impose le choix du

^a. Pour un avion tout-électrique qui ne perd pas de masse, une autre équation permet de déterminer la distance franchissable, cf. par exemple Gnadt *et al.*⁵¹.

^b. La vitesse optimale de vol définie à la section 4.5 est peu dépendante d'améliorations incrémentales de l'aérodynamique, elle sera plus sensible à une rupture technologique basée sur un changement d'architecture, ce point étant discuté en section 5.6.

type de moteur (par exemple turbopropulseur ou turbofan) et donc la consommation spécifique C_s tandis que l'intégration des équipements (y compris le système propulsif) interagit avec l'aérodynamique de l'avion, modifiant la finesse de l'appareil f .

Chapitre 5

Améliorer l'efficacité des avions

Comme mentionné dans la partie introductive du document, l'aviation commerciale est responsable de la majorité des émissions de l'aviation. L'objectif de ce chapitre est de présenter les pistes d'amélioration de l'efficacité énergétique d'un avion commercial afin de réduire sa consommation de carburant. Le chapitre débute avec les principaux axes « historiques » envisagés pour poursuivre l'amélioration de l'efficacité des avions. On entend par « historiques » des améliorations incrémentales basées sur des évolutions limitées de l'architecture avion actuelle qui ne nécessitent aucune rupture technologique (moteurs, aérodynamique, structure, systèmes). Une dernière section proposant quelques pistes de ruptures technologiques complète ce chapitre.

5.1 Amélioration des moteurs

L'amélioration de l'efficacité moteur, que l'on peut mesurer par la diminution de la consommation spécifique C_s , repose sur des gains obtenus à la fois sur le rendement thermique et sur le rendement propulsif, qui rentrent tous les deux dans la définition du rendement thermopropulsif, cf. section 4.3. Un gain sur le rendement thermique passe par une amélioration de l'efficacité du cycle thermodynamique via les composants de la turbomachine (compresseur, chambre de combustion et turbine). Un gain sur le rendement propulsif consiste à diminuer l'énergie cinétique résiduelle dans le jet moteur. Les meilleurs rendements propulsifs sont atteints lorsque l'écart entre la vitesse d'éjection des gaz et la vitesse de vol est le plus faible possible : on cherche donc à générer un important débit d'air avec le minimum d'écart de vitesse par rapport à celle de l'appareil et c'est le rôle assuré par la soufflante dans les moteurs double flux. L'efficacité des moteurs existants, sans rupture technologique importante, peut encore être améliorée, notamment en augmentant le taux de dilution et la température en sortie de chambre de combustion.

Toutefois, des limites technologiques sont en passe d'être atteintes : par exemple les matériaux utilisés pour fabriquer les aubes de la turbine sont déjà très complexes (alliages de titane) mais ne suffisent pas seuls à assurer la résistance des aubes aux températures extrêmes en sortie de chambre de combustion (de l'ordre de 1800 K à 2000 K), qui dépassent la température de fusion de l'alliage métallique⁵². Il est alors nécessaire de refroidir les premiers étages de la



FIGURE 5.1 – Soufflante non carénée présentée au salon du Bourget 2017 au stand de Safran d’après [wikimedia commons](#).

turbine en sortie de chambre de combustion, en prélevant de l’air « froid » sur le compresseur, ce qui diminue le rendement de la machine⁵². Il n’est donc pas possible d’augmenter encore significativement la température en sortie de chambre de combustion, sans dégrader les performances du cycle thermodynamique. De même, l’augmentation du taux de dilution se heurte à des problèmes d’augmentation de la taille et du poids du moteur vis-à-vis de leur intégration sur l’avion.

Les concepts de moteur à très fort taux de dilution (VHBR pour *Very High Bypass Ratio* et UHBR pour *Ultra High Bypass Ratio*) reposent sur le principe d’une augmentation du taux de dilution jusqu’à 20 environ (à comparer à un taux de dilution actuel autour de 10 pour les moteurs de dernière génération de type LEAP ou Trent). Une augmentation du taux de dilution permet non seulement d’augmenter le rendement propulsif mais aussi de diminuer le bruit émis par le moteur en diminuant la vitesse d’éjection des gaz. Les gains attendus sont potentiellement de l’ordre de 5 à 10 % sur la consommation de carburant par pass.km, tout en réduisant le bruit émis de l’ordre de 7 dB, par rapport à la génération actuelle⁵³.

C’est l’augmentation du taux de dilution qui permet aux moteurs de type turbopropulseur d’être particulièrement efficaces : la soufflante (carénée) est remplacée par une hélice (non carénée), ce qui permet d’augmenter l’envergure des pales, et ainsi d’assurer un taux de dilution très important. Ainsi ces motorisations permettent de réduire d’environ 40 % la consommation de carburant par pass.km. Toutefois, la vitesse de rotation de l’hélice, combinée à la vitesse d’avancement de l’appareil, peut induire l’apparition de phénomènes compressibles intenses (notamment des ondes de chocs liées à la présence d’un écoulement local en régime supersonique), ce qui dégrade fortement les performances lorsque la vitesse ou la taille de l’avion augmentent. Ces motorisations sont ainsi limitées à des nombres de Mach de vol d’environ 0,65, donc inférieurs aux nombres de Mach de vol atteints avec un turbofan (de l’ordre de 0,85) mais aussi destinées essentiellement à propulser des avions de type court courrier d’environ 100 places maximum. Une solution pour contrebalancer cet inconvénient est d’assurer la poussée à l’aide de deux hélices contrarotatives, ce qui permet de réduire leur vitesse de rotation pour un niveau de poussée donné.

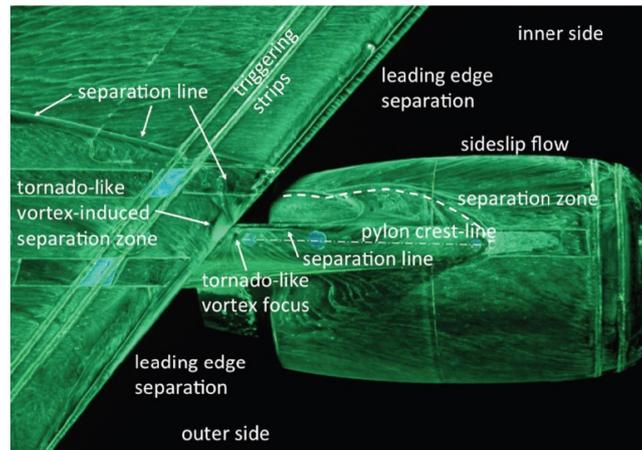


FIGURE 5.2 – Visualisation des lignes de frottement montrant la complexité de l'écoulement dans la région de l'aile en interaction avec le moteur d'après Bury *et al.*⁵⁸.

Ces architectures moteurs à soufflantes non carénées sont généralement appelées *Contra-Rotating Open Rotor* (CROR)⁵⁴, voir figure 5.1. Ce type de motorisation, dont la limite en nombre de Mach de vol est repoussée jusqu'à 0,75 environ, permet des économies de carburant par pass.km de l'ordre de 10 % à 20 % par rapport aux meilleurs turbofans actuels⁵⁵.

Bien que beaucoup plus exploratoire, il demeure aussi possible d'améliorer le cycle thermodynamique des turbofans, notamment en ayant recours à une combustion isochore, mentionnée à la section 4.3. Ces moteurs, appelés moteurs à détonation pulsée (PDE pour *Pulsating Detonation Engine*) ou moteur à détonation tournante (RDE pour *Rotating Detonation Engine*) présentent de meilleures performances que celles des moteurs isobares, que ce soit en rendement ou en puissance spécifique. Toutefois, leur fonctionnement en régime instationnaire nécessite de poursuivre les efforts en matière de recherche afin d'adapter aussi les composants à l'aval de la chambre de combustion (la turbine en particulier)⁵⁶. Malgré un fonctionnement dégradé d'une turbine en aval de ce type de chambre de combustion, des publications récentes montrent des gains de rendement thermique sur l'ensemble du cycle de l'ordre de 5 %⁵⁷.

Pour conclure, les améliorations à venir des moteurs reposent essentiellement sur une augmentation de leurs dimensions (CROR, UHBR), ce qui va encore accroître le couplage entre l'aérodynamique de l'avion, sa masse et le moteur. Il est donc nécessaire, plus que jamais, de mieux intégrer le système propulsif avec le reste de l'appareil. En outre, cette intégration motrice représente une source potentielle d'économie de carburant. La figure 5.2 montre la complexité de l'écoulement dans le cas d'une configuration de type moteur intégré sous l'aile, avec notamment la présence de décollements localisés qui augmentent la traînée de l'appareil. Une conception optimisée de l'aérodynamique de l'ensemble intégré du système aile/moteur est donc un point crucial pour réduire la consommation de carburant. L'intégration des systèmes propulsifs non plus sous la voilure mais directement sur la cellule avion fait partie des ruptures technologiques envisagées dans les prochaines décennies (voir section 5.6).



FIGURE 5.3 – Exemple de modification du bout d’aile pour réduire la traînée induite : winglet en forme spiroïdale sur un Falcon 50 d’après [wikimedia commons](#).

5.2 Amélioration de l’aérodynamique

En régime de croisière, et afin de maintenir la vitesse de vol (et donc la portance), la poussée des moteurs permet de contrer la composante de traînée des efforts aérodynamiques qui s’exercent sur l’avion. La réduction de la traînée a donc une influence directe sur la consommation de carburant au travers de l’augmentation de la finesse f dans l’équation de Bréguet–Leduc (4.6). Toutefois, des gains sur la traînée demeurent à ce jour difficiles tant l’écoulement de l’air autour d’un avion demeure complexe et difficile à prévoir.

Pour les avions de transport civil actuels qui volent en régime subsonique compressible (autour de Mach 0,8), il y a trois composantes de la traînée pour lesquelles il est encore possible d’espérer des améliorations significatives : la traînée de frottement, la traînée induite et les traînées parasites. De nombreux gains ont déjà été réalisés par le passé sur l’aérodynamique de l’avion (ce qui a permis d’améliorer la finesse f) : optimisation de la forme, allongement des ailes, meilleure conception des surfaces de contrôle, etc. Compte tenu des différentes composantes de la traînée d’un avion, les pistes pouvant encore aboutir à une amélioration significative de la performance aérodynamique sont de moins en moins nombreuses, et reposent prioritairement sur :

- la conception d’ailes fonctionnant en régime laminaire (réduction de la traînée de frottement),
- l’augmentation de l’envergure des surfaces portantes et la modification de la forme des bout d’aile (réduction de la traînée induite),
- l’optimisation de l’intégration des différents composants avion et des surfaces de contrôle pour réduire les traînées parasites liées à leur fonctionnement et à leurs interactions.

La conception de profil d’aile opérant avec un écoulement laminaire, sans changer la vitesse de l’appareil, représente un défi scientifique et technologique important⁵⁹. L’avantage d’un régime laminaire est de réduire la dépendance du frottement à la paroi vis-à-vis de la vitesse, en passant de $F \sim V^{\frac{9}{5}}$ à $F \sim V^{\frac{1}{2}}$, ce qui se traduit par une réduction de la consommation de carburant d’autant plus

importante que la vitesse considérée est grande⁶⁰. Un calcul d'ordre de grandeur montre que, pour une vitesse d'environ 250 m s^{-1} , la traînée de frottement peut être réduite de 80 % environ en régime laminaire par rapport au régime turbulent. Environ 20 % de la traînée totale provient du frottement sur les ailes de l'avion, l'avènement des voilures à laminarité étendue^a permettrait ainsi une réduction de la traînée en régime de croisière d'environ 15 % maximum. Un démonstrateur a d'ores et déjà permis de démontrer la faisabilité technique pour étendre la zone laminaire jusqu'à 50 % de la corde : le projet BLADE (*Break-through laminar aircraft demonstration in Europe*) a notamment montré une réduction de la traînée globale de 8 %, correspondant à un gain de consommation de carburant de l'ordre de 5 %, en implémentant cette technologie sur un Airbus A340-300⁶¹. Toutefois, ce résultat n'a pu être obtenu que pour un Mach de vol de 0,75, donc légèrement inférieur au Mach de vol de croisière habituel de 0,82. Un défi inhérent au passage en régime laminaire à grand nombre de Reynolds consiste aussi à pouvoir préserver cet état de l'écoulement en toutes circonstances, y compris en cas d'impact et de déformation du bord d'attaque (même de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres) par exemple provoqués par des insectes écrasés sur la voilure.

La traînée induite, qui constitue l'autre poste important de la traînée totale de l'avion, peut être réduite en modifiant la forme du bout de l'aile (winglet en forme spiroïdale par exemple⁶², comme illustré sur la figure 5.3), afin d'obtenir des réductions de la consommation de carburant de l'ordre de 5 % par rapport aux configurations sans winglet. Une augmentation de l'allongement de l'aile permet d'obtenir des gains du même ordre de grandeur⁶³, mais nécessite de mieux prendre en compte les interactions fluide/structure, notamment en raison de la souplesse de l'aile⁶⁴. Alors que la modification du bout de l'aile peut être réalisée sur un avion existant (et donc déployée rapidement à grande échelle), une modification de l'envergure des ailes nécessite de concevoir un nouvel avion (et donc repousse l'horizon temporel des gains de consommation).

5.3 Allègement des avions

De nombreuses évolutions technologiques ont pour objectif d'alléger la masse des avions (optimisation des structures, alliages composites, etc.), ce qui permet d'augmenter la distance franchissable pour une quantité de carburant donnée, comme le montre l'équation de Bréguet-Leduc (4.5). Toutefois, sans détailler ici les différentes technologies mises en œuvre, il apparaît que la taille et la masse des avions augmentent au fil des années comme illustré à la figure 5.4, ce qui contribue en général à l'amélioration de l'efficacité par pass.km. En effet, malgré l'évolution croissante de la masse totale des avions, lorsqu'elle est rapportée au nombre de sièges, on constate qu'elle tend à diminuer de manière corrélée avec la consommation de carburant, comme le montre la figure 5.5.

Une grande part de l'allègement de la structure, qui permet de concevoir ces avions de plus grandes dimensions (et donc d'augmenter le nombre de sièges) vient du remplacement des structures métalliques par des matériaux composites. Les structures aéronautiques sont réalisées par des assemblages d'un très

a. Une voilure à laminarité étendue est une aile pour laquelle la transition du régime laminaire au régime turbulent est repoussée vers le bord de fuite. La transition naturelle se produit dans les premiers pourcents de la corde, proche du bord d'attaque.

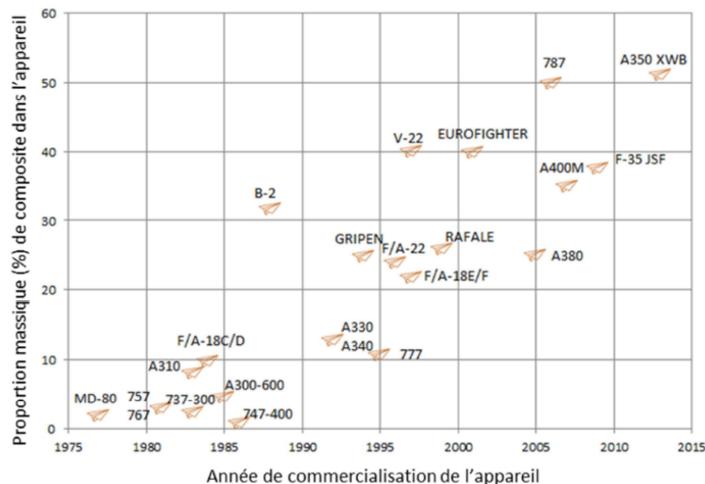


FIGURE 5.6 – Évolution de l'utilisation des matériaux composites dans l'aviation : proportion massique en fonction de l'année de mise en service de l'appareil, d'après Montagne⁶⁶. Cette figure comporte à la fois des informations sur des avions commerciaux et militaires.

pois peuvent encore être réalisés grâce en particulier aux nouveaux procédés de fabrication additive (impression 3D), qui permettent également de diminuer le recours aux matériaux métalliques (nickel, titane et aluminium). Poussée au maximum de son potentiel, la fabrication additive peut réduire d'environ 6 % la consommation de carburant par pass.km⁶⁷.

5.4 Amélioration des systèmes

5.4.1 L'électrification des systèmes avion

L'amélioration des systèmes non propulsifs passe en grande partie par leur électrification⁶⁸. Elle repose sur deux stratégies illustrées sur la figure 5.7. La première consiste à remplacer les systèmes pneumatiques par des systèmes électriques et permet à la fois une augmentation du rendement global de la turbine à gaz, une intégration physique plus facile et une maintenance simplifiée. La deuxième porte sur le concept d'avion sans hydraulique visant à remplacer les systèmes hydrauliques par des systèmes électriques.

À ce jour, seulement une électrification partielle des systèmes a été réalisée sur les dernières générations d'avions commerciaux mais la direction que prennent les acteurs est une électrification totale avec le concept de *More Electric Aircraft* (MEA). En particulier pour les gros avions, l'objectif principal est de réduire la masse totale tout en étant plus facile à intégrer et à entretenir. À titre d'exemple, le remplacement d'un des réseaux de distribution hydraulique par un réseau électrique sur l'Airbus A380 a permis un gain de masse estimé à 500 kg⁷⁰. Ce réseau électrique sert de source de puissance pour certains actionneurs de commandes de vol et le système d'actionnement d'inverseur de poussée. En outre, les systèmes électriques sont considérés comme plus respectueux

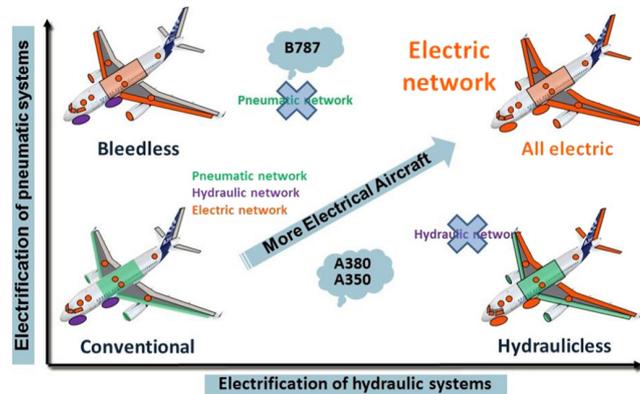


FIGURE 5.7 – Les deux stratégies de l’avion plus électrique d’après Giraud *et al.*⁶⁹.

de l’environnement que les systèmes hydrauliques en raison de l’élimination du fluide Skydrol^a. La suppression totale d’équipements hydrauliques reste un challenge en raison de leur performance et de leur facilité d’utilisation pour implémenter certaines fonctions primordiales. Par exemple, il est nécessaire de créer de l’amortissement dans le système d’actionnement de déploiement/rétraction de train d’atterrissage lorsque qu’une panne de puissance survient lors du déploiement de ce dernier afin de freiner et d’amortir le choc en fin de course (free-fall)⁴⁹. Cela se fait relativement facilement en hydraulique en connectant en parallèle une résistance hydraulique au vérin. En revanche, sur une technologie électromécanique cela passe par la création d’un frottement visqueux passif dans le moteur, ce qui est plus complexe et n’est pas encore implémenté sur des avions en service.

À ce jour, les applications des systèmes électriques couvrent toute la gamme des niveaux de maturité technologique (TRL pour *Technology Readiness Level*, un TRL de 1 correspondant au plus faible niveau de maturité et un TRL de 9 au plus fort). Pour améliorer l’efficacité des turbines à gaz, le système de prélèvement d’air (*bleed*) a été remplacé par deux compresseurs à entraînement électrique sur l’avion Boeing 787 qui est devenu le premier avion commercial *bleed-less* (sans prélèvement). Ce même avion intègre également l’électrification d’autres systèmes comme le démarrage moteur et le système de protection contre le givre. Ce dernier est constitué d’éléments de résistance électrique qui génèrent de la chaleur sous la surface du bord d’attaque de l’aile, ce qui promet une consommation d’énergie inférieure à celle des autres technologies de protection givre qui utilisent le prélèvement d’air chaud du moteur. Ces choix architecturaux conduisent à une élévation significative du niveau de puissance électrique embarquée sur l’avion (1 MW sur le Boeing 787) et donc une augmentation significative des masses des systèmes de l’ATA 24 (puissance électrique). Néanmoins, Boeing estime un gain d’environ 3 % sur la consommation globale de l’avion⁵¹⁰⁷. Des études plus globales sur l’électrification des systèmes, avec par exemple un avion entièrement électrique dont seule la propulsion est assurée par des moteurs thermiques, estiment une réduction de masse d’environ 10 % et une réduction de consommation par pass.km d’environ 9 %⁷¹.

a. Le Skydrol est un liquide hydraulique appartenant aux esters phosphatés, qui résiste au feu mais qui est connu pour être très irritant pour les tissus humains.

5.4.2 Avantages et verrous de l'électrification

Deux sérieux avantages à l'électrification sont l'augmentation des rendements des composants de transmission de puissance et peut-être avant tout un meilleur dosage de la puissance. En effet, les différents composants électriques sont généralement plus simples à instrumenter et à piloter. De ce fait, un système électrique peut quasiment fournir la juste quantité de puissance et d'énergie nécessaire pour l'application. De plus, de nouvelles architectures de systèmes de distribution électrique sont actuellement à l'étude comme les cœurs modulaires afin de mieux gérer la fluctuation et la distribution de puissance des différents systèmes durant un vol. Ces pistes de l'avion plus électrique ont fait l'objet d'études dans les programmes de recherche européens MOET (*More Open Electrical Technologies*) et POA (*Power Optimized Aircraft*) mais également français comme CORAC-GENOME (GEstioN OptiMisée de l'Énergie). La conclusion naturelle est que l'électrification a un intérêt car elle consomme moins de puissance moteur à condition que l'augmentation potentielle de masse associée n'annule pas ce gain.

Dès les années 2000, des travaux de recherche^{72,Con09} ont débuté pour lever les nombreux verrous liés à une électrification totale des systèmes. La première thématique de recherche concerne le développement de nouvelles architectures et technologies au niveau du système et de ses équipements afin qu'il fonctionne avec une source de puissance électrique. Par exemple, le développement d'actionneurs de type électro-hydrostatique (EHA) autonome en fluide hydraulique et électromécanique (EMA) fiables, légers et à grande durée de vie fait l'objet de recherches pour différentes applications comme les trains d'atterrissage ou les commandes de vol⁷³. L'électrification du système de protection givre permet également un gain de consommation comme par exemple le système anti-givre du Boeing 787 mais les gains pourraient être encore plus significatifs avec des systèmes de dégivrage électromécaniques⁷⁴. La deuxième concerne la distribution de la puissance électrique. Elle est présente depuis les débuts de l'aviation commerciale mais le passage à l'avion plus électrique conduit à l'augmentation du nombre de systèmes utilisant la puissance électrique et donc l'augmentation du niveau de puissance que doit gérer le système de distribution. Cette augmentation de la puissance nécessite le développement de composants haute-puissance fiables. Par exemple, le câblage devient un système complexe, appelé *Electrical Wiring Interconnection System* (EWIS), qui est composé de câbles, connecteurs, contacteurs entre autres et qui nécessite une approche multiphysique et intégrée pour sa conception.

Afin de maintenir un courant raisonnable, et donc aussi une masse raisonnable de composants, il est envisagé d'augmenter la tension du réseau entre 500 V et 1000 V. Néanmoins, cela favorise les phénomènes d'arc électrique et de décharge partielle notamment avec la diminution de la pression atmosphérique. L'augmentation du nombre de composants électriques et électroniques et des niveaux de puissance amplifie les phénomènes liés à la compatibilité électromagnétique (CEM). Enfin, une autre thématique générale est le développement de composants à faibles pertes et donc à haut rendement notamment en électronique de puissance avec les composants grand gap. L'objectif final est de réduire la puissance fournie par le turboréacteur et donc la consommation. Cela facilitera également la gestion thermique de ces pertes. En effet, la gestion ther-

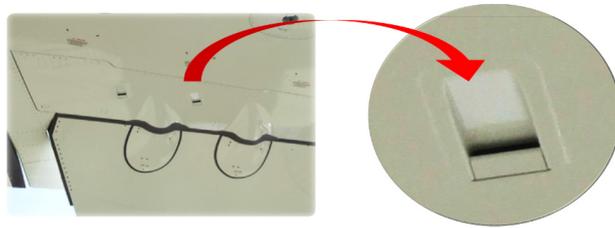


FIGURE 5.8 – Entrées d’air sous l’aile pour refroidir les actionneurs d’aileron sur un Airbus A350 d’après Maré⁷⁵.

mique est un point critique de l’électrification des avions car, contrairement à l’hydraulique ou le pneumatique, les pertes ne sont pas transportées et doivent être gérées localement. Par exemple, on peut mentionner l’utilisation d’entrées d’air pour refroidir les actionneurs électro-hydrauliques, pourtant de relativement faible puissance, sur les Airbus A380 et A350 comme le montre la figure 5.8. Par ailleurs, il est important de mentionner que le système carburant joue à ce jour un rôle crucial dans la gestion thermique du système propulsif car il fait profiter d’une grande quantité de carburant comme source de fluide froid. Le passage à un avion tout électrique, et donc la suppression de carburant et l’augmentation significative de la puissance électrique, constitue un challenge majeur en terme de gestion thermique.

5.4.3 L’électrification comme opportunité pour des opérations sol bas-carbone

Un autre axe de l’électrification concerne les opérations au sol et les infrastructures des aéroports. Les opérations au sol représentent aussi une source de dépense énergétique importante, en particulier pour les courts et moyens courrier. Une solution envisagée à court terme est de réaliser les déplacements des avions au sol (assurée actuellement par les moteurs) par des systèmes électriques embarqués (EGTS pour *Electric Green Taxiing System*). Ces moteurs électriques intégrés dans les trains d’atterrissage évitent de recourir aux moteurs (qui sont inefficaces à très faible vitesse), autorisant des économies de carburant de l’ordre de 3 % sur une mission de 1000 nm^a (moyen courrier)⁷⁶. En revanche, sur des missions où la phase de roulage est négligeable en terme d’énergie consommée par rapport au vol complet, ce système est considéré comme une masse supplémentaire trop lourde, environ 400 kg^b, et représente une complexité trop importante par rapport aux gains potentiels. De plus, positionnée sur le train d’atterrissage avant, cette masse supplémentaire pourrait avoir un impact significatif sur l’équilibrage d’un avion existant. Réaliser un roulage électrique sans augmentation de la masse à vide de l’avion est néanmoins possible avec le concept de *taxibot*, un véhicule à énergie électrique potentiellement autonome, chargé de tracter l’avion entre la porte d’embarquement et la piste⁷⁷. D’autres idées liées à l’électrification des systèmes pourraient être intéressantes comme l’utilisation

a. Le symbole nm désigne le mille nautique, une unité de longueur utilisée dans le secteur aérien qui correspond à 1852 m.

b. [Safran suspends electric jet taxiing project after Airbus ends talks](#), Reuters, 3 décembre 2019.

de l'énergie électrique de l'aéroport pour alimenter non seulement les charges commerciales, avant ou même après le démarrage des réacteurs, mais également d'autres systèmes tels que le conditionnement d'air. En effet, ce dernier est généralement alimenté (en air) par l'APU qui brûle du carburant pour fonctionner afin de réguler la température cabine et le renouvellement d'air. Ce principe serait d'autant plus intéressant que les phases d'embarquement/débarquement sont longues. Dans le même esprit mais non lié à l'électrification, il serait possible de générer de l'air conditionné directement au niveau de l'aéroport et de le distribuer à l'avion. Le gain serait le même sauf qu'il y aurait également à gagner sur la masse du système de conditionnement d'air car générer du froid lors d'un jour chaud au sol est un des points dimensionnants pour ce système.

5.5 Récapitulatifs des différentes améliorations envisageables

- On retient donc quatre pistes possibles pour améliorer l'efficacité des avions :
- la performance des moteurs (qui a produit les meilleurs résultats en terme d'efficacité jusqu'à aujourd'hui),
 - l'aérodynamique de l'avion,
 - son allègement (via l'optimisation des structures et l'utilisation de matériaux légers couplé à l'optimisation des procédés de fabrications),
 - l'amélioration des systèmes.

Quelques exemples chiffrés sont listés dans le tableau 5.1 page 86 avec leur TRL. Ils indiquent que, hors rupture technologique, les nouveaux avions produits à l'horizon 2035 pourraient consommer entre 20 et 30 % de carburant par pass.km en moins par rapport aux meilleurs avions actuels (type A320neo). En revanche, au-delà de cet horizon temporel, il est peu probable que des gains significatifs puissent encore être obtenus sans rupture technologique majeure.

Bien que n'étant pas discutée en détails dans ce rapport, il faut aussi garder à l'esprit que l'amélioration de la performance se fait sous contraintes, par exemple en limitant le bruit émis par l'avion⁷⁸ et en assurant son intégrité structurelle. Le respect de ces contraintes se fait souvent au détriment de l'amélioration de la performance aérodynamique. C'est une des difficultés à laquelle doivent faire face les avionneurs, à savoir que le gain réel de consommation d'une technologie n'est pas toujours aussi important que prévu, ce qui est par exemple dû au renforcement de la structure (ajout de masse) ou à la gestion thermique (ajout de traînée).

Enfin, pour introduire un ensemble de nouvelles améliorations technologiques, il faut lancer un nouveau programme avion. Il y a en général au moins 20 ans entre la mise en service de deux générations d'avion, à l'image des commercialisations de l'Airbus A320 en 1988 et de son remplaçant l'Airbus A320neo en 2016. Différentes raisons expliquent cette durée importante. Il faut par exemple amortir les coûts importants de développement et atteindre une maturité technologique qui permet un gain de performance d'au moins 15 %. De plus, les cycles de développement sont relativement longs dans l'industrie aéronautique, typiquement entre 5 et 7 années.

Catégorie	Concept	Année d'entrée en service	TRL	Gain de consommation carburant
Nouvelles architectures moteur	Turbofan avancé	2020	8	20 % (Trent 700)
	Ultrafan	2025	7	25 % (Trent 700)
	GE9X	2020	8	10 % (GE90-115B)
	UHBR	2025	5	5 à 10 % (LEAP)
	Open Rotor	après 2025	3	15 à 20 % (LEAP)
Concepts moteur avancés	Zero Hub Fan	2020	8	2 à 4 %
Cycle moteur	Contrôle adaptatif et actif d'écoulement	après 2020	2	10 à 20 %
	Forte utilisation de composites (2 ^e Gén.)	après 2020	3	10 à 15 %
Aérodynamique	Écoulements laminaires naturels	après 2020	8	5 à 10 %
	Écoulements laminaires hybrides	après 2020	7	10 à 15 %
	Cambrure variable avec nouvelles surfaces de contrôle	après 2020	5	5 à 10 %
	Bout d'aile spiroïde	après 2020	7	2 à 6 %
Systèmes	Systèmes de taxiing électriques	2021	8	3 %
	Pile à Combustible	2020	7	1 à 5 %

TABLEAU 5.1 – Vue d'ensemble des technologies possibles et gains espérés en termes de réduction de consommation de carburant. Pour les moteurs, les références de comparaison de la dernière colonne sont indiquées entre parenthèses. Adapté de IATA^{IAT20}.



FIGURE 5.9 – Vue du concept de *blended-wing body* proposé par Airbus dans son programme ZEROe.

5.6 Ruptures technologiques : nouvelles architectures

Les améliorations détaillées précédemment permettent de réduire la consommation des avions, mais les gains apparaissent malheureusement limités en raison de la grande maturité technologique des avions actuels. Des innovations et des ruptures technologiques restent toutefois possibles pour améliorer encore plus significativement l'efficacité des avions.

5.6.1 Modifier la forme de l'avion

Il est ainsi envisageable de changer radicalement la forme avion (pour une génération mise en service au plus tôt en 2035), par exemple en remplaçant la configuration standard *tube-and-wing*, constituée d'un fuselage, d'une aile et d'empennages, par une configuration d'aile volante (plus exactement des architectures appelées *blended-wing body* pour aile volante hybride). Contrairement à la configuration *tube-and-wing* pour laquelle le fuselage ne participe quasiment pas à la génération de portance tout en ayant une contribution significative à la traînée de l'avion, ce type de configuration permet de réaliser la portance par un élément unique de type voilure tout en réduisant substantiellement la traînée globale de la cellule avion. Au-delà des gains sur la performance aérodynamique de l'appareil, ce type d'architecture offre également des possibilités plus efficaces d'intégration motrice. Les moteurs pourraient ainsi être partiellement intégrés dans la partie centrale de l'aile volante, tel que représenté sur la figure 5.9. Cette intégration permet à la fois de réduire la traînée globale de l'ensemble (suppression de la traînée parasite du mât et réduction de la traînée de la nacelle moteur et du sillage de l'avion) mais également d'améliorer le rendement propulsif du moteur. En effet, l'écoulement en entrée du moteur aura préalablement subi un ralentissement en raison du développement de la couche limite sur l'appareil. Ce principe, appelé ingestion de couche limite (BLI pour *Boundary*

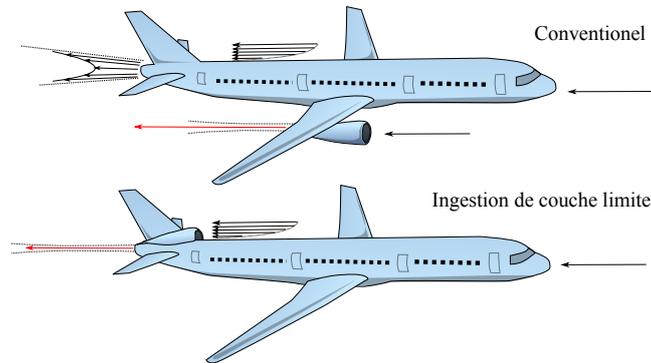


FIGURE 5.10 – Principe d’une intégration motrice avec ingestion de couche limite comparée à une intégration classique sous la voilure d’après la figure 4.1 de Binder⁸¹. Le système propulsif ré-accélère le fluide issu de la couche limite, idéalement jusqu’à la vitesse de vol de l’appareil, réalisant un gain substantiel sur le rendement propulsif et sur la traînée.

Layer Ingestion), consiste à produire de la poussée en accélérant l’écoulement fluide depuis une vitesse plus faible que la vitesse de vol. La vitesse de l’écoulement en sortie du moteur aura donc une énergie cinétique résiduelle plus faible que dans le cas d’une architecture motrice conventionnelle positionnée sous la voilure, ce qui améliore fortement le rendement propulsif et réduit la traînée de l’avion, comme illustré à la figure 5.10. L’ingestion de couche limite induit cependant une forte distorsion en entrée du moteur qui impacte la performance du cycle mais n’obère pas le gain potentiel de réduction sur la consommation de carburant estimé entre 3 % et 4 %⁷⁹. Cette intégration motrice n’est pas conditionnée à une architecture de type aile volante et peut très bien être mise en place sur une configuration standard *tube-and-wing*. Enfin, l’architecture aile volante permet, pour un nombre de passagers donné, de réduire la masse de l’avion au décollage d’environ 15 % et d’augmenter sa finesse de 20 %⁸⁰. Bien qu’il s’agisse d’un concept dont l’efficacité est encore à l’étude, une amélioration de l’efficacité énergétique globale d’environ 25 % par rapport à un avion de la génération actuelle type B777 semble possible⁴⁵. En outre, avec la nécessité d’augmenter les dimensions du réservoir, comme cela serait le cas avec un combustible à base d’hydrogène liquide à la place du kérosène, il faut souligner que la forme de l’appareil offre une plus grande souplesse pour répartir la masse de combustible qu’une architecture conventionnelle.

5.6.2 Modifier la propulsion de l’avion

Une autre piste de rupture est la propulsion hybride-électrique. Les deux principaux avantages recherchés sont un meilleur rendement global de la chaîne propulsive et une meilleure gestion de l’énergie. Cela permet d’imaginer un grand nombre d’architectures dont quelques exemples principaux sont donnés sur la figure 5.11. Dans tous les cas, les densités de puissance des éléments de la chaîne électrique (moteur, convertisseurs, câblage, . . .) sont cruciales pour la viabilité de chacune des solutions sur la distance franchissable visée car pouvant fortement augmenter la masse à vide de l’avion. De même, les faibles densités énergétiques

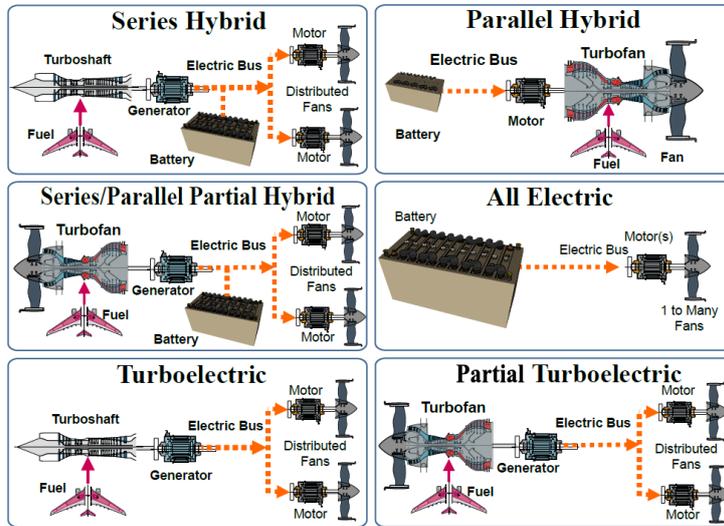


FIGURE 5.11 – Architectures propulsives hybrides-électriques.^{83, Fel15}

par unité de masse constituent des verrous pour la faisabilité des solutions. Par exemple pour un avion monocouloir de 150 passagers tout-électrique (batteries), d'après Epstein⁸², avec des densités de puissance de 12 kW kg^{-1} pour les composants de la chaîne électrique (*e.g.* 5 kW kg^{-1} pour un moteur électrique en 2020), il faudrait associer des densités d'énergie pour les batteries de 1500 Wh kg^{-1} (à comparer avec les 200 Wh kg^{-1} à 250 Wh kg^{-1} pour une cellule de batterie lithium-ion en 2020) afin d'atteindre une distance franchissable de 1000 km. Des architectures hybrides-électriques, utilisant du carburant, seraient donc plus pertinentes pour cette catégorie d'avions laissant l'architecture tout-électrique pour les plus petits avions.

Le passage à des propulseurs électriques permet d'envisager des intégrations propulsives de rupture comme l'ingestion de couche limite et la propulsion distribuée. La propulsion distribuée peut, comme l'ingestion de couche limite, améliorer le rendement aéropulsif par effet de soufflage ou d'aspiration en fonction de la position du propulseur. Ce concept permet également d'implémenter des fonctions de contrôle telle que la poussée différentielle (*e.g.* contrôle en lacet) et ainsi réduire la taille des surfaces de contrôle (*e.g.* dérive) et donc la traînée de l'avion.

Un autre potentiel à l'utilisation de source d'énergie électrique et de propulseur à source de puissance électrique réside dans la potentielle récupération de l'énergie lors de la phase de descente et de freinage. Si l'énergie du freinage reste marginale par rapport à l'énergie consommée durant le vol, l'énergie que l'on pourrait récupérer durant la descente pourrait représenter 4 % à 15 % de l'énergie potentielle de pesanteur récupérable pour un avion de type régional en fonction de la durée de la descente et du degré d'utilisation de l'hélice comme génératrice⁸³. Cependant, cette énergie récupérée par l'utilisation de l'hélice comme génératrice durant la phase de descente serait moins intéressante au global comparée à une hélice qui fonctionne seulement pour compenser sa propre traînée. En effet, l'augmentation de la distance de croisière due à ce mode de

fonctionnement rend la solution moins intéressante⁸³.

Néanmoins, il est important de noter que les difficultés (*e.g.* gestion thermique) liées à l'augmentation de la puissance électrique embarquée décrites dans la section 5.4 seront encore plus importantes du fait que la puissance du système propulsif est presque que 20 fois supérieure à celle des systèmes non propulsifs. C'est pourquoi des chaînes propulsives cryogéniques et des composants supraconductifs⁸⁴ sont également envisagés à plus long terme.

5.6.3 Bilan sur les ruptures technologiques

À ce stade, il demeure des verrous technologiques importants à lever pour permettre de remplacer les architectures conventionnelles par de nouvelles architectures de rupture. Il faut notamment repenser complètement la conception de l'appareil, ce qui inclut le processus de certification. Au-delà des défis technologiques, l'avènement de ces nouvelles architectures basées sur des synergies potentielles entre les différents sous-systèmes (cellule avion, motorisation et systèmes avion) se heurte également à la structuration actuelle du tissu industriel où la séparation franche des compétences (motoriste, avionneur, systémier) n'est pas adaptée à une conception amont fortement couplée. Ces potentielles synergies soulignent l'importance de développer des méthodes et des outils de conception multidisciplinaire et intégrée.

Chapitre 6

Décarboner le carburant

Trois pistes sont actuellement envisagées pour décarboner les carburants de l'aviation, *i.e.* remplacer le carburant d'origine fossile par des sources d'énergie moins émettrices de CO_2 : l'électricité, l'hydrogène et les carburants de synthèse. Il est important de souligner qu'il s'agit de vecteurs et non de sources énergétiques. Il faut donc tout d'abord les produire, ce qui peut engendrer des pertes de rendement et donc des besoins accrus en énergie primaire, ainsi que des émissions supplémentaires de CO_2 si les méthodes de production ne sont pas suffisamment décarbonées. Ces vecteurs sont discutés dans les sections 6.1, 6.2 et 6.3 et une rapide discussion de leurs potentiels et limites est menée dans la partie 6.4. Ces sections sont organisées par **type de vecteur énergétique embarqué** dans l'avion, et non par motorisation : ainsi, on différenciera l'électricité (section 6.1) et l'hydrogène (section 6.2) même si l'hydrogène peut être utilisé dans une pile à combustible pour alimenter un moteur électrique. Les systèmes propulsifs électriques (ainsi que des solutions d'hybridation) ont été discutés dans la partie 5.6 et l'on se concentre ici sur les vecteurs énergétiques.

6.1 L'électricité

On s'intéresse à un avion tout électrique qui embarquerait l'intégralité de son énergie sous forme électrique stockée dans des batteries^a. Il s'agit donc d'un avion à propulsion électrique comme ceux étudiés dans la section 5.6 où les avantages et limites de la partie chaîne propulsive ont été discutés. La différence tient dans les batteries électriques dont les spécificités sont discutées ici.

L'intérêt climatique d'un avion tout-électrique est que l'avion n'a aucune émission pendant le vol : puisqu'aucun kérosène n'est brûlé, les émissions de CO_2 , de NO_x , de vapeur d'eau et de particules fines sont totalement supprimées, ne causant ainsi aucun impact climatique pendant le vol. Les émissions

a. Une autre possibilité est d'embarquer des panneaux photovoltaïques qui génèrent l'électricité en vol comme l'avion Solar Impulse de Bertrand Piccard. Si cet avion solaire a connu une forte notoriété médiatique lors de son tour du monde, cette solution n'est pas envisageable à l'échelle commerciale et sort donc du cadre de ce rapport. En effet, si l'on utilisait la technologie de l'avion HB-SIB qui a fait le tour du monde, il faudrait plus de $14\,000\text{ m}^2$ de panneaux photovoltaïques pour faire voler un petit avion régional, ce qui représente la superficie de presque deux terrains de football.

potentielles se situent donc pendant la phase de production de l'électricité et dépendent de l'efficacité énergétique de l'avion (qui dicte la quantité d'électricité à produire) ainsi que du facteur d'émission du mix électrique. Ce facteur dépend fortement du lieu considéré. Par exemple, l'intensité carbone de l'électricité vaut 132 gCO₂-eq/MJ au niveau mondial et 9,9 gCO₂-eq/MJ en France où l'électricité est produite majoritairement par de l'énergie nucléaire bas-carbone (cf. section 1.4).

Densité d'énergie massique

L'impact des batteries sur l'efficacité énergétique réside principalement dans l'augmentation de la masse de l'appareil induite par la densité d'énergie massique des batteries qui est plus faible que celle du kérosène. En effet, la densité énergétique des meilleures batteries actuelles est inférieure à 1 MJ kg⁻¹^{NAS16,85} alors que celle du kérosène vaut 43 MJ kg⁻¹, ce qui implique que stocker une même quantité d'énergie nécessite une masse 43 fois supérieure. L'impact global sur la masse d'énergie embarquée sous forme de batterie dépend d'autres facteurs comme le rendement de la chaîne de puissance ou la masse de l'avion, cf. ci-dessous pour plus de détails. La densité énergétique des batteries est donc actuellement la limite qui détermine la taille (nombre passagers) et la distance franchissable d'un avion. Les avions tout électriques sont aujourd'hui envisagés pour l'aviation légère : avec une densité de 0,92 MJ/kg, Eviation prévoit de mettre en service en 2022 un avion tout électrique, Alice, qui transportera 9 passagers sur 1000 km^a. Sous une hypothèse de densité énergétique de 2,9 MJ/kg, une étude récente menée par Gnadt *et al.*⁵¹ estime que des avions tout électriques permettant de franchir une distance de 900 km avec 180 passagers serait possible. Néanmoins, les prévisions actuelles sont que des densités de l'ordre de 1,5 MJ/kg à 2,2 MJ/kg seront peut-être atteignables dans une dizaine d'années^{82,86}, ce qui correspond à des densités qui permettraient de réaliser des avions court-courrier permettant de franchir des distances de l'ordre de 500 km⁸². Des ingénieurs de la NASA⁸⁷ concluent quant à eux qu'un « grand avion transsonique » tout électrique ne pourra pas entrer en service avant 2045.

Impact climatique

Même avec des densités massiques très élevées de 2,6 MJ kg⁻¹, l'avion court-courrier (800 km, 180 passagers) tout électrique considéré par Gnadt *et al.*⁵¹ serait significativement plus lourd que son équivalent conventionnel, avec une masse maximale au décollage de 109,5 t au lieu de 42 t. Malgré le gain d'efficacité de la chaîne électrique, cette masse plus importante se traduit par un besoin énergétique accru : ainsi, cet avion électrique doit embarquer 103 GJ d'énergie quand son équivalent conventionnel ne nécessite que 65 GJ^b.

Par ailleurs, l'intensité carbone de l'électricité vaut 132 gCO₂-eq/MJ au niveau mondial, alors que la combustion du kérosène émet 88 gCO₂-eq/MJ (en

a. [Alice specification](#), consulté le 8 mars 2021.

b. L'exemple du Cessna Caravan illustre cette diminution de l'efficacité énergétique. En 2020, un Cessna Caravan entièrement électrique a fait un vol de trente minutes. Il est envisagé que cet avion puisse faire 160 km avec 4 à 5 passagers à bord, quand l'avion original à motorisation thermique peut faire jusqu'à 1980 km avec 10 à 14 passagers. Sources : [First Flight of MagniX eCaravan Showcases Maturity of Electric Aviation](#), Aviation Today, 29 mai 2020 et [Cessna Caravan](#), Cessna, consulté le 10 mars 2021.

Paramètre	Unité	Valeur
Densité massique	MJ kg ⁻¹	min 42,8
Densité volumique	g l ⁻¹	775–840
Densité volumique	MJ l ⁻¹	min 33,2

TABLEAU 6.1 – Valeurs récapitulatives du kérosène, spécifications du jet fuel A-1 par la norme ASTM D 156. La densité volumique est donnée à 15 °C : la valeur en g l⁻¹ est spécifiée par la norme ASTM D 156, la valeur en MJ l⁻¹ est obtenue par calcul à partir des valeurs précédentes.

incluant les émissions liées à la production). Pour que l’avion tout électrique de Gnadt *et al.* devienne intéressant d’un point de vue climatique, il faut attendre au moins jusqu’à 2045 dans les scénarios volontaristes pour que l’intensité carbone du mix électrique mondial soit suffisamment basse⁵¹. L’aviation électrique n’a donc de sens que si l’on développe parallèlement une électricité décarbonée. Par ailleurs, si l’on considère uniquement le segment court-courrier (800 km) qui ne représente que 5 % des émissions de CO₂ de l’aviation commerciale^{GZR19}, on peut donc penser que les avions tout électriques n’auront qu’un impact marginal sur la baisse des émissions de l’aviation commerciale.

Pour conclure, un point de vigilance concerne la durée de vie des batteries. En effet, leur utilisation intensive, à comparer à celle d’une voiture par exemple, pourrait nécessiter un remplacement fréquent, ce qui pourrait avoir un impact significatif sur l’analyse en cycle de vie d’un avion, notamment à cause de l’activité minière engendrée par l’extraction des terres rares nécessaires à la fabrication de la plupart des batteries actuelles.

6.2 L’hydrogène

Généralités

L’avion à hydrogène est la solution mise en avant par Airbus via son plan ZEROe^a et soutenue en 2020 par le plan de relance gouvernemental^b. D’un point de vue historique, il s’agit d’une solution technique qui a été envisagée dès les années 1950 dans le cadre d’un projet militaire américain (projet Suntan). La NASA a exploré en profondeur le concept dans les années 1970, alors que du côté soviétique un premier prototype d’avion à propulsion à hydrogène a volé en 1988 (le Tupolev 155).

L’hydrogène (terme générique qui désigne en fait le dihydrogène H₂) est un vecteur énergétique intéressant car il a une densité massique d’énergie trois fois plus élevée que le kérosène (cf. les tableaux 6.1 et 6.2). Ainsi, 1 kg d’hydrogène contient autant d’énergie que 3,3 kg de kérosène, ce qui veut dire qu’il faut embarquer une masse de carburant trois fois plus faible pour fournir la même quantité d’énergie. Au vu des discussions précédentes sur l’avion tout électrique et le problème majeur de la masse des batteries, cet avantage est primordial.

a. ZEROe – Towards the world’s first zero-emission commercial aircraft, Airbus, consulté le 3 mars 2021.

b. Présentation du plan de soutien à l’aéronautique, Ministère de l’Économie, des Finances et de la Relance, 12 juin 2020.

Paramètre	Unité	Valeur
Densité massique	MJ kg ⁻¹	119,96
Densité volumique (1 bar)	MJ l ⁻¹	0,01
Densité volumique (350 bar)	MJ l ⁻¹	2,9
Densité volumique (700 bar)	MJ l ⁻¹	4,8
Densité volumique (liquide, -253 °C)	MJ l ⁻¹	8,5

TABLEAU 6.2 – Valeurs récapitulatives de l’hydrogène. La densité volumique est obtenue en considérant la densité massique indiquée.

Néanmoins, la densité volumique d’énergie de l’hydrogène est quatre fois plus faible que celle du kérosène. Pour une quantité d’énergie donnée, il faut un volume quatre fois plus important pour la stocker sous forme d’hydrogène liquide que sous forme de kérosène, ce qui nécessite de revoir l’architecture des avions pour embarquer des réservoirs plus volumineux. Soit le volume utile sera moins important, soit l’architecture sera moins efficace d’un point de vue aérodynamique mais dans les deux cas, cela diminue l’efficacité. L’hydrogène peut aussi être utilisé sous forme gazeuse mais les problèmes de volume sont accentués : même à 700 bar, pression colossale qui nécessite des réservoirs extrêmement lourds pour y résister, la densité de l’hydrogène est presque deux fois plus faible que sous forme liquide. L’hydrogène doit donc être embarqué sous forme liquide, ce qui nécessite de le maintenir à -253 °C dans des réservoirs cryogéniques plus lourds que les réservoirs à kérosène.

Pile à combustible ou turbine à combustion

L’hydrogène liquide embarqué peut alors être utilisé de deux manières distinctes. La première, via une pile à combustible qui réalise la réaction inverse de l’électrolyse de l’eau et produit de l’électricité à partir de l’hydrogène stocké et de l’oxygène de l’air. Dans ce cas, on perd en rendement à cause de la phase inverse de l’électrolyse, mais cette perte est compensée par l’utilisation d’un moteur électrique au rendement élevé (cf. section 6.1). Cette solution est limitée par la densité de puissance massique des piles à combustible.

La seconde manière d’utiliser l’hydrogène est de le brûler dans une turbine à gaz. Cette solution nécessite une modification des moteurs actuels, par exemple l’ajout d’un échangeur thermique afin de réchauffer l’hydrogène liquide ou encore un régulateur de flux pour réduire le débit massique de carburant pour une même poussée moteur (pour compenser la densité massique d’énergie plus élevée de l’hydrogène). Enfin, ces deux solutions peuvent être combinées dans une propulsion hybride. Par exemple, l’hydrogène pourrait être utilisé pour le décollage dans des turbines à combustion à même de fournir la puissance nécessaire, puis dans une pile à combustible pour le reste du vol.

Impact sur l’efficacité énergétique

L’utilisation de l’hydrogène implique donc une diminution de la masse de carburant embarqué et un meilleur rendement dans le cas des piles à combustible, mais ces avantages sont potentiellement contre-balançés par une augmentation de la masse des réservoirs (et éventuellement de la motorisation dans le cas d’une pile à combustible), un volume utile plus faible (ou alors une efficacité aérody-

Source	Type	Court-courrier	Moyen-courrier	Long-courrier
Clean Sky ^{McK20}	P/T/H	-4 %	+22 %	+42 %
Verstraete ⁸⁸	T	+18 %	+5 %	-12 %
Renewables in transport 2050 ^{SZWR16}	P	-10 %	-10 %	-10 %
CRYOPLANE ^{Gmb03}	T	+14 à +18 %	+10 %	+9 à +14 %

TABLEAU 6.3 – Différentes estimations de l’efficacité énergétique d’un avion à hydrogène par rapport à un avion conventionnel. Lecture : selon l’étude Clean Sky, un avion long-courrier à hydrogène consommerait 42 % d’énergie en plus qu’un avion long-courrier conventionnel. La deuxième colonne indique le type d’avion à hydrogène considéré dans l’étude : turbine à gaz (T), pile à combustible (P) ou hybride (H).

namique réduite) et des problématiques de gestion thermique. La consommation énergétique finale dépend aussi de la manière dont l’hydrogène est utilisé : dans une pile à combustible, une turbine à gaz ou bien de manière hybride. Ces différents facteurs font que les prévisions de l’impact sur l’efficacité énergétique des futurs avions à hydrogène divergent fortement d’une source à l’autre comme on peut le voir sur le tableau 6.3. L’étude de 2020 de Clean Sky^{McK20} indique que l’efficacité par rapport à un avion conventionnel se détériore avec la distance, ce que l’on peut attribuer à la diminution de l’efficacité aérodynamique, alors que l’article de Verstraete de 2015⁸⁸ conclut à l’inverse que l’efficacité s’améliore avec la distance, notamment dû au gain de poids. Ces divergences peuvent être dues à plusieurs raisons, comme l’architecture retenue (par exemple l’emplacement du réservoir) ou encore les missions considérées. Des travaux sont encore nécessaires pour confirmer et affiner les résultats.

Impact climatique

Au-delà de ces aspects énergétiques, une filière décarbonée de production de l’hydrogène reste à développer. En effet, à l’heure actuelle plus de 95 % de l’hydrogène produit au niveau mondial l’est à partir d’énergie fossile, principalement par vaporeformage du méthane. Il s’agit d’une production extrêmement carbonée qui engendre plus de 12 kg de CO₂ par kilogramme d’hydrogène produit⁸⁹ : il s’agit d’un index d’émission très important comme l’illustreront les calculs effectués dans la section 6.4. Néanmoins, on peut aussi produire de l’hydrogène par électrolyse de l’eau : cela nécessite de l’électricité qui, si elle est produite de manière décarbonée, peut permettre de produire de l’hydrogène bas-carbone. Comme pour l’aviation électrique discutée dans la section 6.1, une aviation basée sur l’hydrogène n’a de sens que si l’on développe en parallèle une production d’électricité décarbonée.

En dehors de la production de l’hydrogène, l’avion à hydrogène peut générer des impacts climatiques durant la phase d’usage. Dans le cas d’une pile à combustible, qu’il faut aussi produire, cette dernière ne génère que de l’eau et son impact climatique dépend des conditions dans lesquelles elle est rejetée. Le cas de l’hydrogène utilisé dans une turbine à gaz est différent. La combustion de l’hydrogène continue à générer des NO_x ainsi que de l’eau mais les autres émissions (CO₂, SO_x, suie) sont supprimées. Les émissions en eau sont plus

importantes ce qui favorise la formation de traînées, néanmoins les cirrus éventuellement induits ont des propriétés microphysiques et optiques différentes qui diminueraient le forçage radiatif par rapport aux cirrus induits par les traînées des moteurs thermiques. Prenant en compte ces deux effets, Ponater *et al.*⁹⁰ concluent à une diminution de l'effet du forçage radiatif de l'ordre de 20 %, *i.e.* l'impact climatique des traînées de condensation d'un avion à hydrogène est de l'ordre de 20 % plus faible que celui d'un avion conventionnel. Ils étudient aussi des scénarios de transition vers une flotte d'avions à hydrogène avec des mises en service progressives d'avions à hydrogène à partir de 2015–2020, et aboutissent à la conclusion d'une réduction de l'impact climatique à horizon 2050 entre 15 et 50 % dans un contexte de hausse du trafic. En regard de cette hypothèse sur la date de mise en service, il est intéressant de noter qu'Airbus dans son plan ZEROe et Clean Sky dans son dernier rapport prévoient des mises en service entre 2030 et 2040.

Autres aspects

Enfin, bien que nous n'abordions pas cette question, la sécurité est un enjeu important pour l'hydrogène, notamment en raison des risques de fuite, d'inflammabilité et de détonation. L'élaboration des règlements de sécurité et des standards, déjà débutée à l'Organisation européenne pour l'équipement de l'aviation civile (EUROCAE), sera alors un processus nécessairement long et complexe. De la même façon, des enjeux existent aussi sur le ravitaillement, le stockage (potentiellement cryogénique) et la distribution au sol (nécessitant des infrastructures) de l'hydrogène.

6.3 Les carburants de synthèse

6.3.1 Généralités

Le kérosène utilisé dans les avions est obtenu par raffinage du pétrole brut qui vient directement des réserves géologiques. Le kérosène le plus utilisé dans l'aviation, le jet fuel A-1, est un mélange de plusieurs composés chimiques appelés hydrocarbures. Un hydrocarbure est un composé organique constitué exclusivement d'atomes de carbone et d'hydrogène qui forment une chaîne (éventuellement avec des cycles et/ou des liaisons doubles) de formule chimique générique C_nH_m où n est appelé le nombre de carbones. Plus de 70 % de la masse du jet fuel A-1 est composée d'hydrocarbures constitués uniquement de liaisons simples^a avec un nombre n de carbones compris entre 9 et 16^{RFL+17} . Sur les 30 % restants, au plus 25 % est constitué d'aromatiques.

Plusieurs voies de production permettent de produire des hydrocarbures à partir de sources de carbone et d'hydrogène, dont les principales sont représentées sur la figure 6.1. Si ces voies de production sont suffisamment décarbonées, elles permettent alors de réduire les effets CO_2 de l'aviation. La figure 6.2 correspond à une compilation bibliographique sur les facteurs d'émissions des différents carburants de synthèse pour l'aviation que nous allons introduire par

a. Il s'agit donc soit d'alcane, de formule chimique C_nH_{2n} et qui n'ont pas de cycle, soit de cycloalcanes, de formule chimique C_nH_{2n+2} et qui ont un cycle.

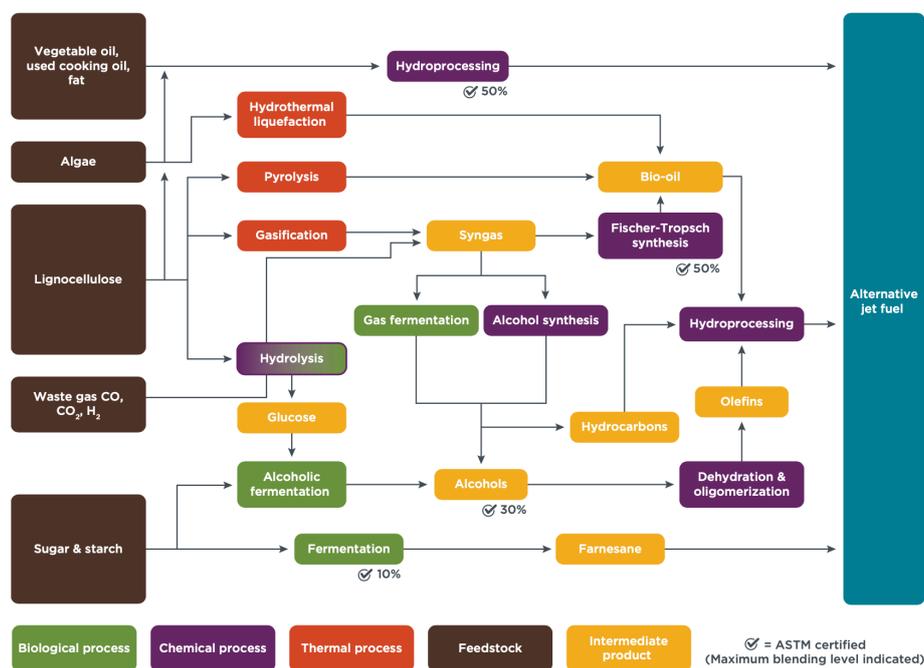


FIGURE 6.1 – Principales voies de production de carburants de synthèse en fonction de leur matière première. Les biocarburants de première génération sont produits à partir d’huiles, de sucre et d’amidon ; les biocarburants de deuxième génération à partir de lignocellulose ; les biocarburants de troisième génération à partir d’algues ; et les électrocarburants à partir de CO₂ et d’hydrogène. D’après la figure 2 de El Takriti *et al.* OPS21.

la suite. Par ailleurs, les biocarburants émettent moins de particules non volatiles⁹¹, ce qui, selon des résultats préliminaires récents, semble réduire la formation de traînées de condensation et donc les effets non-CO₂. Les kérosènes de synthèse sont donc aussi envisagés pour lutter contre les effets non-CO₂, cf. section 7.1.2 pour plus de détails.

Par ailleurs, la composition chimique du kérosène de synthèse étant très proche de celle du kérosène d’origine fossile, le kérosène de synthèse peut être utilisé, éventuellement mélangé à du kérosène conventionnel, dans les avions actuels : on parle de carburant *drop-in*. Il s’agit d’un avantage considérable par rapport aux autres solutions de décarbonation présentées précédemment (électricité et hydrogène) qui nécessitent d’importants développements technologiques qui retardent d’autant l’adoption de ces solutions. Néanmoins, à ce jour, la réglementation impose encore que ces carburants de synthèse soient mélangés avec du kérosène d’origine fossile, le taux d’incorporation représentant la part de kérosène de synthèse dans le kérosène final. Huit voies de production de kérosène de synthèse sont aujourd’hui certifiées par ASTM International, l’organisme de standardisation qui certifie notamment les carburants pour l’aviation^a : cinq voies de production permettent de produire un carburant de synthèse avec un taux d’incorporation maximal de 50 %, deux voies avec un taux d’incorporation

a. [Conversion processes](#), OACI, consulté le 21 janvier 2021.

maximal de 10 % et une voie avec un taux d'incorporation maximal de 5 %. Cette législation est susceptible d'évoluer, Boeing ayant ainsi récemment réalisé des essais avec 100 % de carburant de synthèse^a, ce qui pourrait nécessiter la modification de certains systèmes des avions actuels.

La dénomination des carburants de synthèse est très riche : *alternative jet fuel*, *renewable jet fuel*, *sustainable aviation fuel*, *synfuel*, *PtL*, *BtL*, ne sont que quelques exemples parmi la myriade de noms que l'on peut rencontrer et qui reflètent la diversité des voies de production possibles, illustrée sur la figure 6.1. Dans le cadre de ce rapport nous classerons le kérosène de synthèse en deux types suivant la source du carbone utilisée (et qui dicte in fine la source énergétique nécessaire pour sa production, à savoir biomasse ou électricité) :

- si la source de carbone est de la biomasse, on parle de **biocarburant**^b. Il s'agit de l'ensemble des processus de production illustrés sur la figure 6.1 à l'exception de ceux qui utilisent comme matière première les gaz (*Waste gas CO, CO₂, H₂*);
- si la source de carbone est du CO₂, on parle d'**électrocarburant**^c car ce CO₂ est alors combiné avec de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau. Ainsi, ces carburants de synthèse sont produits à partir de CO₂, d'eau et d'électricité. Sur la figure 6.1, il s'agit du processus de production qui utilise les gaz comme matière première.

6.3.2 Biocarburants pour l'aviation

Voies de production

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en vecteur énergétique utilisable pour des activités humaines : il y a la biomasse d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) et celle d'origine animale (par exemple, gras d'animaux). Cette matière organique est constituée d'eau et de matières carbonées et contient donc les éléments nécessaires (carbone et au moins une partie de l'hydrogène) pour produire du kérosène de synthèse, alors appelé biocarburant. Plusieurs voies de production, présentées dans le tableau 6.4, sont possibles en fonction de la matière première. Elles ont différents degrés de maturité comme le montre la figure 6.3 qui indique leurs indices FRL (*Fuel Readiness Level*).

Les plantes stockent l'énergie dans leurs organes de réserve : graines de céréales ou des oléagineux, racines de la betterave ou encore fruits du palmier à huile. Les carburants de première génération sont ceux qui exploitent ces organes de réserve pour transformer l'énergie qu'ils contiennent sous forme de kérosène de synthèse. On distingue deux types de voies de production selon la manière dont la plante stocke l'énergie. Soit la plante stocke l'énergie sous forme de glucides (sucre ou amidon, c'est le cas par exemple du maïs), soit sous forme

a. Ugo Viens, [Boeing opte pour le carburant 100 % renouvelable](#), Portail de l'IE, 26 janvier 2021.

b. On trouve aussi parfois la dénomination d'agrocarburant. Le suffixe bio- réfère à l'origine de ces carburants, à savoir la biomasse, mais n'a rien à voir avec l'agriculture biologique. Ces carburants sont parfois appelés *Biomass-to-Liquid* ou BtL.

c. Dans le cadre de ce rapport, on entendra par électrocarburant du kérosène de synthèse produit à partir d'électricité. Cette dénomination est parfois utilisée dans une acception plus large et englobe tous les carburants produits à partir d'électricité, liquides ou gazeux, et notamment l'hydrogène. Les électrocarburants de ce rapport correspondent donc aux carburants parfois appelés *Power-to-Liquid* ou PtL.

Matière première	Voies de production possibles
Huiles végétales	HEFA, CH
Sucre/amidon	ATJ, APR, DSHC
Lignocellulose, déchets	FT, LTJ, HDCJ (HTL)

TABLEAU 6.4 – Les voies de production à partir des huiles végétales (hormis huiles de cuisson usagées) et le sucre ou l’amidon sont celles qui exploitent les organes de réserve des plantes et produisent les biocarburants de première génération. Les biocarburants de deuxième génération exploitent la lignocellulose et les déchets (ainsi que les huiles de cuisson usagées). HEFA : Hydrogenated esters and fatty acids; CH : Catalytic hydrothermolysis; HDCJ : Hydroprocessed depolymerized cellulosic jet; HTL : Hydrothermal Liquefaction; FT : Fischer–Tropsch; LTJ : Lignin to jet; DSHC : Direct sugar to hydrocarbons; APR : Aqueous phase reforming; ATJ : Alcohol to jet. D’après Wei *et al.*⁹².

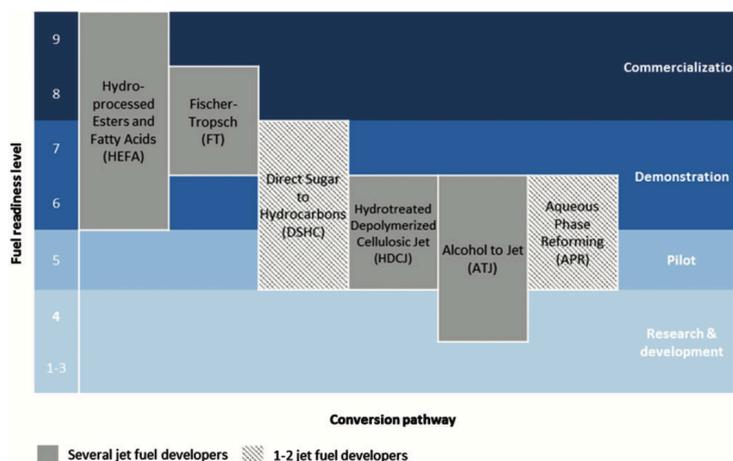


FIGURE 6.3 – Indices FRL pour différentes voies de production. D’après la figure 2 de Mawhood *et al.*⁹³.

de lipides (c’est le cas du colza, du tournesol et, dans une moindre mesure, du soja). Dans le premier cas, la voie de production vise à transformer des sucres en kérosène (voies à partir de *Sugar & starch* de la figure 6.1), et dans le deuxième cas, à transformer des huiles végétales en kérosène (voies à partir de *Vegetable oil* de la figure 6.1).

Les biocarburants de deuxième génération exploitent quant à eux la matière lignocellulosique de la plante, *i.e.* la matière qui constitue sa structure : tiges du maïs par exemple dans le cas des résidus agricoles, ou bien bois. Sur la figure 6.1 il s’agit des voies de production à partir de *Lignocellulose* : résidus agricoles et forestiers, cultures énergétiques dédiées (notamment miscanthus et millet vivace^a pour les plantes herbacées, et saule et peuplier pour les plantes ligneuses) ainsi que déchets municipaux solides. Cette catégorie inclut aussi les biocarburants produits à partir d’huiles de cuisson usagées et de gras animal (*Used cooking oil, fat* sur la figure 6.1), qui ne viennent pas directement des organes de réserve des plantes, ce qui induit un certain flou dans cette classification entre première

a. En anglais, *switchgrass*.

et deuxième génération.

Les biocarburants de troisième génération s'appuient principalement sur l'utilisation de micro-organismes comme des micro-algues (voies de production à partir de *Algae* sur la figure 6.1).

Production et disponibilité des matières premières

Pour le secteur aérien, seuls les biocarburants de première génération produits à partir de colza, de soja ou d'huile de palme ont aujourd'hui atteint un stade de production industrielle significative. Pour le secteur des transports plus globalement, 154 milliards de litres de biocarburant ont été produits en 2018, dont une part significative est de l'éthanol produit à partir de cultures sucrières et céréalières. Ces 154 milliards de litres ont représenté 3,4 % de la consommation du secteur des transports^{IEA19b}, et 0,01 % de cette production (soit 15 millions de litres) étaient des biocarburants à destination de l'aviation. Ces 15 millions de litres ont représenté 0,004 % de la consommation de l'aviation mondiale en 2018^a.

Les biocarburants pour l'aviation produits à ce jour sont principalement de type HEFA (cf. annexe C) et produits à partir d'huiles végétales (à partir de cultures dédiées type huile de palme ou de colza, ou bien d'huiles de cuisson usagées) et de graisse animale^{Ern17}. Neste, le plus gros producteur de biocarburant pour l'aviation, annonce pouvoir réduire de 80 % les émissions de gaz à effet de serre. Néanmoins, à l'heure actuelle, cette production est basée en partie sur de l'huile de palme et pose de nombreux problèmes socio-environnementaux dénoncés par les associations environnementales^{KH20}.

Comme on le verra plus loin, les carburants de type HEFA peuvent être intéressants d'un point de vue climatique s'ils sont produits à partir de certaines matières premières comme les huiles de cuisson usagées. Néanmoins, ces matières constituent un gisement limité^{94,95} (par exemple de l'ordre de 1 EJ pour les huiles de cuisson⁹⁴, alors que l'aviation a utilisé environ 14 EJ en 2018) ce qui justifie le développement d'autres voies de production, notamment par la synthèse Fischer–Tropsch qui peut utiliser des matières premières au gisement potentiel plus important comme les cultures bioénergétiques à base de lignocellulose ou les résidus agricoles et forestiers^{94,95}. Cette voie a un rendement plus faible qu'HEFA (de l'ordre de 40 % pour Fischer–Tropsch contre 75 % pour HEFA^{92,96–98}) et accentuera donc la pression sur les ressources en biomasse⁹⁶. Ici, le rendement est défini comme le rapport entre le pouvoir calorifique inférieur (PCI) de la biomasse en entrée et le PCI du carburant en sortie. Il ne prend donc pas en compte l'énergie additionnelle qu'il faut éventuellement fournir au système pour produire le biocarburant. Son intérêt est de pouvoir évaluer la quantité de biomasse nécessaire pour produire une quantité de biocarburants donnée.

La voie Fischer–Tropsch est bien maîtrisée, mais uniquement à partir de matière première fossile (charbon et gaz naturel) : cette voie de production a notamment été développée par l'Allemagne pendant la Seconde Guerre mondiale. À partir de lignées cellululosiques en revanche, elle en est au stade de dé-

a. Selon l'AIE, 15 millions de litres de biocarburants pour l'aviation ont été produits en 2018^{IEA19b} et l'aviation commerciale a consommé 337 Mtep d'énergie, ce qui correspond à un volume de presque 400 milliards de litres et donc un rapport de $0,015/400 \approx 0,004$ %. L'OACI estime de son côté une production de 6,8 millions de litres de biocarburants en 2018^{ICA19c}, ce qui représenterait alors moins de 0,002 % de la consommation.

monstrateur industriel avec un indice FRL de 7/8^{93,99,100} : le projet BioTfuel vise par exemple à avoir démontré la technologie en 2021^a. Les biocarburants de troisième génération en sont eux au stade de recherche de laboratoire. Ces rendements correspondent au rendement total du processus : or, le produit final de la réaction de Fischer–Tropsch consiste en un mélange d’hydrocarbures de différentes longueurs dont seule une partie est utile pour l’aviation (cette remarque s’applique aussi à HEFA). On définit ainsi la sélectivité comme le pourcentage du produit final utilisable pour l’aviation, qui varie entre 25 et 70 %^{101,102} (cf. annexe C). Le choix de la sélectivité dépend du type de carburant visé, principalement diesel ou kérosène. Les débouchés étant aujourd’hui plus nombreux pour le diesel, la sélectivité (du kérosène) est en pratique assez faible.

Analyse en cycle de vie et émissions de gaz à effet de serre

L’évaluation des émissions de gaz à effet de serre liées aux biocarburants est délicate (cf. notamment les fortes variations sur la figure 6.2) et constitue un sujet activement discuté dans la communauté scientifique. Elle nécessite de faire une analyse en cycle de vie détaillée en considérant les trois sources et puits d’émissions suivants :

- A/ la combustion du biocarburant ;
- B/ sa production ;
- C/ les émissions induites par le changement d’usage des sols.

A/ La combustion du biocarburant. La combustion d’un biocarburant est habituellement considérée comme neutre en terme d’émissions de CO₂. Le raisonnement est que le carbone libéré dans l’atmosphère lors de la combustion est d’origine végétale et non fossile : ainsi, le CO₂ libéré dans l’atmosphère par la combustion d’un biocarburant a au préalable été absorbé par la matière végétale depuis l’atmosphère par photosynthèse, où il est donc relâché après avoir été transformé en kérosène puis brûlé.

Il est important de réaliser que ce raisonnement repose sur une convention de comptabilité carbone et non sur une réalité physique. En effet, du point de vue purement climatique, seuls comptent les flux de carbone vers et depuis l’atmosphère : la combustion d’un biocarburant émet approximativement autant de CO₂ qu’un carburant d’origine fossile, et l’absorption du CO₂ par la biomasse est indépendante de l’usage qui en sera fait. Par ailleurs, le carbone capté par la biomasse n’est pas physiquement celui qui a été émis par la combustion du carburant.

Cette convention présente des intérêts, mais implique aussi des risques d’erreurs de comptabilité carbone qui ont été abondamment discutés dans la littérature scientifique^{103–106}, par les conseils scientifiques des agences environnementales européenne^{Com11} et américaine^{Boa12} et par le GIEC^{SBA+14}. Creutzig *et al.*¹⁰⁷ expliquent ainsi que « la perception de neutralité est liée à une mauvaise compréhension des lignes directrices pour les inventaires de GES [...]. La neutralité carbone est valable si les pays tiennent compte du changement d’usage des sols dans leurs inventaires pour la bioénergie autoproduite »^b.

a. BioTFuel: vers un développement des biocarburants de 2^e génération, Total, consulté le 21 février 2021.

b. La citation originale et complète est la suivante : « The neutrality perception is linked to a misunderstanding of the guidelines for GHG inventories, e.g., IPCC – Land Use, Land-Use

En fait, la « neutralité » d'une émission ne peut se justifier qu'en comparant le flux net de carbone dans deux cas : un cas avec l'émission et un cas sans l'émission. Ce scénario alternatif est appelé scénario contre-factuel ou *counter-factual* en anglais^a. La neutralité est alors justifiée si le bilan net des émissions de CO₂ est le même dans les deux cas. Ainsi, comme la combustion du biocarburant émet du CO₂ dans l'atmosphère qui n'aurait pas été émis en l'absence du dit biocarburant, il faut que cette émission soit compensée par une absorption **additionnelle**, *i.e.* qui n'aurait pas été présente sans le biocarburant. C'est le sens du mot « accrue » dans la citation suivante du GIEC, qui concerne la bioénergie de manière générale mais s'applique au cas particulier des biocarburants [SBA⁺14, p 877] : « si la production de bioénergie doit générer une réduction nette des émissions, elle doit le faire en compensant ces émissions par une absorption nette accrue de carbone par le biote et les sols »^b. Par exemple, si l'on part d'une situation sans biocarburant où de la biomasse est produite à un endroit donné (le scénario contre-factuel), puis que, toutes choses égales par ailleurs, on utilise cette biomasse pour produire du biocarburant, alors l'hypothèse de neutralité n'est pas justifiée puisque l'on a uniquement ajouté un flux d'émission sans créer d'absorption additionnelle¹⁰³.

La citation précédente du GIEC montre clairement que considérer que l'hypothèse de neutralité de la combustion repose en fait sur un principe de compensation : une émission à un instant et un endroit donné est compensée par une absorption équivalente, possiblement à un autre endroit et à un autre moment. Or, puisque l'additionnalité repose par définition sur un scénario qui n'aura pas lieu (le scénario contre-factuel), il est impossible de la garantir et on ne peut donc qu'estimer sa vraisemblance. Or, ce problème a tendance à être sous-estimé. Ainsi, une étude sur les projets de compensation du *Clean Development Mechanism* de l'ONU a montré que 85 % des projets envisagés avaient une faible probabilité d'être additionnels^{CHF⁺16}.

Pour que la combustion puisse être considérée comme neutre, il faut donc que l'analyse en cycle de vie du biocarburant soit effectuée de manière rigoureuse et exhaustive. Comme l'illustre l'exemple de l'additionnalité discutée ci-dessus, le point le plus délicat est de comprendre l'influence de la production du biocarburant sur les émissions liées aux changements d'usage des sols, qui seront discutées plus bas.

B/ Production. Le deuxième poste d'émission des biocarburants est leur production. Cela inclut la culture de la biomasse, le transport et la distribution ainsi que la production à proprement parler du biocarburant. Des facteurs d'émission pour différentes voies de production et différentes matières premières sont illustrées sur la figure 6.4. On peut voir trois postes principaux d'émission : la culture (surtout pour les biocarburants à partir de maïs ou de canne à sucre),

Change and Forestry (2000) states "Biomass fuels are included in the national energy and carbon dioxide emissions accounts for informational purposes only. Within the energy module biomass consumption is assumed to equal its regrowth. Any departures from this hypothesis are counted within the Land Use Change and Forestry Model." Carbon neutrality is valid if the countries account for LUC in their inventories for self-produced bioenergy ».

a. Il y a en fait un choix subjectif à faire le concernant, par exemple un scénario contre-factuel tendanciel ou un scénario contre-factuel considérant d'autres futurs possibles.

b. La citation originale est la suivante : « If bioenergy production is to generate a net reduction in emissions, it must do so by offsetting those emissions through increased net carbon uptake of biota and soils ».

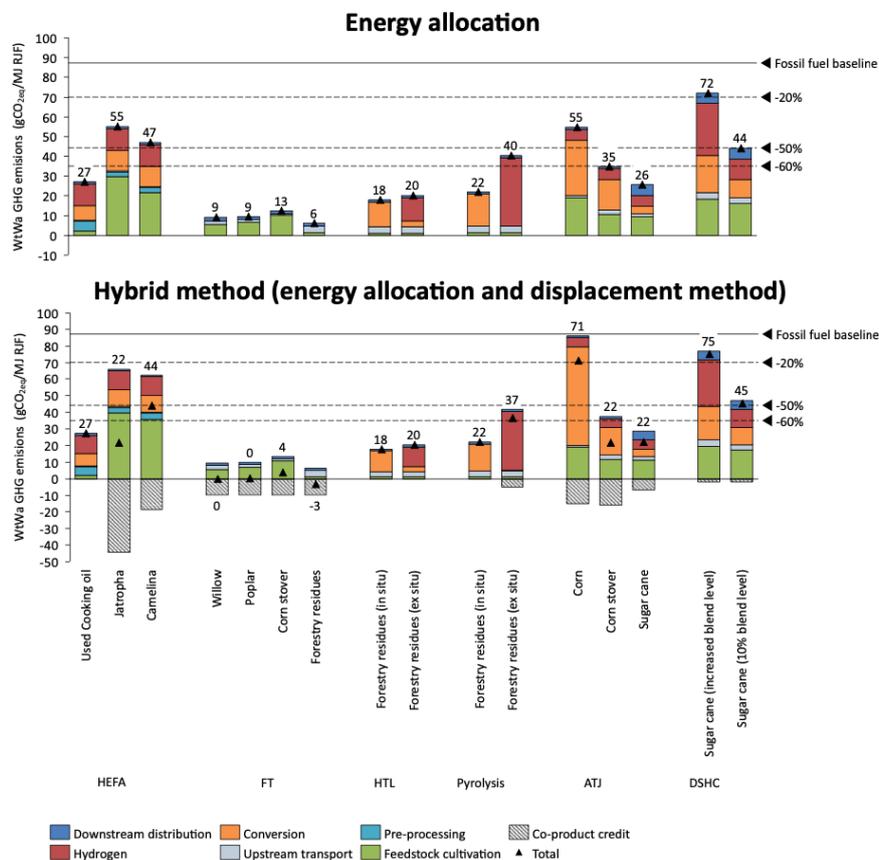


FIGURE 6.4 – Émissions de gaz à effet de serre liées à la production des biocarburants. D'après la figure 3 de de Jong *et al.*¹⁰⁸.

la conversion de la biomasse en biocarburant, et enfin l'hydrogène. En effet, la plupart des voies de production ont besoin d'hydrogène pour transformer la biomasse en carburant, par exemple lorsqu'il y a besoin d'une phase d'hydrogénation pour casser les liaisons doubles entre atomes de carbone. Par ailleurs, cette figure illustre que les émissions attribuées à un biocarburant dépendent de la méthodologie utilisée pour l'analyse en cycle de vie, qui détermine la manière dont les co-produits sont traités. En effet, on voit sur la figure 6.5 que l'on obtient d'autres produits que le kérosène lors de sa production, soit des hydrocarbures avec d'autres degrés de raffinage, ou de l'électricité dans le cas de FT. La figure 6.4 montre que les biocarburants de deuxième génération produits par la voie FT à partir de forêts à rotation courte ou de résidus forestiers ont les plus faibles émissions de gaz à effet de serre, de l'ordre de 6 gCO₂-eq/MJ à 10 gCO₂-eq/MJ.

C/ Émissions induites par les changements d'usage des sols. On distingue classiquement deux types d'émissions liées aux changements d'usage des sols :

Un changement direct d'usage des sols (DLUC) est une conversion d'un

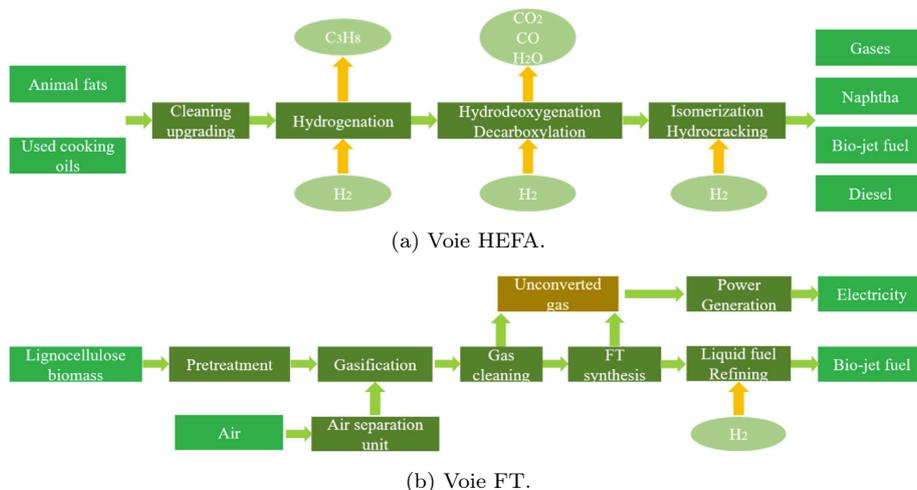


FIGURE 6.5 – Détails des voies HEFA et FT. D'après les figures 1 et 4 de Wei *et al.*⁹².

sol quelconque (forêt, culture alimentaire, etc.) pour la culture de matières premières pour la bioénergie, entraînant une variation du stock de carbone de ces sols ;

Un changement indirect d'usage des sols (ILUC) se produit lorsqu'un sol est converti quelque part en réponse à une augmentation de cultures bioénergétiques autre part. Bien que l'ILUC ne puisse pas être directement mesuré ou observé, il peut être évalué à l'aide de modèles.

Pour prendre un exemple concret, si un champ de blé est remplacé par un champ de miscanthus, en réponse à quoi une forêt est supprimée pour faire pousser du blé, le remplacement du champ de blé est comptabilisé dans les émissions DLUC et le remplacement de la forêt dans les émissions ILUC.

Les émissions LUC (DLUC + ILUC) prennent en compte^{109,EE15} :

- la végétation naturelle : variation du carbone dans la biomasse vivante aérienne et souterraine pour les forêts, les terres cultivées et les pâturages ;
- la biomasse agricole : changements de carbone dans la biomasse agricole, y compris la biomasse aérienne et souterraine comme les racines et rhizomes ;
- le carbone organique du sol : changements de carbone dans le sol ;
- l'oxydation des tourbières : émissions du sol provenant du drainage des tourbières en Indonésie et en Malaisie ;
- les terres cultivées non utilisées : lorsque la remise en production de terres cultivées inutilisées entraîne des émissions, par exemple si le taux de séquestration de la terre inutilisée est plus important que celui de la terre cultivée ;
- la séquestration perdue : prise en compte du fait que, si une forêt convertie ne l'était pas, elle continuerait à stocker du carbone.

Lorsque tous ces termes sont comptabilisés, la combustion du biocarburant peut bien être considérée comme neutre, comme discuté précédemment.

Par ailleurs, l'estimation des émissions LUC nécessite de fixer un horizon temporel. En effet, plusieurs des émissions décrites ci-dessus n'arrivent qu'une

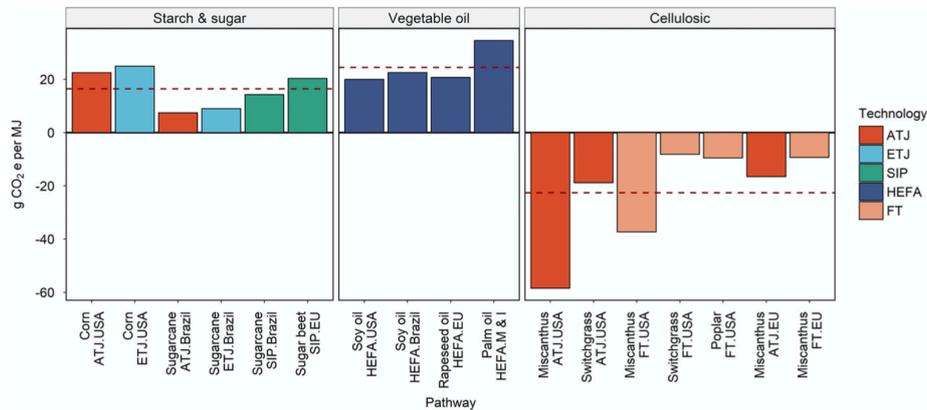


FIGURE 6.6 – Émissions des biocarburants liées au changement d’usage des sols avec une période d’amortissement de 25 ans pour les émissions liées au changement d’usage des sols. D’après la figure 2 de Zhao *et al.*¹⁰⁹.

fois, par exemple le carbone libéré par une tourbière convertie en culture bioénergétique. Il faut donc répartir cette émission instantanée sur un horizon temporel qui doit être fixé de manière subjective : l’estimation qui en résulte reflète donc nécessairement des jugements de valeur^{SBA+14}. Enfin, nous ne détaillons pas ce sujet, mais la temporalité des émissions et absorptions est aussi importante. Par exemple, émettre du CO₂ qui ne sera compensé que dans 20 à 30 ans exacerbe le problème du réchauffement climatique qui est aussi un problème de court terme. Dans le cas des biocarburants, ce problème peut par exemple se poser pour les rotations lignocellulosiques qui, même à rotation courte, mettent plusieurs années à grandir. L’analyse de cycle de vie *dynamique* a notamment été développée pour prendre en compte ce problème¹¹⁰.

La valeur des émissions LUC induites par la production de biocarburants est un sujet activement considéré dans la littérature scientifique^{111, 112, dHV+17, EE15, SWH10}. Dans ce rapport nous présenterons les valeurs rapportées dans l’article récent de Zhao *et al.*¹⁰⁹ dont les résultats sont présentés dans la figure 6.6 et qui viennent compléter, pour les biocarburants, la figure 6.2 en incluant notamment le miscanthus. On voit ainsi que les biocarburants de première génération ont des émissions LUC positives, entre 10 gCO₂-eq/MJ et 35 gCO₂-eq/MJ, alors que les biocarburants de deuxième génération ont eux des émissions LUC négatives, jusqu’à presque -60 gCO₂-eq/MJ dans le cas de la voie de production ATJ à partir de miscanthus américain. Ces émissions négatives traduisent le fait que ces cultures stockent du carbone dans les sols en même temps qu’elles grandissent. Néanmoins, cet effet est amené à s’arrêter une fois le sol saturé en carbone, ce qui peut prendre une vingtaine d’années en fonction du sol de départ¹¹³.

La figure 6.7 présente les émissions totales liées aux biocarburants, lorsque l’on prend en compte les émissions liées à la production et les émissions LUC. La meilleure voie de production est la voie FT à partir de miscanthus, qui a des émissions globales négatives. Sur les 17 méthodes de production envisagées, les 7 meilleures sont par la voie FT ou ATJ, et à partir de miscanthus, millet vivace ou peuplier, entre -28 gCO₂-eq/MJ à 30 gCO₂-eq/MJ.

On notera aussi que certains biocarburants de première génération peuvent

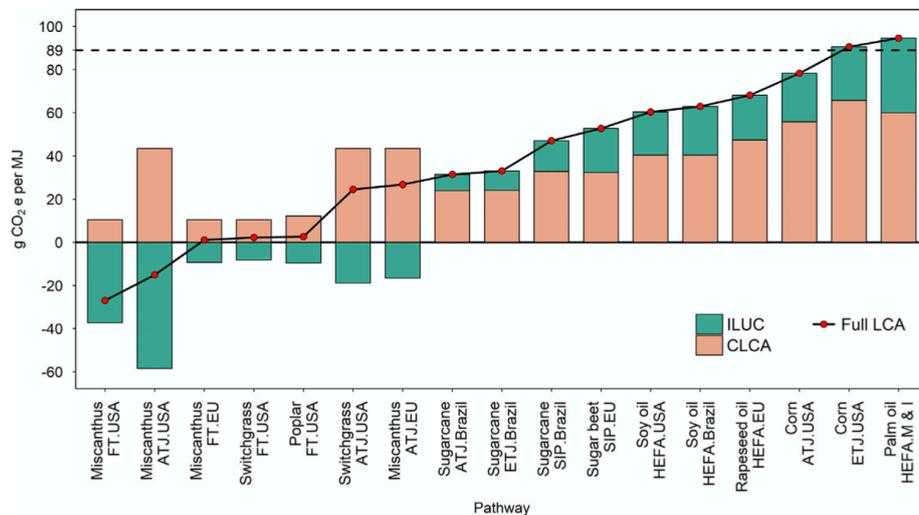


FIGURE 6.7 – Émissions totales des biocarburants incluant les émissions LUC de la figure 6.6. Pour ces calculs, une durée d’amortissement de 25 ans est considérée pour les émissions liées au changement d’usage des sols. D’après la figure 6 de Zhao *et al.*¹⁰⁹.

être bénéfiques d’un point de vue climatique, la voie de production ATJ à partir de canne à sucre brésilienne émettant ainsi 30 gCO₂-eq/MJ. Ces cultures suscitent un débat sur la compétition avec les ressources alimentaires qui ont conduit l’Union européenne à limiter en 2018 à 7 % leur part dans la consommation énergétique finale du secteur des transports^a. Ils continuent néanmoins à être activement développés dans des pays où l’espace est une ressource a priori moins limitée comme le Brésil^b ou les États-Unis. Les biocarburants de deuxième génération limitent ces problèmes puisqu’ils peuvent être cultivés sur des terres impropres aux cultures de première génération. Néanmoins, ils ne font pas complètement disparaître la pression sur les meilleures terres agricoles puisque leur rendement dépend de la qualité du sol¹¹⁵.

Incertitudes

Nous concluons cette partie en mentionnant les fortes incertitudes qui pèsent sur l’estimation des émissions de gaz à effet de serre liées. D’une part, ces émissions dépendent de multiples facteurs comme l’endroit où la biomasse est cultivée, ce que l’on retrouve dans la figure 6.7 qui précise l’origine des matières premières. D’autre part, l’estimation des émissions ILUC utilise des modèles basés sur les observations des réponses économiques passées pour prédire quelles terres seront affectées par un changement d’usage des sols, ce qui induit beaucoup d’incertitudes à cause du grand nombre d’hypothèses considérées, des différences potentielles entre les périmètres concernés, ainsi que des questions de gouvernances locales. Selon Plevin *et al.*¹¹⁶, ces incertitudes sont d’ordre épisté-

a. Communiqué de presse, [Énergie: nouvel objectif de 32 % d’énergies renouvelables d’ici 2030 conclu par les députés et les ministres](#), Parlement européen, 14 juin 2018.

b. Malgré cela, la pression sur les terres est une des raisons importantes de la déforestation amazonienne. On notera par exemple à ce titre l’article de West *et al.*¹¹⁴ qui souligne les défaillances des programmes de compensation visant à protéger la forêt amazonienne.

mique et ne pourront pas être réduites à l'avenir, il conviendrait donc toujours de rapporter des plages de valeur.

6.3.3 Électrocarburants

Les électrocarburants sont du kérosène de synthèse dont le carbone provient de dioxyde de carbone : ce dioxyde de carbone réagit avec de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau pour former du kérosène de synthèse alors appelé électrocarburant, le préfixe électro- faisant référence au fait que l'électricité est la seule source énergétique nécessaire pour produire ces carburants. Comme nous allons le voir, cette électricité est nécessaire pour l'électrolyse de l'eau et éventuellement pour la capture de CO₂ atmosphérique.

Origine du CO₂

Le dioxyde de carbone peut provenir de deux sources : de l'atmosphère (on parle alors de capture directe de l'air ou DAC, pour *direct air capture* en anglais) ou bien de sources ponctuelles industrielles qui émettent du CO₂ comme les centrales à charbon, les cimenteries ou encore les aciéries. Le CO₂ peut en effet être produit par plusieurs procédés industriels comme la calcination, la fermentation et surtout par la combustion d'énergies fossiles. Les sources industrielles offrent des gaz plus concentrés en CO₂ que l'atmosphère : leur concentration peut atteindre 35 % pour des aciéries et même 100 % (CO₂ pur) pour certains procédés thermo-chimiques comme la production d'ammoniac alors que, comme on l'a vu dans le chapitre 1, la concentration de CO₂ atmosphérique est de l'ordre de 0,04 %. Cette différence de concentration influence fortement l'efficacité totale du processus de production des électrocarburants qui peut passer de 39 à 48 %¹¹⁷. À court terme, les sources industrielles semblent plus réalistes car les technologies de capture du CO₂ atmosphérique n'existent pour l'instant qu'à l'état de démonstrateur et présentent un coût financier et énergétique important^{118, Mal17} ; par ailleurs, même les scénarios de décarbonation les plus optimistes prévoient que ces industries continueront à émettre du CO₂ dans un futur proche. Néanmoins, ce choix peut poser à plus long terme des problèmes importants en incitant les industries fortement émettrices de CO₂ à ne pas diminuer leurs émissions. On rentre alors dans des problématiques de réglementation et de comptabilité des émissions : quand un avion brûle de l'électrocarburant dont le CO₂ aura préalablement été capté auprès d'une cimenterie, les émissions doivent-elles être attribuées à l'avion ou à l'usine ? Si cette question peut sembler anodine et facilement résolue par une simple répartition moitié-moitié, la complexité des processus réglementaires de certification rend la situation plus compliquée. Christensen et Petrenko cite par exemple un scénario « pire-cas » où une même réduction d'émissions de CO₂ serait comptabilisée à la fois dans la directive européenne RED II, dans le mécanisme d'échange de quotas carbone EU-ETS, et dans les standards CO₂ des véhicules^{CP17}, cf. aussi le rapport de l'institut Cerulogy qui mentionne ce problème^{Mal17}.

Voies de production

Deux voies principales sont considérées pour la production des électrocarburants : la voie dite Fischer-Tropsch (représentée sur la figure 6.8) et la voie

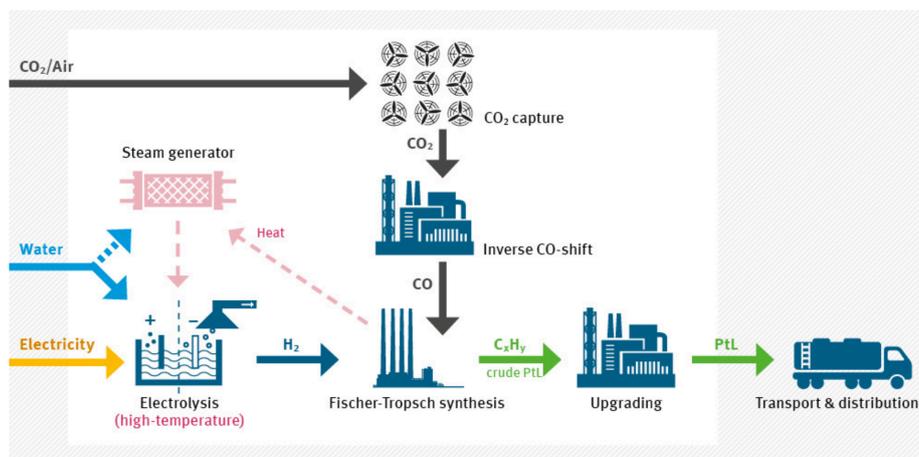


FIGURE 6.8 – Processus de production d'électrocarburant par la voie Fischer-Tropsch. La flèche rose pointillée correspond à l'utilisation potentielle de la chaleur dégagée pendant la synthèse de Fischer-Tropsch pour produire l'hydrogène par électrolyse à haute température, au rendement plus élevé. Cette technologie est en cours de développement. D'après la figure 3 de Schmidt *et al.*^{SWR⁺16}.

dite méthanol. Ces deux voies de production nécessitent de produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Dans la voie méthanol, cet hydrogène réagit directement avec le CO₂ pour produire du méthanol qui est alors transformé en hydrocarbures. Dans la voie Fischer-Tropsch, le CO₂ est d'abord dissocié en monoxyde de carbone (CO) par la réaction RWGS (*reverse water-gas-shift*) qui réagit alors avec l'hydrogène pour produire du gaz de synthèse, à partir duquel les hydrocarbures sont produits par la voie Fischer-Tropsch (cf. la partie 6.3.2 sur les biocarburants). Ces deux voies ont un rendement énergétique quasiment identique, entre 39 et 47 % suivant la source de CO₂ utilisée, et qui pourrait potentiellement être amélioré jusqu'à 60 % avec des techniques d'électrolyse de l'eau à haute température qui sont encore au stade de développement^{117,119}. Comme pour les biocarburants, ces rendements ne prennent pas en compte la sélectivité, *i.e.* la part du produit final sous forme de kérosène pour l'aviation.

Avantages et inconvénients potentiels

Les émissions des électrocarburants dépendent de l'index d'émission du mix électrique alimentant l'électrolyseur et le système de capture du CO₂. Comme on le verra dans la section 6.4, remplacer le kérosène par des électrocarburants produits à partir du mix électrique mondial actuel augmenterait les émissions de CO₂ car le mix mondial est fortement carboné, avec un index d'émission d'environ 132 gCO₂-eq/MJ^a. En revanche, à partir d'électricité bas-carbone dont l'index d'émission vaut environ 5,5 gCO₂-eq/MJ^b, les gains en terme d'émis-

a. Voir la note de bas de page a en page 28.

b. Dans le cadre de ce rapport, nous considérons comme bas-carbone de l'électricité produite à partir d'énergie solaire, éolienne, hydraulique ou nucléaire. Le chiffre de 5,5 gCO₂-eq/MJ est obtenu en moyennant les facteurs d'émission de ces sources bas-carbone d'électricité avec une pondération représentative de leur part respective dans la production électrique mondiale actuelle. Ainsi, selon l'AIE^{IEA20c}, ces sources d'électricité représentaient

sions peuvent être substantiels^a.

Au-delà des aspects climatiques, les électrocarburants présentent potentiellement de nombreux autres avantages, notamment comparés aux biocarburants, par exemple en terme de consommation d'eau¹¹⁷.

6.3.4 SAF

Le secteur aéronautique, et notamment l'OACI, utilise la dénomination de SAF, pour l'anglais *Sustainable Aviation Fuel*, pour désigner des carburants de synthèse pour l'aviation qui soient « durables ». À l'heure actuelle, il n'existe pas de définition unique des SAF convenue au niveau international. Lors de sa 38^e session en 2013, l'OACI a défini la durabilité selon trois critères^b :

1. réaliser une réduction nette des émissions de gaz à effet de serre sur la base du cycle de vie ;
2. respecter les domaines de haute importance en ce qui concerne la biodiversité, la conservation et les avantages que tirent les humains des écosystèmes, conformément aux règlements internationaux et nationaux ;
3. contribuer au développement social et économique local, une concurrence avec les produits alimentaires et l'eau devant être évitée.

Puis dans son rapport environnemental 2019, l'OACI en a donné une définition réglementaire, qui semble spécifique aux biocarburants^{ICA19a} :

1. réduire de 10 % les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie du carburant (comprenant les émissions DLUC et ILUC) par rapport au kérosène d'origine fossile ;
2. ne pas utiliser de biomasse issue de sols avec des stocks importants de carbone (forêts primaires, tourbières, zones humides).

L'OACI a par ailleurs développé une méthodologie au sein de CORSIA pour évaluer ces critères, permettant ainsi de définir les carburants éligibles pour CORSIA (CEF pour l'anglais *CORSIA eligible fuels*)^{ICA19a, ICA19b}. En principe, les électrocarburants rentrent dans la catégorie des SAF^{ICA18}, néanmoins en pratique, seuls les biocarburants ont pour l'instant été considérés par l'OACI^{ICA19b}.

en 2018 respectivement 49 %, 14 %, 6 % et 30 % de la production mondiale d'électricité, et leurs index d'émission valent respectivement selon le GIEC 6, 3, 12 et 3 gCO₂-eq/MJ (valeurs médianes disponibles dans le tableau A.III.1 de l'annexe III du cinquième rapport d'évaluation^{SBF+14}).

a. On trouve parfois un index d'émission de 1 gCO₂-eq/MJ d'électrocarburant produit, cf. par exemple Schmidt *et al.*^{SWR+16} C'est un indice extrêmement faible puisque l'indice d'émission le plus faible des énergies renouvelables est de l'ordre de 3 gCO₂-eq/MJ pour l'éolien^{SBF+14}. En fait, cette valeur de 1 gCO₂-eq/MJ correspond à une norme comptable en considérant que l'électricité utilisée pour produire l'électrocarburant a été produite pendant une période « hors-pic » où la centrale de production électrique (éolienne ou solaire photovoltaïque) n'aurait pas produit d'électricité s'il n'y avait pas eu de possibilité de la stocker sous forme d'électrocarburant. D'autres valeurs, plus proches de la réalité physique et de celles que nous utiliserons par la suite, sont présentées dans la figure 6.2.

b. Résolution A38-18, paragraphe 32 j, OACI, [Résolutions de l'Assemblée en vigueur](#), 4 octobre 2013.

6.4 Comparaison du potentiel de décarbonation aux ressources énergétiques en 2018

Nous concluons ce chapitre par des calculs qui donnent des tendances sur le lien entre émissions de CO₂ et énergie pour les nouveaux vecteurs énergétiques qui ont été présentés. Il s'agit de calculs d'ordre de grandeur qui visent à illustrer deux points principaux concernant ces différentes solutions de décarbonation :

1. leur impact climatique dépend du facteur d'émission et du rendement des différentes voies de production ;
2. la question de la quantité d'énergie primaire nécessaire est importante, car des contraintes physiques de disponibilité pourraient se poser.

Aborder ces questions sur un horizon futur (par exemple, 2050) est une question délicate qui nécessite de faire de nombreuses hypothèses, par exemple sur l'évolution du mix électrique, de la biomasse disponible ou encore l'échelle et la vitesse à laquelle ces nouveaux vecteurs énergétiques seront déployés. Des éléments de réflexion dans ce sens seront présentés dans le chapitre 9. Pour obtenir des ordres de grandeur significatifs sans avoir à faire ces hypothèses, nous présentons à ce stade les résultats de calculs **en l'état actuel de la situation**. En d'autres termes, nous effectuons des calculs où toutes les valeurs que nous considérons sont celles de 2018, par exemple le niveau de trafic aérien, le facteur d'émission de l'électricité ou encore la disponibilité en énergie primaire. Pour chacun des quatre vecteurs énergétiques considérés (électricité, hydrogène, électrocarburant et biocarburant), nous calculons comment les émissions de CO₂ et l'énergie primaire nécessaire varieraient si l'intégralité du kérosène d'origine fossile utilisé par l'aviation en 2018 était remplacée, dans les conditions de 2018, par ce vecteur énergétique.

Ces calculs ont des limitations évidentes. D'une part, comme nous l'avons expliqué dans le reste du chapitre, ces nouveaux vecteurs énergétiques ne seront disponibles qu'à plus ou moins longue échéance : ainsi, si certains biocarburants sont déjà disponibles, un avion commercial long-courrier tout électrique semble hors d'atteinte dans les décennies qui viennent. Par ailleurs, la consommation énergétique des potentiels futurs avions tout électriques et à hydrogène est soumise à de fortes incertitudes (cf. le tableau 6.3 pour l'hydrogène). Enfin, quand bien même ces solutions seraient disponibles, il serait plus pertinent d'envisager un mix de ces solutions, par exemple électricité pour des avions régionaux, hydrogène pour des courts et moyen courrier et carburants de synthèse pour des long courrier, avec pour ces derniers un mix entre électro- et biocarburants, et pour les biocarburants une diversité de matières premières et voies de production.

Bien que ces calculs effectués dans les conditions de 2018 mériteraient d'être affinés pour pallier les limitations énoncées ci-dessus, ils permettent néanmoins de mettre en valeur le lien entre émissions de CO₂ et énergie. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le tableau 6.5, dont il ressort que :

1. pour décarboner l'aviation, il ne suffit pas de changer de vecteur énergétique, il faut que ce vecteur soit bas-carbone. À défaut, ces nouveaux vecteurs énergétiques pourraient **augmenter** les émissions de CO₂. Pour les solutions à base d'électricité, ce serait par exemple le cas s'ils étaient déployés dans les conditions de 2018 ;

2. en 2018, la quantité d'énergie bas-carbone disponible (électricité bas-carbone et bioénergie) est du même ordre de grandeur que les besoins énergétiques de l'aviation, et ces énergie bas-carbone ont été utilisées à d'autres fins que l'aviation. Décarboner l'aviation nécessite donc d'augmenter fortement leur production (cf. section 9.4.3 où de possibles limites sont discutées).

Calcul #1. Vecteur énergétique : électricité

On suppose que la flotte mondiale est remplacée en intégralité par des avions tout électriques. Nous considérons que la demande énergétique augmente de 58 %, qui est l'évolution pour l'avion court-courrier tout électrique étudié par Gnadt *et al.*⁵¹. La demande énergétique de l'aviation se monte ainsi à 23,2 EJ. À partir du mix mondial actuel dont le facteur d'émission vaut 132 gCO₂-eq/MJ, cela engendrerait 3,0 GtCO₂-eq d'émissions, soit une hausse de 139 % par rapport aux émissions de 2018, et représenterait 23 % de la production mondiale d'électricité de 2018. À partir du mix bas-carbone actuel dont le facteur d'émission vaut 5,5 gCO₂-eq/MJ^a, cela engendrerait 0,1 GtCO₂-eq d'émissions, soit une baisse de 90 % par rapport aux émissions de 2018. En revanche, cela nécessiterait d'utiliser 70 % de l'électricité bas-carbone produite en 2018.

Ce calcul permet de mettre en lumière la tension entre énergie disponible et potentiel de décarbonation. On voit ainsi sur cet exemple que soit on utilise une énergie abondante (l'électricité globale) mais relativement carbonée, soit une énergie moins abondante (l'électricité bas-carbone) mais moins carbonée.

Calcul #2. Vecteur énergétique : électrocarburant

On suppose maintenant que l'intégralité du kérosène fourni aux avions est de l'électrocarburant produit par la voie Fischer-Tropsch à partir de CO₂ industriel et d'hydrogène produit par électrolyse de l'eau. Cette production nécessite 42,9 EJ d'électricité en considérant un rendement pour le processus global de 40 % et une sélectivité élevée de 70 %. Soit cette électricité est prélevée sur le mix global, ce qui représente 45 % de la ressource disponible, et les émissions de CO₂ sont multipliées par 4,5 : soit l'électricité est bas-carbone, ce qui nécessiterait 1,3 fois la quantité totale d'électricité bas-carbone produite en 2018 mais qui permettrait de réduire les émissions de CO₂ de plus de 80 %^b.

Calcul #3. Vecteur énergétique : hydrogène

On suppose maintenant que tous les avions utilisent de l'hydrogène brûlé dans une turbine à combustion et qu'ils ont besoin de la même quantité d'éner-

a. Voir note de bas de page b en page 109.

b. Trois remarques méthodologiques concernant ce calcul. D'une part, par simplicité nous n'avons pas pris en compte les co-produits, ce qui a donc pour effet de surestimer les émissions. D'autre part, nous n'avons pas considéré d'émissions liées à la combustion, considérant ainsi qu'elles doivent être attribuées à la source industrielle. Enfin, nous avons fait ce calcul en considérant l'index d'émission de l'électricité (renouvelable ou pas) en 2018, cf. section 6.3.3. Dans le cadre des calculs effectués ici, si l'on considérait que l'électricité était produite pendant des heures « hors-pic », il faudrait comparer les besoins à ce gisement énergétique, cf. par exemple le rapport de l'ICCT où un tel gisement est évalué^{CP17}.

Scénario	Émissions CO ₂		Énergie nécessaire Valeur brute (EJ)	% de la ressource
	Valeur brute (GtCO ₂ -eq)	Variation		
Situation en 2018	1,2	-	14,1	-
Calcul #1 : électricité (énergie primaire = électricité)				
Mix mondial	3,0	+139 %	22,3	23 %
Mix bas-carbone	0,1	-90 %	22,3	70 %
Calcul #2 : électrocarburant (énergie primaire = électricité)				
Mix mondial	5,7	+359 %	42,9	45 %
Mix bas-carbone	0,2	-81 %	42,9	134 %
Calcul #3 : hydrogène (énergie primaire = électricité)				
Méthodes actuelles de production	2,2	+76 %	-	-
Électrolyse, mix mondial	3,3	+164 %	24,6	26 %
Électrolyse, mix bas-carbone	0,1	-89 %	24,6	77 %
Calcul #4 : biocarburant (énergie primaire = biomasse)				
HEFA/huile de palme	0,5 à 1,5	-61 à +18 %	23,7	43 %
FT/résidus forestiers	0,1 à 0,4	-89 à -71 %	50,4	91 %

TABLEAU 6.5 – Tableau récapitulatif des émissions de CO₂ et des besoins énergétiques pour différents calculs illustratifs, si les 14,1 EJ d'énergie utilisée par l'aviation en 2018 sous forme de kérosène l'était sous forme d'électricité, de biocarburant, d'électrocarburant ou d'hydrogène. On voit qu'à l'heure actuelle, les méthodes de décarbonation les plus efficaces (électrocarburant, hydrogène ou biocarburants) permettraient une réduction drastique des émissions (entre -70 et -90 %) mais nécessiteraient une augmentation significative des ressources énergétiques : doublement de l'électricité bas-carbone pour les électrocarburants et l'hydrogène, et entre 40% et 90% de la biomasse disponible pour les biocarburants.

gie^a, soit 14,1 EJ. Avec les techniques de production actuelles et en prenant en compte que la phase de liquéfaction nécessite 45 MJ/kgH₂, cela augmenterait les émissions de CO₂ de 76 %. Si on produisait l'hydrogène liquide via l'électrolyse de l'eau, le résultat dépend de l'électricité utilisée. À partir du mix mondial, cela nécessiterait 26 % de l'électricité mondiale et multiplierait les émissions de l'aviation par 2,6 ; à partir du mix bas-carbone, cela demanderait les trois quarts de l'électricité bas-carbone de 2018, et aurait un impact significatif en faisant chuter les émissions de 89 %.

Calcul #4. Vecteur énergétique : biocarburant

On considère pour finir les voies de production HEFA et FT. Pour la voie HEFA nous considérons un rendement de 85 % et des facteurs d'émissions entre 34 gCO₂-eq/MJ et 103 gCO₂-eq/MJ, et pour la voie FT nous considérons un rendement de 40 % et des facteurs d'émission entre 10 gCO₂-eq/MJ et 25 gCO₂-eq/MJ. Dans les deux cas nous considérons une sélectivité de 70 % : cette valeur influence la quantité de bioénergie nécessaire mais n'est pas prise en compte dans les émissions de gaz à effet de serre. Concernant la voie HEFA on voit d'une part l'importance de la matière première : nous n'avons considéré ici que de l'huile de palme, qui peut augmenter ou diminuer les émissions selon le changement de l'usage des sols. Cette voie nécessiterait d'utiliser plus de 40 % de la bioénergie disponible en 2018. La voie FT réduit les émissions mais exacerbe la pression sur les ressources énergétiques : elle permet une réduction des émissions de 71 à 89 %, mais nécessite deux fois plus de bioénergie que la voie HEFA, soit plus de 90 % de la bioénergie totale disponible en 2018.

a. Cette hypothèse se justifie notamment par les incertitudes qui pèsent actuellement sur la consommation énergétique des futurs avions à hydrogène, cf. le tableau 6.3. C'est aussi l'hypothèse effectuée par Ponater *et al.*⁹⁰ dans leur étude de scénarios prospectifs de déploiement d'une flotte d'avions à hydrogène.

Diminuer les effets non-CO₂

Comme expliqué en section 2.1.2, les effets non-CO₂ sont dus aux émissions autres que le CO₂, aux propriétés physico-chimiques du milieu dans lequel ces émissions ont lieu ainsi qu'à la structuration et à la dynamique du sillage de l'avion. Diminuer les émissions autres que le CO₂ pourrait diminuer les effets non-CO₂. En effet, seule l'interaction entre les aérosols et le rayonnement solaire a un effet refroidissant ($-6,5 \text{ mW/m}^2$), mais cet effet est moins fort que celui engendré par la formation des cirrus de traînées ($57,4 \text{ mW/m}^2$) qui est facilitée par la présence de ces mêmes aérosols. De ce point de vue, toutes les mesures qui permettent de diminuer la consommation de l'avion, sans augmenter d'autres facteurs d'émission comme les NO_x, participent à diminuer les effets non-CO₂. Comme noté précédemment, les effets non-CO₂ des avions actuels ne sont pas encore totalement compris et font l'objet de recherches. A fortiori, peu de littératures scientifiques, qui quantifient de manière précise les stratégies d'atténuation des effets non-CO₂, sont disponibles à ce jour.

7.1 Changer les émissions

Pour réduire les émissions de particules lors d'un vol, on peut jouer sur deux facteurs : la motorisation et le carburant.

7.1.1 Motorisation

Un premier levier au niveau de la motorisation consiste à diminuer les émissions de NO_x. Néanmoins, la quantité de ces émissions dépend de la phase de vol en raison du régime du moteur¹²⁰. Par ailleurs, des aspects technologiques au niveau de la combustion du carburant sont à prendre en compte. En effet, comme mentionné en section 5.1, l'amélioration des rendements des moteurs d'avion est notamment réalisée en augmentant la température en sortie de la chambre de combustion, ce qui entraîne une plus grande formation de NO_x par unité de kérosène¹²¹. Ainsi, l'objectif de réduction des NO_x va à l'encontre de l'amélioration de l'efficacité énergétique et des optimisations sont donc nécessaires pour établir un compromis. Récemment, Skowron *et al.*¹²² ont étudié ce compromis et concluent qu'une amélioration de l'efficacité était préférable à une diminution des émissions de NO_x.

À plus long terme, de nouvelles motorisations sont aussi envisagées pour éviter la formation des traînées de condensation. De façon générale, les moteurs émettant moins de suies semblent aller dans ce sens. On peut aussi mentionner les nouvelles chambres de combustion dites *dual annular combustors* qui présentent deux rangées d'injecteurs répartis sur la circonférence. Elles sont plus performantes grâce à une meilleure répartition du débit carburant et produisent des particules de glace plus grosses mais 76 % moins nombreuses que celles issues d'une chambre de combustion classique (*single annular combustor*)¹²³.

Enfin, les moteurs électriques n'émettent aucune particule et, puisqu'il n'y a pas de combustion, ne modifient pas les propriétés chimiques et thermodynamiques de l'air : ces moteurs suppriment a priori tous les effets non-CO₂. À noter que l'on ne considère ici que la motorisation à proprement parler : ainsi, si le moteur est actionné via une pile à combustible alimentée par de l'hydrogène liquide, alors le vol de l'avion continuera à produire de l'eau susceptible de produire des traînées de condensation.

7.1.2 Carburant

Des additifs ont été proposés pour changer les propriétés du kérosène, mais Gierens *et al.*¹²⁴ concluent qu'ils ne permettent pas d'éviter la formation des traînées de condensation et que leur impact sur la composition des traînées (et in fine leur impact climatique) reste incertain.

Récemment, plusieurs travaux expérimentaux et théoriques ont porté sur l'impact des carburants de synthèse, en particulier des biocarburants, sur les émissions de suie ainsi que sur le nombre et les propriétés microphysiques des cristaux de glace. Comme expliqué dans la section 2.1.2, émission de suie et formation de traînées de condensation sont liées dans la mesure où les particules de suie agissent comme des noyaux de condensation qui favorisent la création des traînées de condensation et des cirrus induits. Une caractéristique des carburants de synthèse est d'avoir une quantité plus faible d'aromatiques : ceux-ci étant les principaux précurseurs de la suie, il s'ensuit que les carburants de synthèse devraient émettre moins de suie que les carburants conventionnels. Des travaux expérimentaux issus de deux études ont validé ce lien et suggèrent qu'un mix 50/50 entre du kérosène conventionnel et un carburant de synthèse diminue les émissions de suie de 50 à 70 %^{30,91} (la première étude⁹¹ se concentre sur les biocarburants, alors que la seconde étude³⁰ considère aussi un carburant de synthèse produit par la voie Fischer–Tropsch à partir de charbon). Des travaux théoriques^{125,126} prédisent qu'une baisse des émissions de suie de 50 % (telle qu'observée expérimentalement dans l'étude³⁰) devrait entraîner une baisse du nombre de cristaux de glace de l'ordre de 35 à 50 %. Expérimentalement, il a été observé que cette baisse est plutôt de l'ordre de 45 à 75 %³⁰. Par ailleurs, cette réduction du nombre de cristaux de glace s'accompagne d'une augmentation de leur taille^{30,126}. Ces deux effets (moins de cristaux de glace, mais plus gros) devraient diminuer l'impact radiatif des traînées de condensation et des cirrus induits, ce qui a été confirmé théoriquement. En effet, Burkhardt *et al.*¹²⁷ montrent qu'une baisse de 50 à 80 % du nombre de cristaux de glace fait diminuer le forçage radiatif des cirrus de traînées de 21 à 50 %. Considérant que les cirrus de traînée sont responsables d'environ 60 % de l'impact climatique de l'aviation, ces résultats suggèrent donc que l'utilisation de biocarburants à des taux d'incorporation de 50 % pourrait diminuer l'impact climatique de l'aviation

de l'ordre de 10 à 25 %.

Concernant l'hydrogène, un moteur à hydrogène diminuerait les émissions de NO_x et supprimerait les émissions de suie et de soufre; en revanche, les émissions de vapeur d'eau seraient plus importantes⁹⁰. Cela aurait pour conséquence une probabilité d'occurrence plus grande de traînées de condensation mais avec des propriétés microphysiques différentes, notamment une épaisseur optique moindre. Au final, l'impact climatique serait positif avec une réduction d'environ 10 % de l'impact lié aux traînées de condensation (en terme de forçage radiatif), auxquels s'ajoutent la diminution de l'impact des NO_x ⁹⁰. Il est intéressant de noter qu'en l'absence d'émissions de suie, les particules de l'air ambiant jouent alors un rôle important dans la formation des traînées de condensation, remarque qui s'applique aussi potentiellement pour du carburant composé exclusivement de biocarburants¹²⁶.

7.2 Changer les trajectoires

Comme expliqué dans la section 2.1.2, les cirrus induits par les traînées de condensation ne peuvent se former que dans des régions sursaturées en glace. Une étude réalisée dans l'espace aérien du Japon¹²³ a montré que 17,8 % des vols génèrent des traînées de condensation et que 2,2 % de l'ensemble des vols sont responsables de 80 % des traînées de condensation. Cette étude, qui demande à être confirmée par d'autres études similaires, suggère donc qu'une minorité de vols sont responsables d'un fort impact climatique, et donc que des gains significatifs sont envisageables si ces avions adaptent leur trajectoire pour éviter ces zones.

Pour cela, on peut envisager des modifications des horaires et des périodes des vols : en effet, l'impact des traînées de condensation dépend de leur lieu et de leur temporalité (jour, nuit, saison) et la plupart de ces impacts sont dus aux vols de nuit hivernaux^{22,124}.

Néanmoins, la principale stratégie envisagée est de dévier les trajectoires et notamment changer l'altitude des vols¹²⁴. Cette déviation peut entraîner une consommation accrue de carburant, mais cette surconsommation reste a priori faible (cf. infra). Noppel et Singh²² distinguent trois stratégies de changement d'altitude : 1) changer de manière globale l'altitude des vols ; 2) changer l'altitude localement (en temps et en espace) en fonction des conditions atmosphériques ; 3) mettre à jour l'altitude en temps réel pendant le vol.

Des études chiffrées permettent de quantifier l'application de différentes stratégies pour lutter contre les traînées de condensation. Par exemple, Matthes *et al.*¹²⁸ considèrent un vol dans une zone à fort potentiel de formation de traînées de condensation et estiment une réduction potentielle de 40 % des effets climatiques globaux (*i.e.* effets CO_2 et non- CO_2), au coût d'une surconsommation de 0,5 %. D'autres scénarios sont considérés par Teoh *et al.*¹²³. Un premier scénario, incluant uniquement des légères déviations n'entraînant pas de surconsommation de carburant, prévoit une réduction de 20 % de l'impact des traînées de condensation. Un second scénario, considérant la généralisation de stratégies de déviation, montre une possible réduction de l'impact des traînées de condensation de 59,4 % au coût d'une surconsommation de kérosène pour l'ensemble de la flotte de 0,014 %. Ensuite, un troisième scénario se focalise sur l'introduction de nouvelles chambres de combustion (DAC) sans changement de trajectoires :

les traînées de condensation sont alors réduites de 68,8 %. Enfin, un dernier scénario couplant ces nouvelles chambres de combustion avec des déviations généralisées montre une réduction de 91,8 % des traînées de condensation au coût d'une surconsommation globale de 0,027 %.

7.3 Réduction de la durée de vie des tourbillons de sillage

Comme mentionné en section 2.1.2, les tourbillons de sillage qui se développent en aval de l'aéronef pilotent la phase vortex de l'évolution des traînées de condensation car ils piègent dans leur cœur une large partie de la vapeur d'eau rejetée par les moteurs²⁵, et constituent un élément précurseur indispensable pour l'apparition des cirrus induits dans la phase de dissipation. Un levier d'atténuation des effets non-CO₂ associés aux traînées de condensation repose ainsi sur la réduction de la durée de vie de ces tourbillons pour accélérer la dispersion des effluents moteurs. Pour y arriver, il est possible de provoquer le déclenchement anticipé des instabilités naturelles de la paire de tourbillons de sillage¹²⁹.

L'instabilité la plus puissante et la plus communément observée est l'instabilité de Crow^{26,130} qui consiste en une déformation sinusoïdale de grande longueur d'onde des deux tourbillons visible directement sur les traînées de condensation comme illustré à la figure 2.2. Crouch *et al.*¹³¹ ont proposé et testé expérimentalement une solution de contrôle basée sur le braquage symétrique des ailerons à une fréquence correspondant à celle de l'instabilité de Crow, ce qui permet d'accélérer son déclenchement. Néanmoins, ce système de contrôle ne s'est avéré efficace qu'avec les volets sortis, ce qui rend cette proposition peu attrayante pour la phase de croisière. Plus récemment, Brion *et al.*¹³² ont déterminé théoriquement qu'une perturbation placée dans la zone de réceptivité maximale de déclenchement de l'instabilité de Crow permet une diminution de moitié de la durée de vie de la paire de tourbillons de sillage. Cette zone correspond à l'emplacement de l'empennage vertical ce qui laisse une possibilité d'y positionner un système de contrôle. En revanche, aucune solution technique n'a été étudiée et proposée depuis. Toutes ces études permettant de réduire la durée de vie des tourbillons de sillage et donc de réduire l'effet des traînées de condensation devront notamment être prises en compte pour la conception d'avions de type aile volante¹²⁴.

Enfin, l'intégration de la motorisation sur l'architecture avion est aussi un enjeu principal qui influence la formation des traînées de condensation de part le positionnement relatif des sorties moteurs par rapport aux extrémités des ailes où naissent les tourbillons de sillage²⁵.

Quatrième partie

Scénarios

Si l'impact de l'aviation sur le climat (chapitre 2) et les leviers techniques et opérationnels envisageables (chapitres 5, 6 et 7) sont relativement objectifs, en tirer des conclusions pour établir des scénarios prospectifs est un exercice bien plus délicat. Il suffit pour s'en convaincre de comparer le scénario prospectif Waypoint 2050 d'ATAG^{ATA20} à celui du cabinet de conseil BL evolution^{LMB20} : à l'horizon 2050, le premier conclut à la possibilité d'une **augmentation** du trafic de 3 % par an et le second à la nécessité d'une **diminution** de 5,5 %. Ce grand écart sur les visions de l'avenir de l'aviation est d'autant plus spectaculaire que les deux affirment respecter les engagements climatiques. Nous apportons dans cette partie des éléments de réflexion sur ce sujet. Dans le chapitre 8, des éléments de contexte concernant le cadre d'analyse de scénarios sont présentés et la notion de budget carbone pour l'aviation est introduite. Cela permet d'introduire la méthodologie d'évaluation de scénarios pour l'aviation que nous avons retenue. Après une revue bibliographique sur des travaux académiques abordant des scénarios prospectifs pour l'aviation, le chapitre 9 présente quant à lui une discussion de quelques scénarios illustratifs à l'horizon 2050 grâce à [CAST](#), un outil de simulation de trajectoires climatiques pour l'aviation.

Chapitre 8

Contexte général

L'objectif de ce chapitre est d'introduire les outils et méthodologies qui seront utilisés dans le chapitre 9 pour analyser des scénarios de transition pour le secteur aérien. Des explications détaillées sont notamment fournies sur la notion de budget carbone et sur son utilisation pour l'aviation.

8.1 Accord de Paris et scénarios du GIEC

Le cadre généralement admis pour les objectifs climatiques, et dans lequel nous contextualiserons les scénarios et trajectoires discutés dans la partie suivante, est celui de l'accord de Paris. Cet accord, signé par 195 délégations lors de la COP21 en 2015, vise à contenir le réchauffement climatique « nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels et [à] poursuivre l'action menée pour limiter l'élévation des températures à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels ». Suite à cet accord, l'ONU a commandé au GIEC un rapport visant à décrire des trajectoires compatibles avec l'objectif de limiter le réchauffement climatique à +1,5 °C.

Ce rapport, le rapport spécial 1.5, est paru en 2018^{IPC18}. S'appuyant sur les nombreux travaux prospectifs de la littérature scientifique, le GIEC a défini dans ce rapport quatre grandes familles de scénarios, appelées P1, P2, P3 et P4, au sein desquelles le réchauffement climatique est en principe limité à +1,5 °C en 2100. Ces scénarios se différencient par les hypothèses techniques, sociales et économiques sous-jacentes, notamment progrès technologique, évolution des modes de vie et de la croissance économique. Le scénario P3 est ainsi un scénario tendanciel dans lequel le développement sociétal et technologique poursuit les courbes historiques, mais il suppose le développement puis le déploiement de technologies de capture et de stockage de carbone. Néanmoins, ces technologies posent de nombreux problèmes bien identifiés dans la littérature scientifique et résumés dans la citation suivante, tirée du rapport spécial 1.5 du GIEC [RSJ⁺18, page 96]^a :

a. La citation originale en anglais est la suivante : « CD RT deployed at scale is unproven, and reliance on such technology is a major risk in the ability to limit warming to 1,5 °C. » On peut aussi citer Anderson *et al.*¹³³ : « Negative-emission technologies are not an insurance policy, but rather an unjust and high-stakes gamble. », Smith *et al.*¹³⁴ qui qualifie de « extrêmement risqué » le fait de compter de manière importante sur ces technologies, ou encore

Indicateur	P1	P2	P3	P4
Budget carbone et quantité cumulée de CO ₂ captée par les BECSC sur la période 2020–2100 (GtCO ₂)				
Budget carbone	390			
BECSC	0	151	414	1191
Budget carbone brut	390	541	804	1581
Énergie disponible en 2050 (EJ/an)				
Énergie primaire issue du pétrole	22	86	33	117
Énergie primaire issue de la biomasse	45	79	118	276
Énergie primaire issue du nucléaire	76	60	183	172
Énergie primaire issue d'énergies renouvelables	159	243	167	210
Production d'électricité	160	240	220	245

TABLEAU 8.1 – Caractéristiques des scénarios P1 à P4 du rapport spécial 1,5 °C du GIEC. Les valeurs énergétiques ont notamment été déterminées à partir des données de référence de l'AIE^{IEA12}. Les valeurs énergétiques indiquées sont celles en 2050 alors que celles pour la partie CO₂ sont à horizon 2100, correspondant donc à des valeurs cumulées pour les BECSC. Le budget carbone correspond à la valeur médiane pour +1,5 °C : c'est la quantité nette de CO₂ que l'on peut émettre dans l'atmosphère (cf. la section 1.3.3). Le budget carbone brut correspond à la somme de ce budget carbone avec les puits de carbone anthropiques (ici seulement sous la forme de BECSC) : c'est donc la quantité brute de CO₂ que l'on peut émettre. Des explications supplémentaires sur ces deux notions sont fournies dans le corps du texte.

« Le déploiement à l'échelle requise de technologies de capture de carbone n'est pas prouvé, et s'appuyer sur de telles technologies représente un risque majeur dans la possibilité de limiter le réchauffement à 1,5 °C. »

Le fait que le GIEC qualifie les technologies de capture carbone de « risque majeur » constitue la raison pour laquelle le scénario P1, le seul à ne pas compter sur de telles technologies, servira de référence préliminaire pour les analyses suivantes. Dans ce scénario, les émissions brutes de CO₂ passent de 43 GtCO₂ en 2019 à 4,3 GtCO₂ en 2050, soit une baisse de 90 %. Cela représente une baisse des émissions à un taux de 7 % par an pendant 30 ans^a. À titre indicatif et pour prendre conscience de l'ampleur des changements nécessaires, les émissions de CO₂ ont cru en moyenne de 0,9 % par an sur les dix dernières années (période 2010–2019), et la crise sanitaire Covid-19 a fait diminuer les émissions de 7 %¹³⁵ sur l'année 2020.

Si le scénario P1 nous servira de référence, nous considérerons aussi les autres scénarios notamment pour effectuer une analyse de sensibilité. Cette analyse s'appuiera notamment sur des valeurs distinctes pour les BECSC et pour la disponibilité en biomasse. Les différentes valeurs sur lesquelles nous nous appuyerons sont résumées dans le tableau 8.1, et d'autres valeurs indicatives seront aussi utilisées pour mieux comprendre les différents scénarios.

Le tableau 8.1 fournit notamment les valeurs pour les budgets carbone et

¹³⁵ l'EASAC^{EAS18} qui conclut que « ces technologies offrent seulement un potentiel réaliste limité pour retirer du carbone de l'atmosphère, et pas à l'échelle envisagée dans certains scénarios climatiques. »

a. Cette valeur est obtenue en considérant que le secteur AFAUT suivra une trajectoire plus ambitieuse de réduction des émissions et deviendra stockeur de carbone.

pour les BECSC. Pour rappel, le budget carbone est la quantité nette de carbone que l'on peut émettre dans l'atmosphère (cf. la section 1.3.3). Ainsi, le budget carbone médian à +1,5 °C peut être respecté en émettant 380 GtCO₂ et sans rien retirer de l'atmosphère, ou bien en émettant (par exemple) 1380 GtCO₂ tout en développant des technologies à émissions négatives qui retirent 1000 GtCO₂ de l'atmosphère. Nous définissons alors le **budget carbone brut** comme la somme du budget carbone et de la quantité de CO₂ qui est retirée de l'atmosphère. Dans le cadre de ce rapport, nous considérerons uniquement de façon illustrative les BECSC comme puits anthropiques^a. L'intérêt est de pouvoir directement comparer des émissions brutes avec ce budget carbone brut.

8.2 Gouvernance de l'aviation internationale

Si les trajectoires du GIEC fixent des scénarios généraux, notamment en termes d'émissions mondiales de CO₂, ces scénarios ne sont pas systématiquement déclinés par secteur d'activité ou par pays. L'idée de l'accord de Paris est que chaque pays signataire fournit des contributions nationales déterminées (CDN) qu'il estime compatibles avec l'objectif global de l'accord. L'Union européenne a ainsi soumis une liste de CDN pour l'ensemble de ses membres, y compris la France, affichant l'objectif d'une réduction de 40 % de ses émissions domestiques de gaz à effet de serre en 2030 comparé à 1990, objectif par la suite remonté à 55 %^b.

Dans le cadre de l'accord de Paris, les émissions de l'aviation domestique, qui représente les vols au départ et à destination d'un seul et même pays, sont comptabilisées dans le bilan de chaque pays où le vol a lieu. L'aviation internationale, qui représente les vols dont les pays de départ et de destination sont différents, n'est quant à elle pas couverte par l'accord de Paris. En effet, les émissions de l'aviation internationale (comme les émissions de la marine internationale) ne sont pas pris en compte dans les inventaires nationaux faute d'accord sur le ou les pays auxquels ces émissions devraient être attribuées : au pays d'origine, de destination, au pays où est enregistré l'avion ou la compagnie aérienne, ou encore au pays où le kérosène a été acheté ? L'aviation internationale représentant environ 60 % des émissions totales de l'aviation commerciale, sa régulation est donc un problème important. Pour pallier ce problème, l'ONU a délégué à l'OACI la responsabilité de contrôler les émissions de l'aviation internationale dès la première conférence des parties en 1995^c. L'OACI s'est fixée en 2010 l'objectif « aspirational » (*aspirational goal* en anglais) de stabiliser les émissions de l'aviation internationale à partir de 2020 et parle ainsi à partir de cette date de croissance neutre en carbone^d. L'OACI a alors adopté en 2016 un système de compensation, CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), pour les émissions au-dessus du niveau de 2019^{eICA19b}.

a. Il serait par exemple possible de prendre en compte le secteur AFAUT ou bien la capture directe de carbone (DACCS pour *Direct Air Capture with Carbon Storage*).

b. [Intended Nationally Determined Contribution of the EU and its Member States](#), UNFCCC, 6 mars 2015, et [2030 climate & energy framework](#), Union européenne, consulté le 21 janvier 2021.

c. [Emissions from fuels used for international aviation and maritime transport](#), UNFCC, site consulté le 18 mai 2021.

d. [Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection — Climate change](#), OACI, 4 octobre 2013.

e. L'année de référence était initialement 2020 mais a été décalée à 2019 à cause de la crise

Cet objectif est en décalage important avec les objectifs globaux du GIEC qui préconisent une diminution drastique des émissions de CO₂ et non une stabilisation. L'industrie aéronautique s'est quant à elle fixée en 2009 un objectif plus ambitieux de diminution des émissions de 50 % à horizon 2050 par rapport à leur niveau de 2005^{IAT19,ATA20}.

L'Union européenne s'est de son côté dotée d'une politique plus volontariste et a ainsi inclus les vols intra-européens dans son système de quota carbone EU-ETS (pour l'anglais *European Union – Emissions Trading System*) depuis 2013. Les vols extra-européens en ont été exclus afin de laisser l'OACI mettre en place CORSIA^a. Depuis 2013, un quota gratuit de 38 MtCO₂ par an a été alloué à l'aviation (intra-européenne). Depuis, les émissions concernées ont crû de 53,5 MtCO₂ en 2013 à 67 MtCO₂ en 2018, obligeant ainsi les compagnies aériennes à acheter environ 100 millions de crédits carbone^b. À partir de 2021, le quota gratuit alloué à l'aviation diminuera de 2,2 % par an jusqu'en 2030, participant ainsi à l'objectif de réduction de 90 % des émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports. Enfin, il est important de noter que, tant pour CORSIA que pour EU-ETS, seuls les effets CO₂ de l'aviation sont pris en compte. Néanmoins, l'Union européenne a publié en 2020 un rapport sur les effets non-CO₂ qui étudie la question de leur prise en compte dans le cadre de l'EU-ETS^{ALO⁺20}.

8.3 Détermination de budgets carbone pour l'aviation

Dans cette section, nous détaillons la méthodologie qui sera utilisée pour définir ce que nous considérerons comme des trajectoires durables pour l'aviation. Pour cela, la notion de budget carbone est utilisée, à la fois pour +1,5 °C et pour +2 °C. Les scénarios seront majoritairement analysés du point de vue des émissions de CO₂. Deux sous-sections spécifiques viennent compléter cette partie : dans la section 8.3.3 nous présentons les méthodologies actuellement développées et utilisées pour intégrer les effets non-CO₂, et dans la section 8.3.4 nous discutons rapidement de la compensation carbone.

8.3.1 Calcul des budgets carbone mondiaux de référence

Comme expliqué dans la section 1.3.3, le GIEC a calculé des budgets carbone totaux qu'il est nécessaire de respecter pour atteindre l'objectif de l'accord de Paris, pour différentes températures et probabilités de réussite. Dans la suite, les budgets carbone mondiaux pour +1,5 °C et +2 °C sont considérés avec une probabilité de réussite de 50 % (ces budgets seront ainsi qualifiés de *médians*). Si l'horizon temporel de 2100 est adéquat pour des raisonnements climatiques, il paraît toutefois peu pertinent de présenter des trajectoires sur un horizon temporel aussi long pour des secteurs industriels tels que l'aviation. Nous ne

sanitaire.

a. [Reducing emissions from aviation](#) et [Emissions cap and allowances](#), Commission européenne, consultés le 21 janvier 2021.

b. [Allocation to aviation](#), Commission européenne, consulté le 29 mars 2021. Le lobby [Airlines for Europe](#) estime qu'entre 2013 et 2018, l'achat de ces crédits a coûté 1,3 milliards d'euros aux compagnies aériennes.

considérerons donc que des trajectoires jusqu'en 2050. La démarche d'obtention des budgets carbone mondiaux de référence est illustrée avec celui pour $+1,5\text{ }^\circ\text{C}$.

Fin 2017, le budget carbone mondial pour $+1,5\text{ }^\circ\text{C}$ valait $580\text{ GtCO}_2^{\text{RSJ}^+18}$ (pour avoir 50 % de chance d'atteindre l'objectif). Connaissant le montant des émissions de CO_2 pour les années 2018 et 2019, respectivement 42 GtCO_2 et 43 GtCO_2^4 , le budget carbone à partir de 2020 est donc de 495 GtCO_2^a . Par ailleurs, le GIEC indique que, sur l'échelle de temps que nous considérons (jusqu'à 2100), il faut retirer un « forfait » de 100 GtCO_2 pour prendre en compte les effets de rétroaction^b. On arrive alors à un budget global de 395 GtCO_2 entre 2020 et 2100^c, et on peut donc dire que l'accord de Paris (pour $+1,5\text{ }^\circ\text{C}$) vise à ce que les émissions cumulées de CO_2 restent sous ce seuil. Pour établir des trajectoires pour les émissions mondiales de CO_2 , nous avons supposé une décroissance à taux constant des émissions à partir de leur niveau de 2019 (soit 43 GtCO_2) de telle sorte que les émissions cumulées jusqu'en 2100 valent 395 GtCO_2 , ce qui impose un taux de décroissance d'environ 10 % par an^d. Nous trouvons ainsi que le budget carbone disponible jusqu'en 2050 s'élève à environ 380 GtCO_2 .

De la même façon, le budget carbone mondial pour $+2\text{ }^\circ\text{C}$ indiqué par le GIEC vaut 1500 GtCO_2 , duquel il faut déduire 190 GtCO_2 comme expliqué ci-dessus (émissions passées, boucles de rétroaction). Une décroissance des émissions d'environ 3 % par an permet d'utiliser ce budget à horizon 2100, et correspond à un budget à horizon 2050 égal à 860 GtCO_2 .

Pour prendre en compte l'éventuelle utilisation de BECSC, les budgets carbone bruts sont calculés et la même démarche est ensuite utilisée.

8.3.2 Calcul des budgets carbone pour l'aviation

Une fois le budget carbone mondial pour 2050 établi, il est nécessaire d'en attribuer une part à l'aviation. En effet, le budget carbone mondial ne présage en rien de la manière dont il est réparti entre les différents secteurs d'activité (sans parler d'une répartition géographique), notamment vis-à-vis du secteur aérien. **Le choix de cette part allouée est d'ordre politique (économique, sociétal, ...) et il n'appartient pas à ce rapport de la déterminer.** Par conséquent, dans la suite de ces travaux, la part du budget carbone mondial allouée à l'aviation commerciale sera considérée comme un paramètre que nous ferons varier afin de mener une analyse de sensibilité et d'étudier son influence, notamment sur le taux de croissance annuel du trafic aérien qu'il rend possible.

Si nous ne nous prononçons pas sur la part qui devrait être allouée au secteur aérien, une valeur de référence intéressante correspond à la part récente de

a. Cette valeur, calculée à partir des budgets carbone indiqués dans le rapport spécial $1,5\text{ }^\circ\text{C}$, est similaire à celle donnée dans le sixième rapport d'évaluation.

b. Ce « forfait » est justifié par la phrase suivante du résumé exécutif du chapitre 2 du cinquième rapport d'évaluation du GIEC^{RSJ+18} : « Remaining budgets applicable to 2100 would be approximately 100 GtCO_2 lower than this to account for permafrost thawing and potential methane release from wetlands in the future, and more thereafter. » Dans le récent sixième rapport d'évaluation du GIEC, ce forfait est nuancé et n'est pas systématiquement inclus. Par exemple, dans le cas du permafrost, la boucle de rétroaction induirait entre 11 et $150\text{ GtCO}_2\text{-eq}$ par degré supplémentaire.

c. Ce chiffre est comparable aux 390 GtCO_2 des scénarios P1 à P4, cf. tableau 8.1.

d. Cette valeur est supérieure aux 7 % annoncés à la section 8.1 car ici le secteur AFAUT suit une trajectoire de réduction des émissions similaire aux autres secteurs d'activités et ne permet pas de stocker du carbone.

Température	Part allouée au secteur aérien	Budget carbone du secteur aérien (GtCO ₂)
+1,5 °C	2,1 %	8,0
	2,6 %	10,0
	3,1 %	11,7
+2 °C	2,1 %	18,2
	2,6 %	22,8
	3,1 %	26,8

TABLEAU 8.2 – Exemples de budgets carbone pour l’aviation à horizon 2050 en fonction des températures de l’accord de Paris (en considérant les budgets carbone médians associés sans BECSC) et de la part allouée au secteur aérien.

l’aviation dans les émissions mondiales de CO₂. Pour rappel, nous avons calculé dans la section 2.2.5 que l’aviation commerciale avait représenté 2,6 % des émissions mondiales de CO₂ en 2018. Ce chiffre comprend les émissions liées à la combustion et à la production du kérosène ainsi qu’aux autres phases du cycle de vie des avions. 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 à la même vitesse à partir de 2018. Dans le cadre du scénario P1 par exemple, on a vu qu’il fallait que les émissions baissent de 90 % entre 2019 et 2050 pour passer de 43 à 4,3 GtCO₂ : si tous les secteurs d’activité (notamment l’aviation) faisaient baisser leurs émissions de 90 %, alors la part du budget carbone mondial allouée à chaque secteur serait exactement égale à sa part des émissions en 2019. Ainsi, dans le cadre de cette approche non différenciée, l’aviation se verrait allouer 2,6 % du budget carbone mondial.

Des allocations inférieures ou supérieures à cette valeur peuvent aussi être considérées, l’attribution d’une part plus grande à l’aviation nécessitant mécaniquement que d’autres secteurs d’activité réduisent leurs émissions plus vite que la moyenne. Sans se prononcer sur la part qui doit lui être allouée, il est néanmoins intéressant de rapporter les arguments qui reviennent régulièrement dans le débat public pour discuter de la part du secteur aérien :

- **il faut allouer plus au secteur aérien** car 1) c’est un secteur vital pour l’économie, 2) c’est un secteur parmi les plus difficiles à décarboner, 3) certains secteurs offriront des marges de manœuvre supplémentaires à d’autres secteurs, en raison de leur capacité à se décarboner à moindre coût ou plus rapidement, voire en devenant stockeurs de carbone comme potentiellement l’agriculture et la foresterie.
- **il faut allouer moins au secteur aérien** car 1) il s’agit d’un secteur non essentiel par rapport aux besoins primaires, 2) cette approche revient à récompenser les plus gros pollueurs et 3) l’approche différenciée du protocole de Kyoto exige plus de réduction de la part des secteurs avec une plus grande intensité d’émissions¹.

Proche du champ académique, des travaux s’intéressent actuellement aux méthodes d’allocation envisageables, à l’image d’un rapport au Parlement européen qui discute de différentes options possibles^{CGSC15} ou bien d’approches visant à optimiser l’emploi des ressources économiques disponibles sous contrainte d’un budget carbone total.

Une fois que le budget carbone mondial de référence et la part allouée au secteur aérien sont fixés, on peut alors calculer le budget carbone du secteur aérien à horizon 2050. Différentes valeurs sont rapportées dans le tableau 8.2, où trois valeurs de part allouée au secteur aérien sont considérées : la valeur de référence de 2,6 %, et deux valeurs correspondant à des variations (choisies de manière arbitraire) de $\pm 0,5$ %, correspondant à des valeurs de 2,1 et 3,1 %. Dans ce tableau nous considérons les deux valeurs extrêmes de température ($+1,5$ °C et $+2$ °C) mentionnées dans l'accord de Paris. Ainsi, si l'on considère le budget carbone mondial médian pour $+1,5$ °C et une allocation de 2,6 % pour le secteur aérien, on calcule un budget carbone pour $+1,5$ °C pour l'aviation de 10 GtCO₂. Au rythme des émissions de l'aviation en 2019, ce budget carbone serait entièrement consommé en environ 9 ans. Avec les mêmes hypothèses mais en considérant un réchauffement de $+2$ °C, on obtient un budget carbone pour l'aviation de 23 GtCO₂ à horizon 2050. En considérant les émissions de l'aviation en 2019, ce budget carbone serait entièrement consommé en environ 20 ans.

Par conséquent, en limitant l'étude au seul transport aérien, nous considérerons qu'un scénario de transition pour le secteur aérien sera aligné avec les objectifs de l'accord de Paris si les émissions cumulées de CO₂ de l'aviation jusqu'en 2050 ne dépassent pas le budget carbone considéré en fonction des différentes hypothèses faites, notamment sur la part allouée au secteur aérien.

Pour conclure cette discussion, on notera aussi une limitation de notre méthode, à savoir que le principe des CDN de l'accord de Paris stipule que chaque pays trace sa propre feuille de route pour diminuer ses émissions. On pourrait donc imaginer que chaque pays décide d'allouer à l'aviation un budget carbone différent. Par exemple, en France, l'aviation (domestique et internationale) représentait en 2018 5,5 % des émissions de CO₂ territoriales, ce qui pourrait donc justifier une part différente allouée au secteur aérien ^a.

8.3.3 Extension de la démarche aux effets non-CO₂

La notion de budget carbone est habituellement réservée aux seules émissions de CO₂. Cependant, les effets non-CO₂ représentant actuellement environ deux tiers de l'impact climatique de l'aviation, il est intéressant d'étendre la démarche pour adopter des approches qui permettent la prise en compte de ces effets dans les scénarios de transition. Deux approches sont présentées ci-dessous.

Une première méthodologie consiste à directement regarder la réponse aux scénarios de transition en termes de température. Cela a pour avantage de pouvoir directement comparer les valeurs avec des objectifs de température mais nécessite l'utilisation de modèles climatiques permettant de réaliser ces estimations. Cette méthodologie diffère de l'approche en budget carbone qui a pour avantage de se focaliser sur une comptabilité d'émissions, mais elle est plus proche de l'accord de Paris dont les objectifs sont exprimés en terme de température. Ce type d'approche, avec des modèles climatiques plus ou moins complexes, est par exemple utilisée dans de récents travaux du Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique (DLR)¹³⁶ ou de l'université d'Oxford^{KAL⁺21}.

Une seconde méthodologie consiste à comparer des émissions équivalentes avec des budgets carbone étendus aux effets non-CO₂. Ces budgets carbone étendus permettent d'intégrer les autres effets climatiques, comme les émissions de méthane, qui sont exclus des budgets carbone conventionnels. Les méthodes de

a. CITEPA, avril 2020 – Format Secten.

calcul des budgets carbone conventionnels, qui permettent d’obtenir les budgets carbone étendus, ne sont pas présentées ici ^a. Cette démarche a pour avantage de conserver la logique de budget carbone et de se passer de l’utilisation de modèles climatiques. Néanmoins, cette approche moins précise nécessite d’utiliser des métriques climatiques, telles que la métrique PRG* décrite dans l’annexe A, pour estimer des émissions équivalentes. L’impact en termes de température peut aussi être évalué à partir de ces estimations en fonction des métriques utilisées. Cette approche est par exemple développée dans des travaux récents de Planès *et al.*¹³⁹ et sera utilisée dans le chapitre 9 pour illustrer des scénarios incluant les effets non-CO₂.

8.3.4 Remarques sur la compensation

Dans ce qui précède, nous avons implicitement fait l’hypothèse d’une décision politique centralisée permettant de décider d’un budget carbone pour l’aviation. Une approche différente serait d’adopter une vision économique et de s’en remettre au marché via le mécanisme de compensation carbone, qui permet en effet aux compagnies aériennes d’augmenter leur budget carbone en achetant sur un marché des quotas d’émission. C’est la raison pour laquelle nous ne traitons pas explicitement de la compensation dans ce rapport : elle relève in fine d’un choix politique et comptable concernant la manière de répartir les émissions de CO₂. Dit autrement, dans ce rapport nous voyons la compensation comme un mécanisme qui permet d’ajuster le budget carbone du secteur aérien, et qui peut donc être prise en compte via le choix d’un budget carbone différent.

En théorie, le principe de la compensation peut sembler attractif (on rappelle que l’accord CORSIA instaurant ce mécanisme au niveau mondial va entrer en vigueur en 2021). La théorie économique sous-jacente montre en effet que la compensation devrait permettre d’optimiser la répartition des efforts des différents acteurs économiques pour réduire les émissions, et donc de maximiser la réduction des émissions pour un effort global donné. En pratique, l’efficacité des mécanismes de compensation dépend cependant très fortement de leurs modalités d’application concrètes (économiques et juridiques). Les premiers mécanismes mis en œuvre à ce jour font l’objet d’importantes critiques de la part de la société civile ^b, de la communauté scientifique¹⁴⁰⁻¹⁴² ^c et même du secteur aérien. Ainsi, le PDG de United Airlines a récemment déclaré que les mesures traditionnelles de compensation carbone n’ont presque rien fait pour éviter la hausse des émissions ^d.

a. Voir par exemple les travaux de Damon Matthews *et al.*¹³⁷ ou de Rogelj *et al.*¹³⁸ pour les détails de calcul.

b. Voir par exemple l’appel de 100 organisations pour interdire la compensation.

c. Voir aussi l’enquête du Guardian sur ce sujet, [Carbon offsets used by major airlines based on flawed system, warn experts](#), Patrick Greenfield, 4 mai 2021.

d. [United Airlines commits to reaching net-zero emissions by 2050 through carbon capture technology investment](#), GreenAir, 10 décembre 2020.

Chapitre 9

Analyse de scénarios pour l'aviation commerciale

Après une revue bibliographique sur le sujet en section 9.1, nous présentons dans ce dernier chapitre l'analyse de plusieurs scénarios prospectifs pour l'aviation commerciale, en grande partie centrée sur les émissions de CO₂. Ces études ont été effectuées à l'aide de CAST, un outil récemment développé à l'ISAE-SUPAERO dans le but d'aborder les thématiques aviation/climat. Trois grandes familles de scénarios durables sont considérées dans la section 9.2 puis un scénario industriel dans la section 9.3. Nous concluons le chapitre en discutant des problématiques complémentaires en section 9.4, notamment en ce qui concerne les effets non-CO₂ et la disponibilité des ressources énergétiques.

9.1 Revue bibliographique

Connaissant les impacts climatiques de l'aviation et les leviers d'action envisageables, de nombreux travaux se sont concentrés sur l'évaluation de scénarios prospectifs dès 1998¹⁴³. La majorité de ces études se placent dans le cadre d'une limitation du réchauffement climatique en deçà de +2 °C et prennent en compte uniquement les effets CO₂, ce qui ne permet donc pas de bien estimer les efforts à produire pour respecter l'accord de Paris qui est effectivement formulé en terme de température et non pas d'émissions de CO₂.

La méta-analyse de Gudmundsson et Anger¹⁴⁴ portant sur 30 scénarios différents (dont ceux de l'OACI), avec des taux annuels de croissance du trafic aérien situés entre 1,2 % et 4,6 %, montre que les améliorations technologiques incrémentales ne permettent pas d'abaisser les émissions du secteur aérien en 2050 sous leur niveau de l'an 2000. Le seul scénario avec croissance du trafic qui atteint cet objectif de réduction suppose une rupture technologique majeure avec l'avènement de l'hydrogène comme vecteur énergétique.

Dans son étude, Åkerman¹⁴⁵ conclut également sur la nécessité de stabiliser le nombre de vols par habitant à des niveaux légèrement supérieurs à ceux des années 2000 pour limiter la concentration atmosphérique de CO₂ à 450 ppm. Pour arriver à cette conclusion, il considère que le secteur aérien se voit allouer sa part de référence, *i.e.* il part du principe que les émissions allouées au secteur

aérien jusqu'en 2050 sont en proportion du budget carbone mondial à hauteur de la contribution qu'avait le secteur aérien en 2000, soit 2,7 %. Les scénarios envisagés n'incluent pas de rupture technologique telle que l'aile volante ou le moteur à hydrogène mais supposent plutôt une réduction de la vitesse de vol combinée à la conversion massive de la flotte au turbopropulseur. Åkerman justifie ce choix sur le niveau de risque : un tel scénario présente une très forte faisabilité contrairement aux scénarios basés sur les ruptures technologiques.

Plus récemment, les travaux de Terrenoire *et al.*¹⁴⁶ ont évalué différents scénarios à l'horizon 2100 et montrent que, selon le scénario de l'OACI basé sur une croissance du trafic aérien de 4,6 % par an et une amélioration de l'efficacité énergétique de 2 % par an, la contribution cumulée de l'aviation au réchauffement anthropique total sur la période 1940–2100 serait alors de 5,2 %. Or, la contribution de l'aviation sur la période 1750–2011 a été évaluée par Lee *et al.*⁹ à 3,5 % du réchauffement global, et ce en incluant les effets non-CO₂ qui ne sont pas pris en compte dans l'étude de Terrenoire *et al.* Ainsi, la contribution de l'aviation au réchauffement global augmenterait significativement à l'horizon 2100 avec le scénario de l'OACI. Parmi tous les scénarios étudiés par Terrenoire *et al.*, le plus ambitieux suppose une réduction linéaire des émissions à partir de 2020 jusqu'à atteindre en 2050 la moitié des émissions de 2005, mais il n'est pas précisé comment produire cette décroissance des émissions. Selon ce scénario, la contribution cumulée de l'aviation au réchauffement anthropique total à horizon 2100 ne serait plus que de 1,9 %, ce qui constituerait alors une réelle réduction par rapport à la période historique 1750–2011.

Grewe *et al.*¹³⁶ ont quant à eux évalué l'impact climatique de différents scénarios pour l'aviation en comparaison des objectifs de l'accord de Paris, en incluant l'ensemble des effets climatiques. En considérant des modèles climatiques et une allocation pour l'aviation de 5 % des objectifs en température de l'accord de Paris, ils sont en mesure d'évaluer la durabilité de scénarios pour l'aviation. Ils concluent notamment qu'il est peu probable que les objectifs industriels atteignent les cibles de l'accord de Paris. Ce résultat est similaire à celui du récent rapport de Lee^{Lee18} qui conclut que l'objectif de l'OACI de croissance neutre en carbone est incompatible avec l'accord de Paris. Grewe *et al.* considèrent aussi les objectifs plus ambitieux au niveau européen proposés par l'ACARE (*Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe*) et montrent que ceux-ci peuvent être compatibles avec les objectifs de l'accord de Paris. Les auteurs analysent enfin les hypothèses technologiques sur lesquelles les scénarios d'ACARE reposent et concluent que ces objectifs ne seront probablement pas atteints, remettant ainsi en cause la faisabilité de ces scénarios.

Une récente pré-publication de Klöwer *et al.*^{KAL+21} étudie quant à elle l'impact sur la température du trafic aérien, et plus précisément sur les 0,3 à 0,8 °C qui nous séparent des limites à +1,5 et +2 °C de l'accord de Paris. Les auteurs concluent que si le trafic aérien reprend sa trajectoire pré-COVID, alors l'aviation sera responsable d'entre 6 et 17 % de ces +0,3 à +0,8 °C. Ils mettent aussi en avant deux scénarios pour stabiliser l'impact en terme de température de l'aviation : une introduction massive de carburants bas-carbone de telle sorte que l'intensité carbone du kérosène soit diminuée de 90 %, ou bien une baisse du trafic de 2,5 % par an. Ces deux mesures ont notamment pour effet de diminuer le forçage radiatif des effets non-CO₂. Concernant la baisse du trafic, celle-ci ne pourrait être que temporaire afin de donner le temps au secteur aérien de développer des solutions technologiques durables^{KAL+21}.

Planès *et al.*¹³⁹ ont également analysé la compatibilité de plusieurs scénarios (dont un scénario proposé par l'ATAG) avec les objectifs de l'accord de Paris à l'aide de l'outil CAST^a, pour *Climate and Aviation – Sustainable Trajectories*, qui permet de simuler des trajectoires pour l'aviation et d'évaluer leur impact climatique. En attribuant un budget carbone à l'aviation de façon similaire à la démarche proposée dans la section 8.3, il est alors possible d'estimer avec CAST si le scénario étudié dépasse ou non le budget carbone alloué. Une approche similaire incluant les effets non-CO₂ y est aussi détaillée. Les principales conclusions de ces travaux seront détaillées dans ce chapitre.

Enfin, des travaux spécifiques se sont concentrés sur l'introduction de systèmes de compensation carbone tels que CORSIA ou EU-ETS mentionnés dans la section 8.2. Ces systèmes peuvent s'avérer nécessaires pour combler l'écart entre l'objectif fixé et la réduction des émissions réellement atteinte en 2050¹⁴⁷. L'étude de Scheelhaase *et al.*¹⁴⁸ compare ces deux mécanismes et montre que le système européen serait plus efficace que le système de compensation de l'OACI jusqu'en 2035 s'il était appliqué par tous les pays signataires de CORSIA. Ce scénario étant jugé peu probable, les auteurs concluent que le meilleur compromis pour l'Union européenne serait de garder EU-ETS pour les vols intra-communautaires et d'appliquer CORSIA pour les vols extra-européens. Un récent rapport de la Commission européenne conclut quant à lui « qu'un certain nombre de caractéristiques de CORSIA impliquent que son niveau d'ambition pour le secteur de l'aviation internationale n'est pas aligné sur le niveau d'ambition global requis pour respecter les objectifs de température de l'accord de Paris, et qu'il est plus faible que celui-ci » et que « participer à CORSIA – et laisser toute l'aviation internationale (telle que définie par l'OACI, y compris entre les pays de l'EEE) en dehors du champ d'application d'EU-ETS – risquerait de compromettre ces objectifs et d'affaiblir les politiques climatiques actuelles de l'UE »^{IAN+20}.

9.2 Exemples de scénarios durables

Dans cette section, différents scénarios technologiques de transition du secteur aérien sont étudiés et des analyses de sensibilité sur plusieurs variables sont menées. L'étude se focalise ici sur les émissions de CO₂, les effets non-CO₂ étant traités dans la section suivante. L'analyse se base sur la méthodologie présentée dans le chapitre 8 et sur l'utilisation de l'outil CAST.

9.2.1 Caractérisation des scénarios technologiques

L'objectif de cette section est d'illustrer différents scénarios durables pour l'aviation, qui ont été traités plus en détail dans Planès *et al.*¹³⁹. Ces scénarios technologiques sont décrits par les quatre caractéristiques suivantes :

1. efficacité énergétique des avions ;
2. taux de remplissage ;
3. opérations en vol et au sol ;
4. taux de décarbonation de la flotte.

a. L'outil CAST est disponible à l'adresse suivante : <https://cast.isae-superaero.fr/>.

On notera en particulier que le taux de croissance du trafic ne fait pas partie de la description d'un scénario. Ce taux sera calculé pour respecter les budgets carbone pour l'aviation (à +1,5 et +2 °C) définis dans la section 8.3, en considérant différentes allocations pour l'aviation. Une méthode alternative sera, à partir d'un taux de croissance du trafic fixé, de calculer la part du budget carbone mondial consommée. Concernant l'impact de l'épidémie Covid-19, on suppose que le trafic aérien retrouvera son niveau de 2019 en 2024.

Les trois premiers leviers concernent l'amélioration de l'efficacité énergétique globale afin de consommer moins de carburant par passager-kilomètre. D'une part, cela peut se faire au travers des moyens détaillés dans le chapitre 5, à savoir des améliorations incrémentales ou des ruptures technologiques sur les avions. L'évolution de cette efficacité par avion dépend à la fois des performances des futures architectures avion mais aussi de la rapidité de renouvellement de la flotte mondiale. D'autre part, l'amélioration de l'efficacité énergétique globale peut se faire en améliorant le taux de remplissage des avions (moins de sièges vides) mais aussi les opérations en vol et au sol. Ce dernier levier, non traité spécifiquement dans les leviers d'action de ce rapport, permet par exemple de réduire l'impact de la consommation des phases au sol et d'améliorer les trajectoires de vol pour minimiser la consommation de carburant.

Concernant la décarbonation, différentes notions doivent être définies. Nous introduisons tout d'abord la notion de taux de décarbonation d'un carburant comme la réduction du contenu en CO₂ de l'énergie utilisée par rapport au kérosène conventionnel. Ainsi, un taux de décarbonation de 50 % pour un carburant signifie qu'il émet 50 % de CO₂ en moins par rapport au kérosène, c'est-à-dire qu'il émet 43,4 gCO₂-eq/MJ en comparaison des 86,7 gCO₂/MJ du kérosène^a d'après les données de l'ADEME^b.

Nous définissons ensuite plus globalement le taux de décarbonation de la flotte comme la réduction du contenu en CO₂ moyen de l'énergie utilisée par l'ensemble de la flotte par rapport au kérosène conventionnel. Par conséquent, un taux de décarbonation de la flotte de 50 % peut avoir plusieurs significations, par exemple que l'ensemble de la flotte utilise un carburant dont le taux de décarbonation est de 50 % ou alors que la moitié de la flotte utilise un carburant dont le taux de décarbonation est de 100 % quand l'autre moitié utilise du kérosène.

Pour simplifier les analyses à venir, nous considérons que le seul carburant bas-carbone potentiellement utilisé par la flotte d'avions est un biocarburant obtenu par la voie Fischer-Tropsch, en considérant un rendement de production de 40 %. Nous considérons que le taux de décarbonation de ce carburant est de 75 %, soit environ 21,7 gCO₂-eq/MJ et par ailleurs, nous ne considérons pas de limite sur son taux d'incorporation. Par conséquent, il suffit de faire varier

a. Dans ce chapitre, les émissions de l'aviation sont exprimées en CO₂-eq puisqu'elles sont en partie dues à des biocarburants. Néanmoins, par simplicité et afin de ne pas avoir à rentrer dans le détail des proportions de ces émissions qui sont dues au CO₂ par rapport aux autres gaz à effet de serre, dans le reste du chapitre nous comparerons les émissions de l'aviation à différents budgets carbone même lorsque les émissions de l'aviation comprennent une partie d'autres gaz à effet de serre que le CO₂. Pour avoir un ordre de grandeur, Stratton *et al.* [SWH10, table 40] évaluent que pour un biocarburant produit à partir de millet vivace et de charbon, les émissions de CO₂ représentent de l'ordre de 90 % des émissions de CO₂-eq.

b. Une discussion sur les facteurs d'émission du kérosène est disponible dans l'annexe B.5.

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 %
Taux de décarbonation de la flotte en 2050	0 %	37,5 %	75 %
Facteur d'émission en 2050 (gCO ₂ -eq/pass.km)	89	52	17

TABLEAU 9.1 – Principales hypothèses technologiques pour les trois scénarios illustratifs étudiés à l'aide de CAST.

la part de la flotte qui utilise ce biocarburant d'ici 2050 pour obtenir le taux de décarbonation de la flotte. Par exemple, si la moitié de la flotte utilise ce biocarburant (et le reste du kérosène), le taux de décarbonation de la flotte est de 37,5 %. En particulier, dans tous nos résultats, le taux maximal de décarbonation de la flotte vaut 75 %.

Au-delà de ces quatre caractéristiques, des paramètres supplémentaires sont disponibles pour régler la temporalité des différents leviers d'action, tels que l'année de démarrage ou la vitesse de transition. La vitesse à laquelle ces différents leviers sont actionnés est discutée dans la partie 9.4.1, et les valeurs par défaut de CAST seront utilisées.

9.2.2 Description des scénarios technologiques

Nous considérons trois scénarios technologiques T, TD et RT, correspondant aux hypothèses suivantes :

Scénario tendanciel sans décarbonation (T) : amélioration tendancielle du taux de remplissage et de l'efficacité énergétique prenant en compte un ralentissement à cause de limites technologiques, pas d'amélioration des opérations ni d'utilisation de carburant bas-carbone ;

Scénario tendanciel avec décarbonation partielle (TD) : amélioration tendancielle du taux de remplissage et de l'efficacité énergétique prenant en compte un ralentissement à cause de limites technologiques, amélioration des opérations et utilisation de carburant bas-carbone pour la moitié de la flotte ;

Scénario rupture technologique et décarbonation totale (RT) : amélioration et ruptures technologiques pour l'efficacité énergétique, amélioration importante du taux de remplissage et des opérations et utilisation de carburant bas-carbone pour l'ensemble de la flotte.

Ces hypothèses sont décrites de manière quantitative dans les tableaux 9.1 et 9.2.

Ces hypothèses déterminent le facteur d'émission global de la flotte, exprimé en gramme de CO₂-eq par passager-kilomètre (gCO₂-eq/pass.km). Le scénario T est le moins ambitieux, avec un facteur d'émission de 89 gCO₂-eq/pass.km à horizon 2050 et le scénario RT est le plus ambitieux, avec un facteur d'émission de 17 gCO₂-eq/pass.km. À titre de comparaison, pour la flotte mondiale, le facteur d'émission moyen en 2019 était de 131 gCO₂-eq/pass.km quand les avions

Scénario	T	TD	RT
Efficacité énergétique			
Amélioration annuelle	1 %	1 %	1,5 %
Amélioration cumulée en 2035	14 %	14 %	20 %
Amélioration cumulée en 2050	26 %	26 %	36 %
Opérations			
Amélioration annuelle	0 %	0,28 %	0,43 %
Amélioration cumulée en 2035	0 %	6 %	9 %
Amélioration cumulée en 2050	0 %	8 %	12 %
Efficacité + Opérations			
Amélioration annuelle	1 %	1,28 %	1,92 %
Amélioration cumulée en 2035	14 %	19 %	27 %
Amélioration cumulée en 2050	26 %	32 %	44 %

TABLEAU 9.2 – Détails pour les scénarios T, TD et RT concernant l’amélioration de l’efficacité et des opérations.

de dernière génération permettent d’obtenir des facteurs d’émission inférieurs à 100 gCO₂-eq/pass.km.

Concernant les valeurs considérées pour l’efficacité énergétique, elles correspondent à une baisse de la consommation en 2050 de 26, 26 et 36 % pour les scénarios T, TD et RT, respectivement (cf. tableau 9.2). Dans le chapitre 5, nous avons vu que les différents leviers pour améliorer l’efficacité énergétique permettaient d’envisager de nouveaux avions à horizon 2035 consommant de l’ordre de 20 à 30 % de moins que les meilleurs avions actuels. Les hypothèses que nous faisons sont donc cohérentes avec ces chiffres, en prenant en compte le temps nécessaire pour le renouvellement de la flotte. Ensuite, les hypothèses faites concernant l’amélioration des opérations se basent sur des valeurs proches de celles de l’ATAG, autour de 10 %^{ATA20}. Les hypothèses sur le taux de remplissage correspondent à des hypothèses tendanciennes, un peu plus optimistes pour RT, prolongeant ainsi les tendances de la figure 3.2 (en 2018, le taux de remplissage moyen valait 82 %^a). Quant aux hypothèses faites sur le taux de décarbonation de la flotte, celles-ci sont plus délicates à interpréter car elles mélangent deux éléments. D’un côté, des carburants présentant un taux de décarbonation de 75 % existent déjà (des taux plus élevés sont même possibles) et des vols avec 100 % de biocarburants ont été effectués, ce qui permet d’envisager à très court terme un avion avec un taux de décarbonation de 75 %. Le passage à l’échelle pour toute une flotte dépend par contre d’autres facteurs, notamment le taux d’incorporation maximal autorisé, la capacité industrielle de production, la disponibilité en ressources énergétiques ainsi que l’évolution du trafic. Ces différents éléments sont discutés dans la section 9.4.3 et suggèrent qu’un taux de décarbonation de la flotte nul pour le scénario T est extrêmement pessimiste et qu’à l’inverse, l’hypothèse de 75 % pour RT est extrêmement optimiste notamment dans le cas d’un trafic en forte croissance.

L’intérêt d’établir plusieurs scénarios tient au fait que les améliorations technologiques futures sont très incertaines, tant en termes de gain que de temporalité. Ces scénarios illustratifs permettent donc de fournir des plages de variation envisageables.

a. Source : OACI via le site airlines.org, consulté le 25 août 2021.

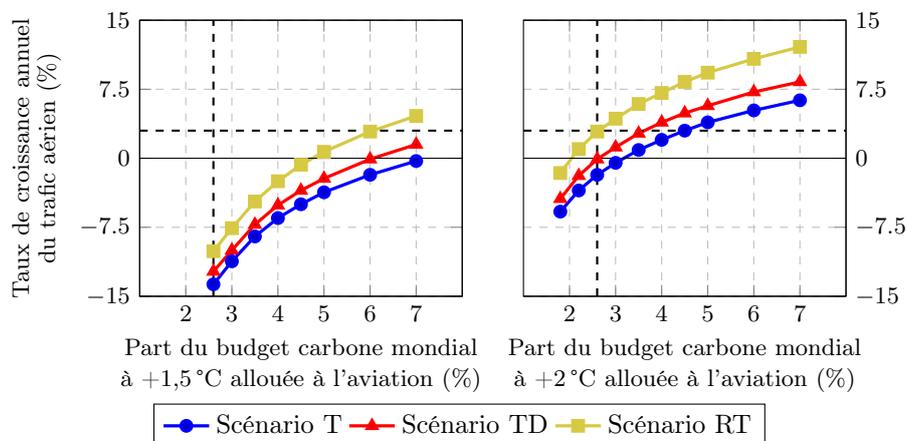


FIGURE 9.1 – Taux de croissance du trafic aérien en fonction de la part du budget carbone mondial allouée à l’aviation commerciale pour les scénarios T, TD et RT. Résultats donnés pour les budgets carbone médians pour +1,5°C (figure de gauche) et +2°C (figure de droite), sans considérer l’utilisation de BECSC. La ligne pointillée verticale représente la part de référence de 2,6 %, et la ligne pointillée horizontale représente le taux de croissance de 3 % annoncé par le secteur industriel. Résultats obtenus avec CAST.

9.2.3 Analyse de scénarios

Une fois les scénarios technologiques définis, plusieurs analyses peuvent être réalisées. Dans un premier temps, nous considérons le cadre du scénario P1 du GIEC, sans utilisation de BECSC. Les budgets carbone médians pour +1,5°C et +2°C sont considérés et la méthodologie présentée dans le chapitre 8 est utilisée. Une analyse de sensibilité est effectuée sur la part du budget carbone mondial allouée à l’aviation. Dans chaque cas et pour les trois scénarios technologiques illustratifs, le taux de croissance annuel maximal du trafic aérien est calculé afin d’équilibrer les émissions cumulées de l’aviation avec le budget carbone alloué jusqu’en 2050.

La figure 9.1 récapitule les résultats obtenus. On voit que, de façon logique, les scénarios technologiques plus ambitieux (par exemple RT au lieu de T) ou un objectif climatique moins contraignant (+2°C au lieu de +1,5°C) permettent d’obtenir des taux de croissance plus importants.

Pour un objectif climatique de +1,5°C, allouer à l’aviation une part plus importante que sa part actuelle de 2,6 % est nécessaire pour maintenir ou augmenter le trafic aérien, et ce quel que soit le scénario illustratif considéré. Ainsi, dans le cas du scénario RT, il faudrait doubler le budget carbone alloué à l’aviation pour espérer un taux de croissance tendanciel du trafic aérien, de l’ordre de 3% par an. La valeur exacte, ainsi que d’autres valeurs de la part du budget carbone consommée par l’aviation pour permettre une croissance du trafic de 3 % par an, sont fournies dans le tableau 9.3. En considérant la part de référence de 2,6 %, une forte décroissance du trafic aérien est nécessaire pour respecter le budget carbone alloué pour +1,5°C.

Pour un objectif à +2°C, les résultats sont plus nuancés. Une décroissance

Scénario	T	TD	RT
Budget carbone médian à +1,5 °C	10,2 %	8,2 %	6,0 %
Budget carbone médian à +2 °C	4,5 %	3,6 %	2,6 %

TABLEAU 9.3 – Part du budget carbone mondial consommée par l’aviation lorsque le trafic aérien croît de 3 % par an. Les budgets carbone médians sont utilisés sans considérer l’utilisation de BECSC.

du trafic aérien est nécessaire pour le scénario technologique le moins ambitieux T. En revanche, pour le scénario technologique le plus ambitieux RT, une croissance du trafic aérien proche de celle tendancielle est envisageable en allouant à l’aviation la part de référence de 2,6 % (cf. tableau 9.3). Cela correspond à un doublement du trafic par rapport à 2018 à horizon 2050. Avec le scénario RT, une stagnation ou une légère augmentation du trafic serait même possible en allouant à l’aviation une part plus faible que la part de référence, laissant ainsi des marges de manœuvre à d’autres secteurs.

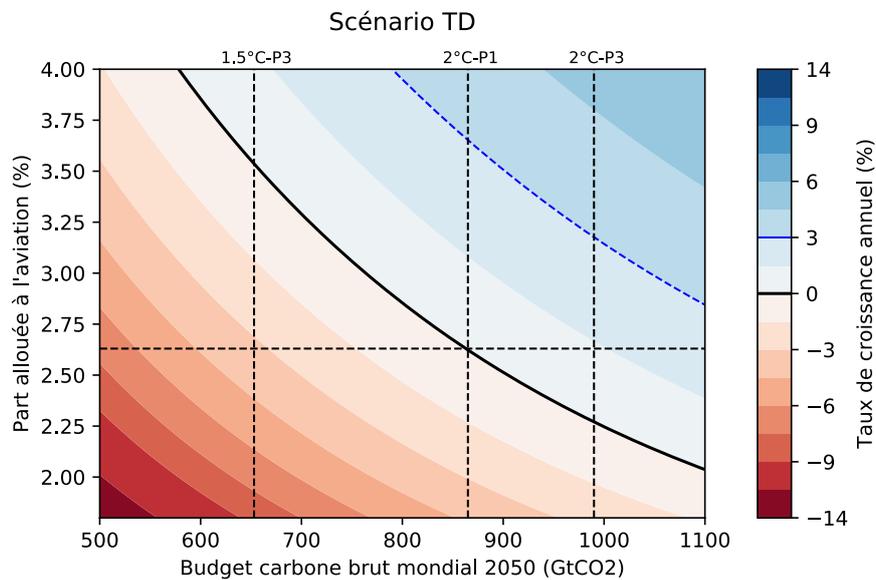
Les résultats ci-dessus se placent dans le cadre du scénario P1 du GIEC et ne prennent donc pas en compte l’utilisation potentielle de BECSC. Ceux-ci ont pour influence d’augmenter le budget carbone brut (cf. tableau 8.1), ce qui justifie de faire une analyse de sensibilité pour différents budgets carbone bruts. Outre la prise en compte de BECSC, cela permet aussi de considérer de multiples cibles de température ainsi que des probabilités de réalisation différentes. La figure 9.2 récapitule les résultats dans le cas des scénarios technologiques TD et RT. Les résultats sont présentés sous la forme d’une figure reliant les budgets carbone brut mondiaux, la part allouée à l’aviation et les taux de croissance du trafic aérien. Ces figures permettent de retrouver les résultats obtenus pour les budgets carbone médians sans BECSC et de les étendre à d’autres budgets carbone brut avec BECSC. Ils permettent aussi de faciliter des arbitrages entre plusieurs variables. Il est intéressant de noter que, pour un scénario technologique plus ambitieux, les lignes de niveau sont décalées vers le coin inférieur gauche du graphe. Cela permet par exemple de respecter un objectif climatique plus contraignant à part allouée et taux de croissance du trafic aérien fixes.

Néanmoins, deux limites demeurent sur l’analyse de ces scénarios illustratifs. D’une part, ces scénarios ne considèrent que les émissions de CO₂. Une étude synthétique et illustrative incluant l’ensemble des effets non-CO₂ est fournie dans la section 9.4.2. D’autre part, les scénarios TD et RT nécessitent l’utilisation de carburants bas-carbone pour alimenter la flotte d’avions. Pour chaque scénario, il est alors nécessaire d’évaluer la quantité de ressources énergétiques nécessaires pour l’aviation et de comparer cette valeur avec les disponibilités prévues au niveau mondial à horizon 2050. Ces aspects-là sont étudiés dans la section 9.4.3.

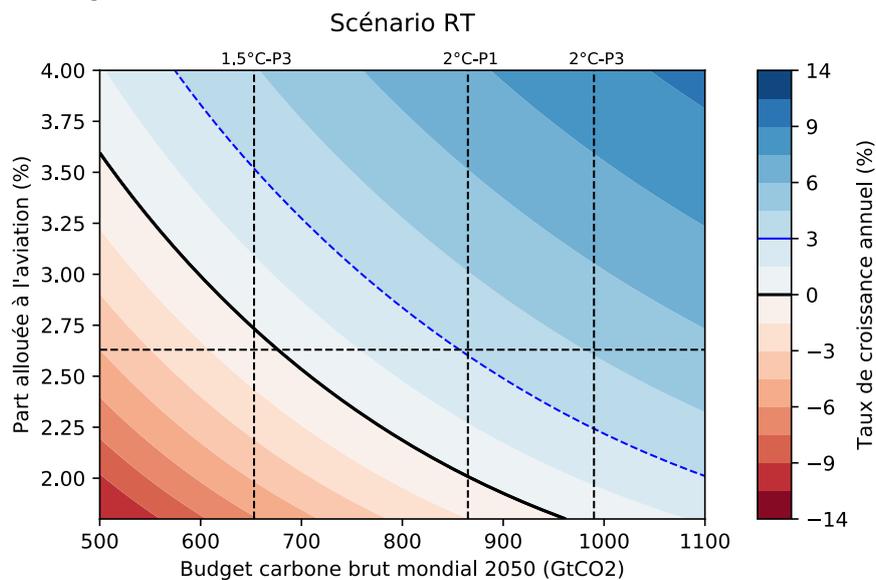
9.3 Analyse d’un scénario industriel

9.3.1 Scénario 1 de Waypoint 2050

Nous analysons dans cette section un scénario proposé par l’ATAG dans son récent rapport Waypoint 2050^{ATA20}, à savoir le scénario 1, « pushing technology and operations ». Les scénarios industriels sont importants car ils sont souvent



(a) Taux de croissance annuel durable du trafic aérien en fonction des budgets carbone bruts considérés pour le scénario TD.



(b) Taux de croissance annuel durable du trafic aérien en fonction des budgets carbone bruts considérés pour le scénario RT.

FIGURE 9.2 – Analyse de sensibilité sur les budgets carbone bruts mondiaux pour les deux scénarios de transition TD et RT. Pour un budget carbone brut mondial considéré et une part allouée à l'aviation, les simulations réalisées avec CAST donnent le taux de croissance annuel du trafic aérien correspondant. La ligne horizontale en pointillés indique la part des émissions de CO₂ du transport aérien en 2018 qui s'établit à 2,6 %. Les lignes verticales en pointillés indiquent différents budgets carbone bruts médians calculés à horizon 2050 : celui pour +2 °C sans BECSC utilisé précédemment (noté 2 °C-P1) et ceux pour +1,5 °C et +2 °C avec les valeurs des BECSC du scénario P3 du GIEC (notés 1,5 °C-P3 et 2 °C-P3). La ligne bleue en pointillés indique le taux de croissance annuel tendanciel de 3 % prévu par le secteur industriel.

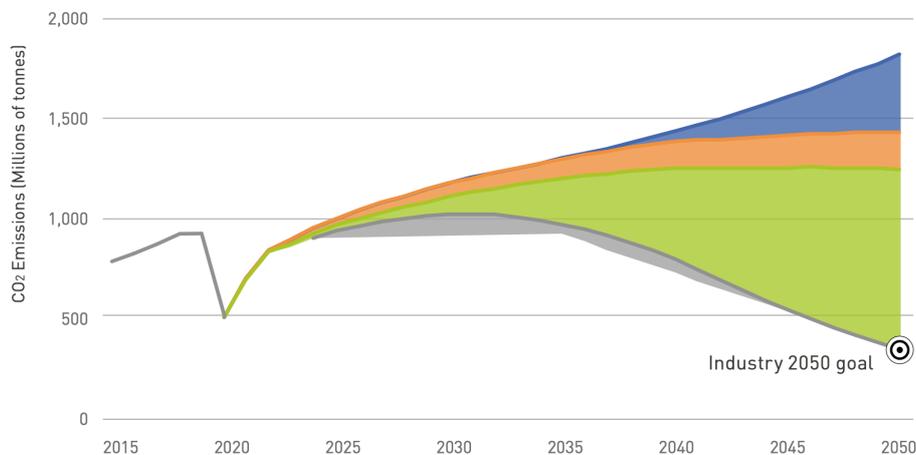


FIGURE 9.3 – Scénario 1 « Pushing technology and operations » du rapport Waypoint 2050 d'ATAG, avec une croissance annuelle du trafic prise à +3 %. Les améliorations technologiques (bleu), des opérations (orange), l'utilisation de SAF (vert) et la compensation carbone (gris) permettent de faire diminuer les émissions. D'après ATAG^{ATA20} (p. 24).

convergentes avec ceux de l'OACI. L'OACI a par exemple repris en 2019 l'objectif exprimé par l'IATA en 2009 d'une croissance neutre en carbone à partir de 2020^a et a notamment mis CORSIA en place dans ce but. Ce scénario, dont les émissions sont représentées sur la figure 9.3, repose sur cinq hypothèses :

1. croissance du trafic de 3 % par an^b ;
2. amélioration des opérations (décarbonation du roulage, optimisation des routes, ...)
3. amélioration du taux de remplissage ;
4. développement prioritaire d'avions électriques et hybrides dans la catégorie des avions de courte distance franchissable et de moins de 100 places avec une entrée en service à partir de 2035/2040 ;
5. approche rétrospective^c de l'effort restant (réduction de CO₂ d'environ 900 Mt) pour atteindre l'objectif : une fourchette de 290 Mt à 390 Mt (360 Gt à 490 Gt) de SAF avec un facteur de réduction des émissions de 74 % à 100 % d'ici 2050.

Par ailleurs, des mesures de compensation carbone (en gris sur la figure 9.3) sont aussi envisagées mais jouent un rôle marginal puisque, par définition de l'approche rétrospective, le taux de décarbonation est vu comme une variable

a. Pour l'OACI, cf. le *Working Paper ICAO A40-WP/54*, [ICAO Global Environmental Trends – Present And Future Aircraft Noise And Emissions](#), du 5 juillet 2019. IATA s'est fixé en 2009 l'objectif plus ambitieux de réduction des émissions de 50 % en 2050 par rapport au niveau de 2005^{IAT19}.

b. Cette prévision de croissance correspond à une révision des objectifs pré-Covid, qui étaient de l'ordre de +4,5 %.

c. L'approche rétrospective, ou *backcasting*, consiste à estimer la quantité de SAF nécessaire pour atteindre l'objectif climatique fixé. Elle s'oppose donc à l'approche prospective qui consiste à partir d'estimations de la quantité de SAF disponible, et d'en déduire les conséquences climatiques.

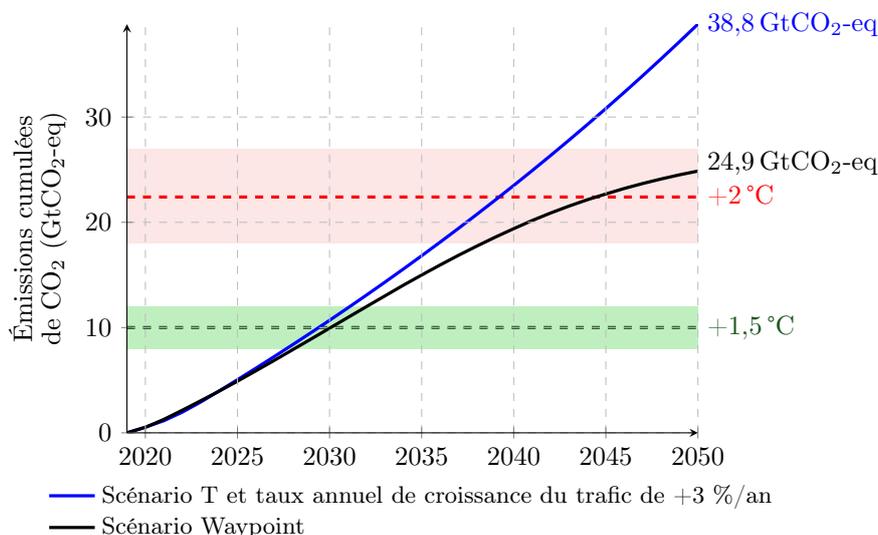


FIGURE 9.4 – Évolution des émissions de CO₂ cumulées pour le scénario industriel présenté (courbe noire). Le scénario technologique tendanciel (T), présenté dans la section précédente, avec une croissance annuelle de 3 %, est fourni en comparaison (courbe bleue). Les zones horizontales colorées correspondent à des intervalles de budget carbone alloué à l'aviation. Ces intervalles sont calculés en allouant entre 2,1 et 3,1 % du budget mondial à l'aviation et en partant des budgets carbone à +1,5°C (zone verte) et +2°C (zone rouge) avec 50 % de chance de réussite. Les lignes pointillées représentent le budget carbone de référence correspondant à une allocation de 2,6 % du budget carbone mondial à l'aviation.

d'ajustement pour remplir les objectifs climatiques. Qualitativement, ce scénario se rapproche du scénario RT présenté précédemment.

9.3.2 Analyse climatique du scénario industriel

À partir de la figure 9.3, les émissions cumulées de CO₂ générées par l'aviation ont été estimées pour ce scénario industriel. Afin d'avoir une base de comparaison pour mesurer l'impact des améliorations technologiques prévues, ces émissions sont comparées sur la figure 9.4 au scénario T avec la même croissance du trafic aérien (3 % par an).

Il est intéressant de remarquer que le scénario industriel permet de réduire significativement les émissions cumulées du transport aérien jusqu'en 2050 en comparaison avec le scénario tendanciel, mais que des différences significatives entre les deux scénarios n'apparaissent qu'après 2030. Néanmoins, malgré les améliorations technologiques, ce scénario requiert une allocation différenciée des budgets carbone pour +1,5°C et pour +2°C. En effet, dans le cadre de ce scénario, il faudrait allouer à l'aviation 6,6 % et 2,9 % des budgets carbone médians pour +1,5°C et +2°C respectivement, soit plus que la part de référence de 2,6 %. Avec l'allocation de référence de 2,6 %, le budget carbone pour +1,5°C serait entièrement consommé en 2030 pour le scénario industriel.

9.3.3 Critiques méthodologiques

Le scénario industriel analysé présente plusieurs problèmes méthodologiques. Tout d’abord, les émissions rapportées sont uniquement celles liées à la combustion^a. Or, comme expliqué dans la section 2.2.2, l’impact des biocarburants n’est pertinent que sur l’ensemble du cycle de vie du kérosène, *i.e.* lorsque l’on considère aussi les émissions de CO₂ hors combustion, ce qui rajoute environ 20 %. Les émissions de ce scénario sont donc sous-évaluées.

Ensuite, ATAG compare les émissions de 2050 à des émissions définies dans deux scénarios de l’AIE limitant le réchauffement à +2 °C pour justifier que la trajectoire proposée est compatible avec l’accord de Paris. Or, +2 °C n’est qu’une borne supérieure mentionnée dans l’accord de Paris, et ce sont bien les émissions cumulées, et non celles d’une année donnée, qui comptent.

Par ailleurs, certaines données nécessaires à l’évaluation du scénario Waypoint 2050 sont manquantes, comme par exemple les hypothèses faites sur l’amélioration de l’efficacité avant 2035 ou encore l’évolution du taux de remplissage. Cela empêche une modélisation précise de ce scénario dans CAST et nous ne pouvons donc pas l’analyser aussi finement que les scénarios T, TD et RT. Il n’est par exemple pas possible d’opérer une analyse de sensibilité sur la part du budget carbone allouée à l’aviation et le taux de croissance du trafic comme nous l’avons fait dans le tableau 9.3.

Pour finir, l’approche rétrospective ne rend pas fidèlement compte du réalisme de la trajectoire en sur-estimant l’impact de la décarbonation : nous reviendrons plus en détails sur ce point dans la section suivante.

9.4 Études complémentaires

Suite à l’analyse des différents scénarios présentés précédemment, plusieurs analyses complémentaires sont effectuées dans cette section. Premièrement, l’impact d’une mise en place plus précoce des mesures de décarbonation est étudié. Deuxièmement, une étude de sensibilité sur le taux de décarbonation de la flotte est réalisée afin d’aborder les problématiques de limites en ressources énergétiques.

9.4.1 Impact de la temporalité

Étant donné que ce sont les émissions cumulées de CO₂ qui comptent pour les enjeux climatiques, et non la seule valeur finale atteinte en 2050, la temporalité de la mise en place des mesures de décarbonation est un enjeu essentiel.

Pour illustrer ce phénomène, le scénario technologique RT est considéré, tout comme un budget carbone médian pour +2 °C et la part de référence de 2,6 % du budget carbone mondial alloué à l’aviation. En plus du scénario de référence dit « standard », un autre dit « accéléré » comporte les mêmes caractéristiques technologiques mais permet une mise en place des mesures de décarbonation du carburant plus précoce de 3 ans. La figure 9.5 représente l’évolution pour les deux scénarios du contenu en CO₂ de l’énergie pour l’ensemble de la flotte.

a. En effet, ATAG considère les émissions de l’aviation commerciale (excluant le militaire et le privé) égales à 0,9 GtCO₂ en 2018, alors que sur l’ensemble du cycle de vie elles ont été de l’ordre de 1,1 GtCO₂ (cf annexe B.5).

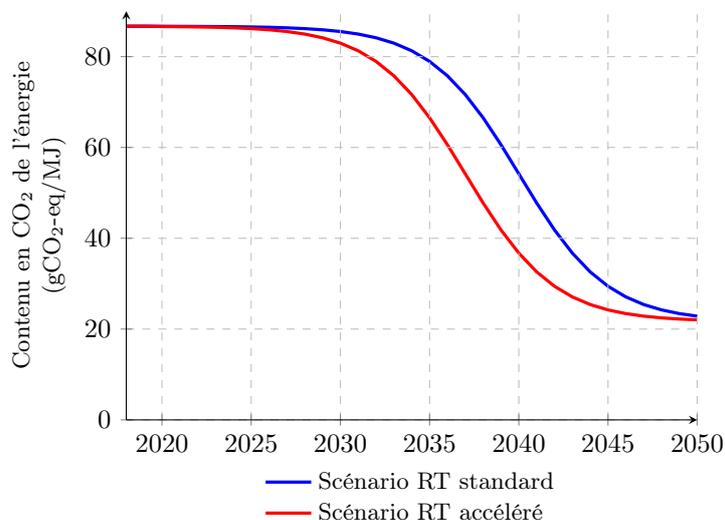


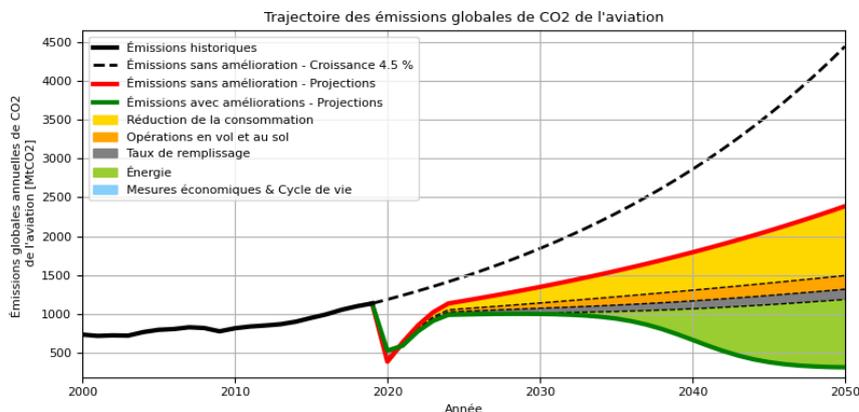
FIGURE 9.5 – Évolution du contenu en CO₂ de l'énergie pour les deux scénarios RT.

Ce paramètre permet d'évaluer les émissions de CO₂ du carburant par unité d'énergie (MJ), en incluant la production du carburant. Il s'agit d'une valeur moyenne pour l'ensemble de la flotte.

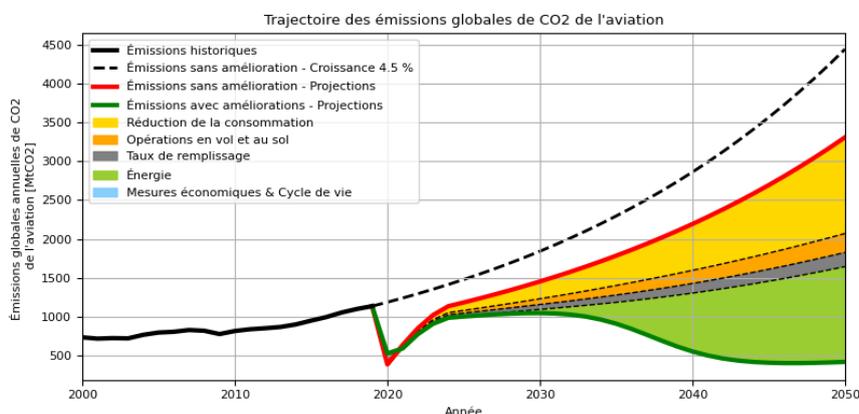
La figure 9.6 représente les deux versions du scénario RT. D'une part, la figure 9.6a représente la trajectoire des émissions annuelles de CO₂ dans le cadre du scénario RT dit « standard », avec une croissance annuelle du trafic de 2,9 %, permettant d'équilibrer les émissions cumulées avec le budget carbone alloué à l'aviation. D'autre part, la figure 9.6b représente quant à elle la trajectoire des émissions annuelles de CO₂ dans le cadre du scénario RT dit « accéléré ». L'apparition des carburants bas-carbone avant 2035 est bien visible sur la figure (en vert), contrairement au scénario RT « standard ». Dans ce cas, une croissance annuelle du trafic de 4,2 % permet d'équilibrer les émissions cumulées avec le budget carbone alloué à l'aviation. En effet, l'utilisation plus précoce des carburants bas-carbone dans ce second scénario permet d'obtenir une croissance annuelle du trafic aérien plus importante pour un même budget carbone.

Il est important de noter que le scénario RT « standard » est celui qui correspond à la temporalité envisagée par différents acteurs de l'aviation. En effet, en reprenant les données issues de CAST et en considérant uniquement des SAF, le scénario RT « standard » nécessiterait 4,7 Mt de SAF en 2030 contre 16,1 Mt pour le scénario RT « accéléré ». Cette fourchette de 5 Mt à 16 Mt, et notamment sa valeur basse, est compatible avec différentes projections d'acteurs de l'aviation détaillées dans la partie 9.4.3.

Ce résultat peut être généralisé à l'ensemble des leviers d'action. Plus une mesure est précoce, meilleur est son impact puisque ce sont les émissions cumulées qui comptent. L'impossibilité de mettre en place rapidement des ruptures technologiques est une des raisons qui explique la difficulté pour décarboner l'aviation. Ainsi, en dehors du cas des carburants alternatifs bas-carbone, l'avion à hydrogène est un excellent exemple pour illustrer cet aspect-là puisqu'il n'est attendu qu'au plus tôt en 2030.



(a) Trajectoire des émissions de CO₂ du scénario RT standard pour +2 °C.



(b) Trajectoire des émissions de CO₂ du scénario RT accéléré pour +2 °C.

FIGURE 9.6 – Influence de la temporalité d'introduction de carburants bas-carbone dans le scénario RT pour +2 °C. L'introduction plus précoce des carburants bas-carbone permet une croissance plus importante du trafic aérien pour le même objectif climatique. Courbes obtenues avec CAST.

9.4.2 Prise en compte des effets non-CO₂

Dans les parties précédentes, les travaux se sont concentrés sur l'étude des émissions de CO₂ du secteur aérien. L'objectif de cette partie est de fournir des éléments de réflexion sur l'intégration des effets non-CO₂ dans les scénarios climatiques de transition.

La méthodologie utilisée est plus complexe que l'utilisation des budgets carbone conventionnels^a. L'approche consiste à comparer un budget carbone étendu intégrant les effets non-CO₂, introduit à la section 8.3.3, avec les émissions cumulées équivalentes de CO₂ de l'aviation jusqu'en 2050. Ces dernières sont calculées à partir de la métrique climatique PRG*, définie dans l'annexe A, et exprimées en GtCO₂-eq*^b. Dans la suite, cette méthodologie est considérée

a. La méthodologie est détaillée dans les travaux de Planès *et al.*¹³⁹

b. Cette unité, qui permet d'exprimer des émissions équivalentes calculées avec la métrique

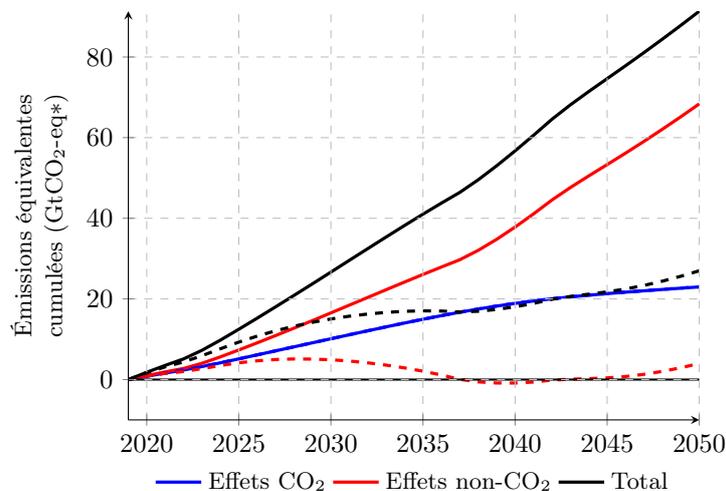


FIGURE 9.7 – Émissions cumulées en GtCO₂-eq* pour le scénario RT (lignes pleines) et le scénario RT incluant des stratégies sur les traînées de condensation (lignes pointillées). Les émissions équivalentes des effets non-CO₂ peuvent devenir négatives en utilisant la métrique PRG*, ce qui peut être assimilé à un retrait de carbone de l’atmosphère.

avec des budgets carbone médians sans BECSC. Par exemple, le budget carbone étendu (intégrant les effets non-CO₂) est alors estimé à 981 GtCO₂-eq* pour +2 °C.

Le scénario technologique RT est pris comme exemple d’application. Deux cas sont étudiés ici : le scénario illustratif présenté précédemment et ce même scénario en intégrant des stratégies pour réduire les effets non-CO₂. Ici, ces stratégies se focalisent sur les traînées de condensation en considérant un des scénarios de Teoh *et al.*¹²³ : les stratégies de déviation des trajectoires sont généralisées, ce qui permet de réduire l’impact climatique des traînées de condensation de 59,4 % au coût d’une surconsommation de kérosène pour l’ensemble de la flotte de 0,014 %. Dans les deux cas, le taux de croissance annuel est fixé à 2,9 %, ce qui permettrait de respecter le budget carbone pour +2 °C avec une part de 2,6 % allouée à l’aviation.

La figure 9.7 représente les émissions cumulées équivalentes pour les deux scénarios. Les émissions cumulées de CO₂ sont quasi égales, la stratégie pour réduire l’occurrence des traînées de condensation n’entraînant qu’une légère surconsommation. En revanche, elle permet de réduire significativement les émissions cumulées équivalentes totales, via les émissions équivalentes non-CO₂, passant de 91,3 GtCO₂-eq* à 27,0 GtCO₂-eq*. Ce deuxième scénario consommerait donc 7,5 % et 2,7 % des budgets carbone étendus pour +1,5 °C et +2 °C respectivement. À titre de comparaison, en incluant les effets non-CO₂, l’aviation commerciale est responsable de 5,1 % du réchauffement climatique récent (2000–2018).

Il est intéressant de noter que les émissions équivalentes pour les effets non-CO₂ peuvent devenir négatives, comme illustré à la figure 9.7. Dans certains

PRG*, est souvent notée GtCO₂-we pour *warming-equivalent*.

cas, cela peut même entraîner des émissions équivalentes totales négatives, ce qui correspond à une baisse de l'impact climatique de l'aviation par rapport à 2018. Par exemple, le scénario technologique T, avec un taux de croissance annuel de -1,8 % (qui permettrait de respecter le budget carbone pour +2°C avec une part allouée de 2,6 %) et la stratégie de réduction des traînées de condensation, aboutit à des émissions équivalentes totales de -2,4 GtCO₂-eq*.

Cette étude synthétique permet donc de mettre en avant plusieurs conclusions particulièrement intéressantes. Tout d'abord, les stratégies recourant aux déviations de trajectoires pour éviter la formation des traînées de condensation peuvent être mises en place très rapidement. En raison de la courte durée de vie de ces effets non-CO₂, on constate qu'il est possible de limiter le réchauffement climatique futur induit par l'aviation, voire même de réduire cet impact et donc de générer un refroidissement relatif par rapport à 2018 (mais toujours un réchauffement au global). **Les stratégies spécifiques aux effets non-CO₂ représentent donc à court terme un puissant levier pour atteindre les objectifs de l'accord de Paris en terme de température.** Néanmoins, des stratégies ambitieuses doivent aussi être mises en place simultanément sur la réduction des émissions de CO₂, pour ne pas substituer le réchauffement dû aux effets non-CO₂ par un réchauffement dû aux émissions de CO₂, qui impacte plus fortement l'augmentation de température à long terme¹⁴⁹.

Des limites à ces analyses doivent toutefois être mentionnées. L'impact des carburants alternatifs sur les effets non-CO₂ n'est pas estimé ici alors que certains, comme les biocarburants, pourraient diminuer les traînées de condensation. Des travaux s'intéressent actuellement à des méthodes pour estimer ces impacts¹³⁶. De plus, les méthodologies d'évaluation utilisées nécessitent encore d'être affinées et les scénarios d'être plus exhaustifs.

9.4.3 Étude du taux de décarbonation de la flotte

Dans les scénarios étudiés précédemment, le taux de décarbonation de la flotte a une influence prépondérante sur le niveau de trafic aérien durable. Nous étudions ici ce taux de décarbonation en deux temps : nous estimons tout d'abord les taux envisageables à partir des prévisions de biocarburants disponibles, puis nous effectuons une analyse de sensibilité pour étudier l'influence du taux de décarbonation sur le taux maximal de croissance du trafic et les ressources énergétiques.

Prévisions de production de biocarburants

La colonne « Prévision » du tableau 9.4 rassemble plusieurs estimations de production de biocarburants à horizon 2030 et 2050, au niveau mondial et au niveau européen. Ces prévisions sont issues de la littérature scientifique ou d'acteurs de l'aviation. Pour évaluer la disponibilité en biocarburants, la méthodologie scientifique la plus utilisée consiste à partir de la disponibilité en biomasse, puis de déterminer la part qui sera transformée en biocarburant pour l'aviation en appliquant plusieurs filtres successifs.

Staples *et al.*¹⁵⁰ considèrent ainsi trois filtres et trois hypothèses pour chacun. Le premier filtre est la bioénergie totale, pour laquelle ils considèrent les hypothèses S1 (510 EJ), S2 (178,7 EJ) et S3 (41,0 EJ). Ces estimations en bioénergie sont compatibles avec les valeurs des différents scénarios du GIEC, dé-

Scénario	Prévision (EJ/an)	Taux de dé-carbonation
Monde (2030)		
ATAG (approche rétrospective) ^{ATA20}	1,3 à 2,1	6 à 11 %
ATAG (approche tendancielle) ^{ATA20}	0,1 à 0,3	0 à 2 %
OACI ^{ICAI9c}	0,0 à 0,2	0 à 1 %
Monde (2050)		
ATAG (approche rétrospective) ^{ATA20}	11,3 à 16,9	42 à 63 %
ATAG (approche tendancielle) ^{ATA20}	0,8 à 2,9	3 à 11 %
Staples (estimations F1) ¹⁵⁰	7,0 à 80,4	26 à 75 %
Staples (estimations F2) ¹⁵⁰	0,6 à 15,4	2 à 58 %
Staples (estimation centrale) ¹⁵⁰	5,9	22 %
Searle et Malins ¹⁵¹	~ 1 à 3	~ 1 à 2 %
Europe (2030)		
EASA extrapolé ^{EAS19}	0,0 à 0,2	0 à 5 %
de Jong ^{dHv⁺17}	0,1 à 0,6	3 à 17 %
ICCT ^{OPS21}	0,1 à 0,2	2 à 4 %

TABLEAU 9.4 – Prévisions de disponibilité en biocarburants au niveau mondial et au niveau européen, en 2030 et 2050, et taux de décarbonation de la flotte correspondant. Des informations complémentaires sont fournies dans le corps du texte pour les références de Staples et de Searle et Malins, ainsi que pour le calcul du taux de décarbonation. Seules les estimations sous l’hypothèse F1 de Staples prévoient une offre de biocarburants supérieure à la demande du secteur aérien considérée dans Waypoint 2050. Les chiffres de l’ICCT contiennent une petite partie (3 %) d’électrocarburants.

taillées dans le tableau 8.1. Le deuxième filtre est le prix de la bioénergie, les trois hypothèses sont A1 (4 \$/GJ), A2 (2 \$/GJ) et A3 (1 \$/GJ). Le troisième filtre est la part de la bioénergie allouée à l’aviation, les trois hypothèses sont F1 (la bioénergie est allouée en priorité au secteur aérien, les autres secteurs demandeurs de bioénergie se partageant le reliquat), F2 (les différents secteurs sont servis au prorata de leur demande énergétique) et F3 (les autres secteurs sont prioritaires sur l’aviation, qui ne peut donc qu’utiliser la bioénergie restante). La quantité de biocarburant disponible en fonction des hypothèses est représentée sur la figure 9.8.

Deux études bibliographiques concluaient en 2014 et 2015 qu’il serait très incertain de disposer de plus de 300 EJ de bioénergie en 2050^{107,152}, ce qui justifie d’écarter l’hypothèse S1. Cette valeur maximale de 300 EJ est cohérente avec la valeur maximale de bioénergie dans les scénarios P1 à P4 (275 EJ, cf. tableau 8.1). Concernant les règles d’allocation du filtre F, il existe des problématiques similaires à celles présentées dans le chapitre 8 concernant les budgets carbone. Dans le cas de l’hypothèse F3, où les autres secteurs sont prioritaires, l’aviation ne disposerait d’aucun biocarburant (c’est pour cette raison que l’hypothèse F3 n’apparaît pas sur la figure 9.8). Quant à l’hypothèse F1, elle correspond à une borne supérieure difficilement atteignable^a.

a. Pour illustrer la concurrence pour les biocarburants, il est intéressant de considérer qu’en 2018, seuls 0,01 % des biocarburants ont été destinés au secteur aérien^{IEA19b} alors que l’aviation a représenté 12 % de la consommation énergétique du secteur des transports selon l’AIE. Ces chiffres expliquent pourquoi nous considérons l’hypothèse F1 comme une borne

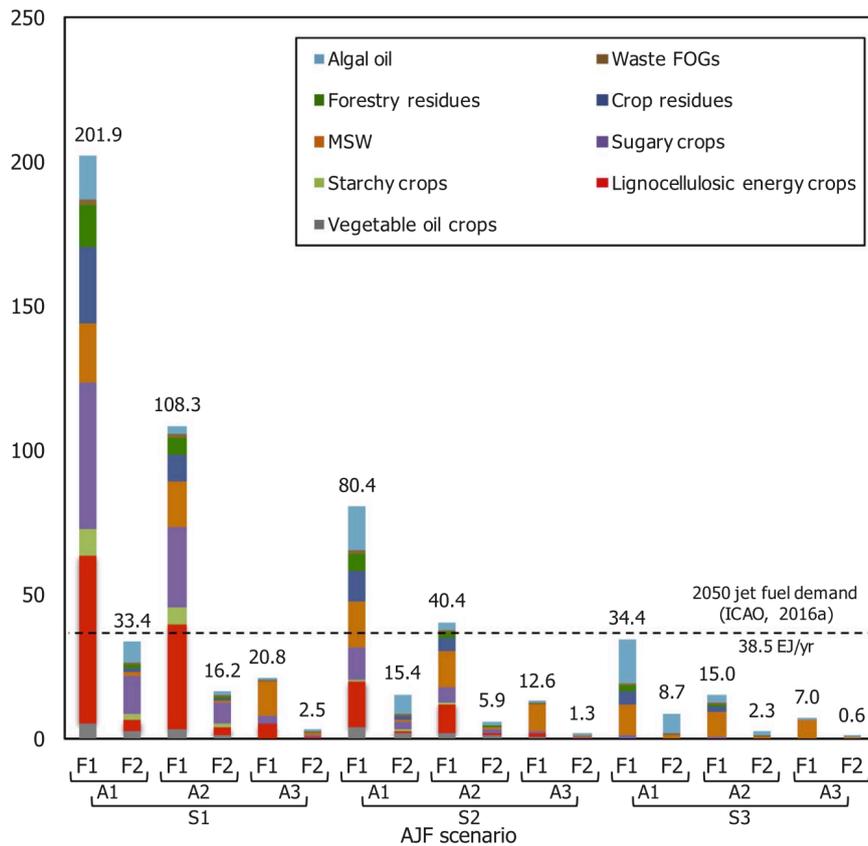


FIGURE 9.8 – Quantité de biocarburant (EJ) disponible pour l’aviation en 2050 en fonction de différents scénarios. D’après la figure 5 de Staples *et al.*¹⁵⁰. La demande en carburant projetée pour 2050 par l’OACI diffère de celle utilisée dans le tableau 9.4 en raison de prévisions plus récentes issues de Waypoint 2050 (38 EJ pour Staples *et al.* contre 19,9 EJ pour Waypoint 2050).

En conséquence, nous nous concentrerons sur les hypothèses S2 ou S3, A1, A2 ou A3 et F1 (en tant que borne supérieure) ou F2 (en tant que valeur médiane)^a qui sont les seules pour lesquelles les prévisions sont rapportées dans le tableau 9.4. Parmi les douze scénarios qui résultent de la combinaison de ces hypothèses, six aboutissent à une estimation compatible avec les estimations rétrospectives d'ATAG. Dans ces dernières, une seule n'est pas une borne supérieure et correspond à l'hypothèse F2 : il faut 178 EJ de bioénergie et qu'elle soit valorisée à 4 \$/GJ. Staples *et al.* notent que ce scénario nécessite de construire 110 nouvelles bioraffineries par an, chiffre qu'ils mettent en regard des 60 raffineries de biodiesel qui sont entrées en service chaque année entre 2002 et 2011.

Searle et Malins¹⁵¹ s'intéressent quant à eux à la bioénergie qui sera disponible en 2050 de manière générale, sans se focaliser sur l'aviation. Ils appliquent une méthode similaire à Staples *et al.* mais avec des filtres différents, par exemple la productivité agricole ou la stabilité politique. Ils considèrent plusieurs études antérieures qu'ils corrigent en appliquant les filtres éventuellement manquants, et concluent qu'entre 60 EJ à 120 EJ de bioénergie pourraient être disponibles. Ce chiffre est compatible avec la borne supérieure de 300 EJ mentionnée précédemment et couvre les valeurs des scénarios P1, P2 et P3 du GIEC du tableau 8.1. Ils considèrent alors la concurrence des usages pour la bioénergie et estiment qu'entre 10 EJ à 20 EJ (soit 8 à 17 % de la bioénergie totale) pourraient être alloués au secteur des transports. C'est donc le gisement pour lequel le secteur aérien serait en concurrence avec le transport routier, ferroviaire et maritime. Le secteur aérien représentant environ 10 % de l'énergie du secteur des transports, cela suggère un gisement potentiel de quelques exajoules pour l'aviation et d'au plus une dizaine en donnant la priorité à l'aviation. En comparaison, l'approche rétrospective d'ATAG en nécessite plusieurs dizaines.

Ces considérations montrent que la demande énergétique du secteur aérien pourrait se heurter à des limites de disponibilité énergétique et pourraient remettre ainsi en question les estimations hautes de production de biocarburants, notamment celles de l'approche rétrospective d'ATAG qui ne les prennent pas en compte. Tabler sur un scénario de croissance du trafic reposant sur un déploiement massif de biocarburants présente le risque que le problème climatique soit exacerbé si la production des biocarburants ne suit pas la trajectoire prévue. Ce risque lié à la nature même des scénarios scientifiques prospectifs dépasse le simple cadre des biocarburants, et a par exemple récemment été questionné par un ancien président du GIEC^b.

Si nous nous sommes concentrés dans ce qui précède sur les biocarburants, cette remarque s'applique aussi aux vecteurs énergétiques à base d'électricité comme l'hydrogène et les électrocarburants. Le récent rapport du consortium Clean Sky effectué par le cabinet de conseil McKinsey sur l'avion à hydrogène évalue ainsi un besoin en électricité situé entre 75 EJ à 112 EJ pour alimenter la flotte d'avions de 2050 avec un mix d'hydrogène et d'électrocarburant^{McK20}. Ce

supérieure.

a. Il serait intéressant d'enrichir cette discussion d'une hypothèse « intermédiaire » entre F1 et F2. On pourrait par exemple prendre en compte le fait que des secteurs, comme le secteur routier, disposent de plus de possibilités de décarbonation que le secteur aérien, en particulier à base d'électricité. Cela pourrait justifier que le secteur aérien dispose d'une part de la bioénergie plus importante que sa part de demande énergétique actuelle. En fait, des arguments similaires à ceux évoqués dans la section 8.3.2 s'appliquent dans les deux sens.

b. Source : [Climate scientists: concept of net zero is a dangerous trap](#), James Dyke, Robert Watson et Wolfgang Knorr, The Conversation, avril 2021.

chiffre est significatif puisqu'il représente entre 45 et 70 % des 160 EJ d'électricité produite dans P1, ou encore entre 30 et 45 % des 245 EJ d'électricité produite dans P4.

Taux de décarbonation envisageables

Pour passer de la production de biocarburants à une estimation du taux de décarbonation (de la flotte), il faut faire des hypothèses sur le taux de décarbonation du carburant ainsi que sur la demande énergétique. Pour le taux de décarbonation du carburant, nous prendrons comme dans le reste du chapitre une hypothèse de 75 %. Pour la demande totale au niveau mondial, nous avons utilisé les prévisions industrielles fournies dans Waypoint 2050, soit 15,3 EJ en 2030 et 19,9 EJ en 2050, et pour la demande européenne en 2030 nous avons utilisé l'estimation de l'ICCT^{OPS21} de 2,7 EJ. La dernière colonne du tableau 9.4 indique le taux de décarbonation obtenu. Par exemple, les travaux de Staples *et al.* permettent d'aboutir à un taux de décarbonation de 2 à 58 % en considérant une répartition au prorata, et des taux qui peuvent atteindre 75% en considérant des allocations prioritaires en bioénergie. Au vu des autres estimations présentées, les valeurs basses ne peuvent pas être exclues.

Ces résultats reposent sur une hypothèse de croissance du trafic : si le trafic croît moins vite que les prévisions industrielles, alors toutes choses égales par ailleurs, cela augmente le taux de décarbonation de la flotte. Nous analysons dans la partie suivante les liens entre taux de décarbonation, taux de croissance et demande énergétique.

Analyse de sensibilité du taux de décarbonation

Les discussions précédentes montrent que le taux de décarbonation de la flotte envisageable en 2050 est très incertain. L'objectif de la partie précédente était de fournir les paramètres majeurs et des fourchettes envisageables. Ce taux de décarbonation dépendra du taux de croissance du trafic aérien, des ressources énergétiques allouées à l'aviation ou de paramètres économiques comme le prix de la bioénergie.

Une analyse de sensibilité peut en revanche être réalisée sur le taux de décarbonation. Nous étudions plus précisément ici l'impact du taux de décarbonation sur le taux de croissance du trafic aérien ainsi que sur la consommation d'énergie primaire. En effet, un taux de décarbonation de la flotte élevé permet un trafic plus élevé tout en respectant un budget carbone donné, mais un trafic plus élevé engendre à son tour une consommation accrue de carburants et donc d'énergie primaire. Pour obtenir des ordres de grandeur, nous considérons de façon illustrative les budgets carbone médians sans BECSC avec l'allocation de référence de 2,6 % au transport aérien. Concernant les hypothèses technologiques, un scénario similaire au scénario TD est étudié, mais dont le taux de décarbonation de la flotte varie. Ainsi, l'efficacité énergétique est améliorée de 1 % par an et en 2050, le taux de remplissage atteint 89 % et les opérations réduisent la consommation de 8 %. Nous faisons alors varier le taux de décarbonation de la flotte en 2050 entre 0 % (pas de biocarburant) et 75 % (que du biocarburant). Le scénario TD correspond donc au cas où le taux de décarbonation vaut 37,5 %.

Les résultats sont représentés sur la figure 9.9 et le tableau 9.5. La courbe de gauche de la figure 9.9 représente le taux de croissance annuel du trafic

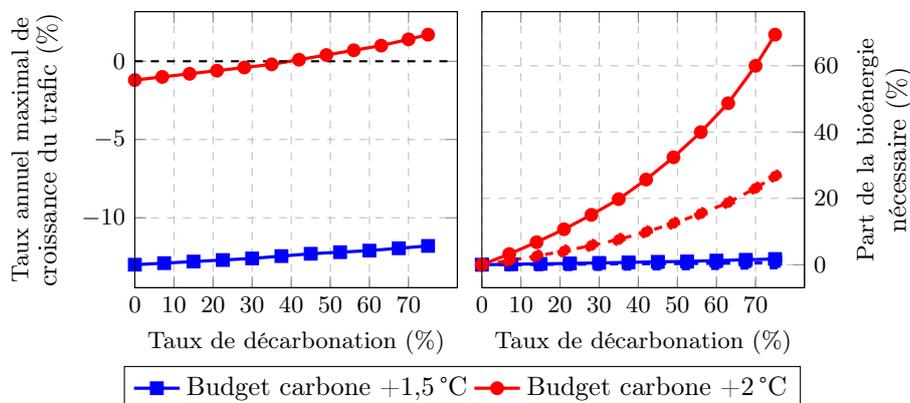


FIGURE 9.9 – Résultats pour le scénario TD avec un taux de décarbonation variable. Figure de gauche : taux maximal de croissance du trafic en fonction du taux de décarbonation (cf. le tableau 9.5 pour les valeurs extrêmes). Figure de droite : part de la bioénergie nécessaire par rapport aux scénarios P1 (ligne pleine) et P3 (ligne pointillés) en fonction du taux de décarbonation.

Taux de décarbonation de la flotte	0 %	75 %
Budget carbone +1,5 °C	-13 %	-11,8 %
Budget carbone +2 °C	-1,2 %	1,7 %

TABLEAU 9.5 – Résultats pour le scénario TD avec un taux de décarbonation variable. Taux maximal de croissance annuelle du trafic aérien en fonction du budget carbone pour des valeurs extrêmes de taux de décarbonation de la flotte. Ainsi, si le taux de décarbonation atteint 75 % (tout le kérosène a été remplacé par des biocarburants), alors dans le cadre du scénario TD, le trafic pourrait croître de 1,7 % par an tout en respectant le budget carbone à +2 °C.

aérien qui permet d'équilibrer les émissions cumulées avec les budgets carbone, pour différents taux de décarbonation de la flotte. Dans l'optique de limiter le réchauffement à +1,5 °C, un taux de décarbonation de 75 % (donc toute la flotte utilise du biocarburant), impose un taux de croissance de -11,8 % par an. L'impact de la décarbonation est assez faible, puisqu'un taux de croissance de -13 % par an serait nécessaire sans aucune mesure de décarbonation. En revanche, dans l'optique d'un réchauffement de +2 °C, la décarbonation a un impact plus fort : sans décarbonation, le trafic devrait décroître de 1,2 % par an, alors qu'un taux de décarbonation de 75 % permet une croissance du trafic de 1,7 % par an.

La courbe de droite de la figure 9.9 représente quant à elle la part des ressources énergétiques consommées par rapport à la quantité totale disponible, en fonction du taux de décarbonation considéré. On voit notamment une différence très nette entre les objectifs à +1,5 et +2 °C, ainsi qu'une croissance très rapide de la part des ressources en fonction du taux de décarbonation. Ces deux comportements illustrent le même phénomène, à savoir qu'un taux de décarbonation plus élevé permet une augmentation du taux de croissance du trafic, et donc une pression sur les ressources énergétiques accrue de manière exponentielle. À l'inverse, si le trafic décroît fortement comme c'est le cas dans le cas

d'un objectif à +1,5 °C, alors la pression sur les ressources décroît de manière encore plus forte et devient très faible.

Limites de cette analyse

Les résultats de cette section visent à fournir des ordres de grandeur significatifs et mériteraient d'être approfondis. Tout d'abord, il serait intéressant d'affiner les méthodes d'allocation de ressources énergétiques : quelle part de la biomasse (ou plus globalement des ressources énergétiques) est-il envisageable d'allouer à l'aviation ? Il s'agit d'une question complexe dont la réponse dépend des besoins et des alternatives technologiques des autres secteurs d'activités mais aussi de choix politiques et économiques. Ensuite, une analyse de sensibilité plus poussée sur les limites de disponibilité pour la biomasse permettrait d'obtenir des résultats similaires à ceux sur les budgets carbone. Ici, seules deux études ont été menées, une avec la prévision de production de bioénergie du scénario P1 et l'autre avec celle du scénario P3, correspondant à une valeur médiane de la littérature scientifique de l'ordre de 100 EJ. Enfin, il conviendrait d'inclure dans cette étude plus de vecteurs énergétiques bas-carbone et de les combiner : d'autres biocarburants que ceux produits par la voie Fischer–Tropsch, l'hydrogène et les électrocarburants, qui nécessitent des matières premières différentes et ont des facteurs d'émissions différents.

Cinquième partie

Conclusion et perspectives

Conclusion

Contexte

Dès 1965, un rapport au président américain Lyndon B. Johnson mettait en garde contre la hausse des températures induite par une augmentation de la concentration du CO₂ atmosphérique^{Mac65}. Depuis, le constat scientifique s'est fait d'année en année à la fois plus précis et alarmant, poussant par exemple plus de 15 000 scientifiques à publier un avertissement à l'humanité en 2017¹⁵³. Selon le GIEC, limiter le réchauffement à 1,5 °C nécessite « des transitions rapides et profondes dans les systèmes énergétiques, terrestres, urbains et d'infrastructures (y compris les transports et les bâtiments), et industriels [...] ». Ces transitions systémiques sont sans précédent en termes d'échelle, mais pas nécessairement en termes de vitesse, et impliquent d'importantes réductions des émissions dans tous les secteurs, un large portefeuille d'options d'atténuation et une augmentation significative des investissements dans ces options [...]. »^{IPC18}. Respecter l'accord de Paris et parvenir à la neutralité carbone dans la deuxième moitié du XXI^e siècle nécessite ainsi de faire baisser dès aujourd'hui les émissions mondiales de CO₂ à un rythme comparable à la baisse des émissions en 2020 suite à la crise sanitaire mondiale.

Bien que le secteur aérien ne soit responsable que de moins de 3 % des émissions mondiales de CO₂, il joue un rôle particulier dans le débat public et scientifique. Sur les quatorze rapports spéciaux du GIEC, « L'aviation et l'atmosphère planétaire » de 1999^{PLG+99} est ainsi le seul qui porte sur un secteur économique spécifique. Dès 1968, Lozano *et al.*¹⁵⁴ s'interrogeaient sur les pollutions induites par les émissions des avions et Sawyer publiait en 1970 un article intitulé « Reducing jet pollution before it becomes serious »¹⁵⁵. Si le secteur aérien avait donc conscience de ces enjeux bien avant le rapport du GIEC, ce n'est que récemment qu'ils se sont imposés dans le débat public et à mesure que les conséquences du changement climatique se font plus pressantes, on observe une polarisation croissante de ce débat. Le présent document s'inscrit dans ce contexte, et vise à rendre accessible l'état de l'art des connaissances scientifiques sur ce sujet en pointant à la fois les opportunités et les limites du secteur aérien pour rendre son impact compatible avec l'accord de Paris.

Impact climatique

Le secteur aérien contribue à accentuer le réchauffement climatique de deux manières décrites dans la deuxième partie du rapport : les effets CO₂ correspondent aux émissions de CO₂ dues à la combustion du kérosène mais aussi à sa production, et les effets non-CO₂ correspondent aux autres émissions (notamment NO_x et suie) ainsi qu'aux traînées de condensation. Les effets non-CO₂ sont majoritairement causés par les traînées de condensation, et ils sont à peu près deux fois plus forts que les effets CO₂. Les effets CO₂ et non-CO₂ sont de nature fondamentalement différente : les effets CO₂ sont cumulatifs et de long terme, et dépendent donc de la valeur cumulée des émissions, alors que les effets non-CO₂ sont instantanés et de court terme, et dépendent donc notamment de la variation du nombre de traînées de condensation.

Le secteur aéronautique a considérablement amélioré l'efficacité des avions ainsi que de nombreux autres facteurs opérationnels. Ainsi, entre le début des années 1970 et 2018, l'intensité énergétique (mesurée en MJ/pass.km) a été réduite de presque 80 % et le taux de remplissage moyen est passé de moins de 60 % à plus de 80 %. Néanmoins, ces améliorations n'ont pas suffi à compenser la hausse du trafic qui a été multiplié par 12 dans le même laps de temps, ce qui a contribué à augmenter les émissions de CO₂ du secteur sur cette période.

De façon quantitative, les émissions de CO₂ de l'aviation globale, dues à la combustion du kérosène, sont passées de 0,37 GtCO₂ à 1,0 GtCO₂ entre 1970 et 2018, ce qui correspond à 2,4 % des émissions mondiales de CO₂ en 2018. En intégrant aussi les effets non-CO₂, l'aviation est responsable de 3,8 % du réchauffement climatique anthropique depuis le début de l'ère industrielle. Sa part récente est plus importante et peut par exemple être estimée à 4,8 % sur la période 2000–2018. En limitant l'étude à l'aviation commerciale et en intégrant les émissions de l'ensemble du cycle de vie, le transport aérien a émis 2,6 % des émissions mondiales de CO₂ en 2018 et sa part récente sur l'ensemble du réchauffement anthropique est estimée à 5,1 % sur la période 2000–2018.

Pour atténuer l'impact climatique de l'aviation, des leviers sont envisagés pour diminuer les effets CO₂ et non-CO₂.

Effets non-CO₂ : des stratégies prometteuses

Deux leviers principaux pour lutter contre les effets non-CO₂ ont été discutés dans le chapitre 7. D'une part, les émissions non-CO₂ des carburants alternatifs sont différentes de celles du kérosène d'origine fossile. Les biocarburants contiennent par exemple moins d'aromatiques ce qui fait que leur combustion émet moins de suie, la combustion de l'hydrogène émet moins de NO_x (mais plus de vapeur d'eau) alors qu'un avion tout électrique n'aurait aucun rejet atmosphérique direct. Ainsi, ces carburants alternatifs pourraient avoir un rôle bénéfique d'atténuation des effets non-CO₂. L'impact de ces solutions demande encore à être évalué précisément, en particulier 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. Elles reposent par exemple sur la modification de la trajectoire des avions : en effet, les traînées de condensation n'évoluent en cirrus avec un fort impact climatique que sous certaines

conditions météorologiques particulières. Or, seule une petite fraction des vols est responsable de la majorité des traînées de condensation, ce qui ouvre la porte à des stratégies efficaces d'évitement de traînées en modifiant la trajectoire d'un faible nombre de vols au prix d'une très faible surconsommation.

Un avantage majeur de ces stratégies est qu'elles pourraient avoir un effet significatif sur le climat à court terme. En effet, en raison de la courte durée de vie de ces effets non-CO₂, la généralisation de ces stratégies entraînerait rapidement une limitation voire une réduction du réchauffement climatique causé par l'aviation par rapport à 2018.

À l'heure actuelle, ces pistes semblent très prometteuses pour diminuer significativement et rapidement les effets non-CO₂. Des travaux sont néanmoins encore nécessaires pour confirmer ces résultats scientifiques récents, ainsi que pour élaborer des scénarios de déploiement. Par ailleurs, ces solutions ne peuvent se substituer aux mesures pour réduire les émissions de CO₂, qui sont prépondérantes à long terme sur l'évolution de la température.

Effets CO₂ : des opportunités technologiques...

Comme pour tous les autres secteurs liés à l'énergie, trois leviers sont à la disposition du secteur aérien pour diminuer ses émissions de CO₂ : amélioration de l'efficacité (utiliser moins d'énergie pour faire le même trajet), décarbonation (utiliser des vecteurs énergétiques bas-carbone pour remplacer le kérosène fossile) et sobriété (limitation, voire baisse du trafic). Nous avons détaillé les deux premiers leviers dans la troisième partie du rapport, considérant dans la quatrième partie le niveau de trafic comme une variable d'ajustement permettant de respecter un objectif climatique donné.

Les leviers technologiques pour améliorer l'efficacité des avions sont nombreux, les principaux étant présentés dans le chapitre 5. Ils incluent l'amélioration des moteurs, de l'aérodynamique de l'avion et des systèmes avion ainsi que l'allègement des aéronefs. Ils permettent d'envisager d'ici à 2035 de nouveaux avions qui consommeraient de 20 à 30 % de moins que les meilleurs avions actuels. Par ailleurs, de nouvelles architectures (par exemple de type aile volante), en rupture par rapport à l'architecture classique *tube-and-wing* en vigueur depuis le début de l'aviation moderne dans les années 1960, permettent d'envisager des gains d'efficacité encore plus importants.

Concernant la décarbonation du carburant, trois vecteurs énergétiques potentiellement bas-carbone, présentés dans le chapitre 6, sont actuellement envisagés pour décarboner le secteur aérien : l'électricité, l'hydrogène et les kérosènes de synthèse (bio- et électrocarburants). Développer des avions tout électriques et des avions à hydrogène représentent de grands défis d'ingénierie. Pour l'avion à hydrogène par exemple, cela nécessite de revoir toute l'architecture de l'avion pour accommoder le volume plus important de l'hydrogène et trouver des solutions aux nombreux problèmes posés par son stockage et sa distribution sous forme liquide à -253 °C . Les kérosènes de synthèse possèdent eux l'immense avantage d'être *drop-in*, *i.e.* de pouvoir être utilisés directement dans les avions actuels, contrairement à l'hydrogène qui nécessite le développement de nouveaux avions ainsi que de nouvelles infrastructures de transport et aéroportuaires.

Sous certaines conditions, ces vecteurs énergétiques alternatifs peuvent permettre de diminuer les émissions de CO₂ de l'aviation. Pour les biocarburants,

cela nécessite de choisir des matières premières qui sont effectivement bas-carbone, comme des huiles de cuisson usagées, des résidus forestiers ou agricoles ou certaines cultures bioénergétiques particulières comme le miscanthus ou le saule. Ces matières premières peuvent typiquement permettre une diminution des émissions de CO₂ de l'ordre de 75 % sur l'ensemble du cycle de vie, voire agir comme des puits de carbone. Pour l'électricité, l'hydrogène et les électrocarburants, l'énergie « primaire » dont ils seront issus est l'électricité. Dans ce cas, les gains en terme d'émissions de CO₂ dépendent donc de l'intensité carbone du mix électrique et peuvent être substantiels pour une électricité produite à partir d'énergies bas carbone.

... limitées par la rapidité et l'ampleur de leur déploiement

Ces différentes solutions permettent d'envisager un avion émettant beaucoup moins de CO₂ qu'actuellement, par exemple une aile volante propulsée avec de l'hydrogène bas-carbone. Néanmoins, la situation climatique est urgente : le budget carbone mondial à 1,5 °C sera entièrement utilisé en moins de 10 ans au rythme des émissions pré-covid, ce qui nécessite que les émissions commencent à décroître dès à présent et de manière significative, à un taux comparable à celui engendré par la crise sanitaire (~7 %). Par ailleurs, plus cette baisse des émissions démarrera tardivement plus elle devra être forte : Åkerman calculait en 2011 qu'il faudrait que les émissions diminuent de 3,7 % par an si elles commençaient à baisser à partir de 2010, de 5,3 % par an à partir de 2015 et de 9 % par an à partir de 2020¹⁵⁶. Or les émissions n'ont pas baissé depuis ces prévisions, et c'est bien un effort de cet ordre-là qu'il faut maintenant fournir pour une trajectoire limitant le réchauffement à +1,5 °C.

Par ailleurs, les innovations de rupture (par exemple aile volante ou avion à hydrogène) ne sont pas prévues pour avant 2035, voire 2045 pour un avion tout électrique avec une taille et une distance franchissables pertinentes du point de vue des émissions de CO₂. Les solutions reposant sur de l'électricité ne deviendront quant à elles intéressantes qu'à partir du moment où le mix électrique mondial sera devenu bas-carbone. Dans le cas d'un avion électrique par exemple, il faudrait de l'ordre de 20 ans pour atteindre des facteurs d'émission suffisamment bas. Les améliorations de l'efficacité énergétique permettent d'envisager des gains de quelques pourcents par an (de l'ordre de 1,5 % par an pour les solutions technologiques et de 0,5 % par an pour les opérations), et ne suffisent donc pas à elles seules à faire diminuer les émissions si le trafic croît fortement. Enfin, les biocarburants représentent la solution de décarbonation la plus mature, mais leur production reste très limitée. Ils ont représenté 0,004 % des carburants pour l'aviation en 2018 et les études disponibles à ce jour montrent qu'en cas de forte croissance du trafic, il est peu probable qu'ils représentent plus de 20 % de la consommation énergétique mondiale de l'aviation en 2050. Des politiques volontaristes sont actuellement envisagées pour faciliter leur développement, à l'image de l'initiative ReFuelEU au niveau européen.

Dès lors, les leviers technologiques pour réduire les émissions de CO₂ du secteur aérien sont limités par la rapidité et l'ampleur de leur déploiement. Il s'ensuit que, sous une hypothèse de croissance tendancielle du trafic, ces leviers technologiques ne permettront pas de décarboner le secteur aérien à la vitesse

moyenne requise pour respecter l'accord de Paris. En toute logique, il faut donc soit ralentir la croissance du trafic, soit autoriser le secteur aérien à se décarboner plus lentement que cette vitesse moyenne. Hormis les solutions technologiques synthétisées dans ce rapport, la vitesse de décarbonation du secteur aérien, quantifiée par la part du budget carbone mondial qui lui est allouée, et le niveau de trafic sont les deux seuls paramètres qui déterminent la soutenabilité d'une trajectoire donnée.

Budget carbone du secteur aérien et croissance du trafic

La relation entre taux de croissance du trafic aérien et part du budget carbone mondial allouée au secteur aérien est l'objet du chapitre 9. Ainsi, si on alloue 2,6 % des budgets carbone mondiaux médians au secteur aérien (ce qui est sa part des émissions de CO₂ en 2018) et en considérant les scénarios technologiques illustratifs présentés dans ce rapport, une baisse drastique du trafic aérien (supérieure à 10 % par an) serait nécessaire pour limiter le réchauffement à 1,5 °C. Pour limiter le réchauffement à 2 °C, les résultats sont plus nuancés : le scénario le plus pessimiste nécessiterait une baisse annuelle du trafic aérien de 1,8 % quand le scénario le plus optimiste permettrait une croissance annuelle de 2,9 %. Il est important de rappeler que si l'objectif de 2 °C est souvent considéré par la plupart des acteurs, par exemple par l'ATAG^{ATA20} mais aussi par l'Union européenne, il ne constitue qu'une borne supérieure, l'accord de Paris formulant l'objectif de rester nettement en-dessous de 2 °C et de continuer l'effort pour limiter le réchauffement à 1,5 °C.

Ces chiffres sont le résultat d'une analyse en faisant l'hypothèse que le secteur aérien dispose de 2,6 % du budget carbone mondial, ce qui revient à supposer que le secteur aérien réduit ses émissions à la vitesse moyenne requise pour respecter l'accord de Paris. Or le raisonnement peut être inversé, et on peut par exemple estimer la part du budget carbone nécessaire pour permettre le taux de croissance de 3 % par an affiché par l'industrie. Dans le cadre des scénarios technologiques illustratifs présentés dans ce rapport, il faudrait alors allouer au secteur aérien entre 6,0 % et 10,2 % du budget carbone mondial pour 1,5 °C, et entre 2,6 % et 4,5 % pour 2 °C. Dans quasiment tous les cas, ce budget supérieur à la part de l'aviation dans les émissions implique nécessairement que d'autres secteurs d'activité réduisent leurs émissions plus rapidement que la moyenne.

Quelle doit être la part du budget carbone allouée au secteur aérien ? Cette question est largement d'ordre politique et économique, elle touche aux modes de vie et à des problèmes d'équité à l'échelle mondiale. Si l'objectif du présent rapport n'est pas d'y répondre, il permet d'éclairer le débat nécessaire qui doit avoir lieu sur cette question en fournissant des éléments factuels permettant de faire le lien entre budget carbone et taux de (dé)croissance du trafic aérien.

Envisager l'ensemble des leviers

L'urgence de la situation climatique fait qu'il est nécessaire d'envisager tous les leviers permettant de diminuer l'impact climatique de l'aviation dans les proportions décrites par le GIEC.

Les améliorations technologiques sont indispensables et doivent être développées, elles posent notamment des questions de recherche et d'ingénierie pour l'ensemble du secteur aéronautique. Les solutions technologiques potentiellement déployées dans 10 à 15 ans, comme l'avion à hydrogène, les ailes volantes ou les électrocarburants, permettent d'envisager une future aviation bas-carbone mais elles seront trop tardives pour participer à la réduction immédiate et massive des émissions rapportée par le GIEC pour contenir l'élévation des températures « nettement en dessous de 2 °C ». En revanche, certains leviers matures peuvent et doivent être mobilisés dès à présent, notamment la diminution des traînées de condensation par des changements marginaux de trajectoire, les améliorations technologiques incrémentales, l'amélioration des opérations ou encore le développement des biocarburants bas-carbone.

Par ailleurs, toutes ces améliorations doivent se faire en parallèle (et non en opposition) d'une réflexion politique sur les deux leviers discutés dans ce rapport : le niveau du trafic aérien et la part du budget carbone à allouer à l'aviation. Notamment, 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.

Perspectives : penser la transition du secteur aérien de manière systémique

Impacts systémiques de l'aviation

Le fait que les activités humaines comme l'aviation altèrent significativement le climat traduit un changement d'échelle de l'emprise humaine sur le monde. L'être humain serait même devenu une force géologique majeure au même titre que des processus tectoniques, érosifs ou climatiques s'étalant sur des millions d'années. Crutzen et Stoermer ont ainsi proposé en 2000 une nouvelle ère géologique, l'Anthropocène (littéralement « l'ère de l'humain »), qui viendrait clore l'époque géologique de l'Holocène qui a débuté il y a 11 700 ans^{157, 158}. Si cette proposition est toujours en cours de discussion dans la communauté des géologues^a, le concept d'Anthropocène s'est déjà imposé dans la communauté scientifique s'intéressant aux changements globaux du système Terre comme le réchauffement climatique^{IPC19}.

Un enseignement très important de ce concept est que, à mesure que les impacts des activités humaines deviennent planétaires, ces activités en viennent à se confronter aux limites physiques du système Terre. Dans le cadre de ce rapport sur l'aviation, le budget carbone et la quantité d'énergie primaire disponible sont deux exemples de limites planétaires que nous avons abordés en détail. Le budget carbone représente en effet la limite de CO₂ anthropique à ne pas dépasser pour limiter le réchauffement climatique à une certaine température, alors que nous avons vu, notamment dans les chapitres 6 et 9, que la demande énergétique de l'aviation pourrait se heurter à la quantité mondiale d'énergie primaire disponible (sous forme d'électricité ou de biomasse).

Au-delà de ces deux limites, le développement massif de la production de bioénergie et d'électricité bas-carbone que pourrait requérir une décarbonation du secteur aérien pourrait se heurter à d'autres limites planétaires.

a. À l'heure actuelle, le groupe de travail sur l'Anthropocène considère qu'il y a suffisamment de preuves scientifiques et que les radionucléides artificiels disséminés lors des essais nucléaires du milieu des années 1950 seraient le meilleur indicateur stratigraphique de cette nouvelle ère. [Anthropocene Working Groupe](#), Subcommission on Quaternary Stratigraphy, consulté le 18 mars 2021.

Exemple 1 : Impacts systémiques des biocarburants

Les biocarburants peuvent permettre de décarboner l'énergie et représentent à ce titre une solution potentielle au problème climatique. Néanmoins, de nombreuses conséquences socio-environnementales plus larges sont étudiées dans la littérature scientifique. Comme on l'a vu, l'usage des carburants de première génération a été limité en Europe afin de prévenir la concurrence avec la production agricole pour l'alimentation humaine. Les biocarburants de deuxième génération posent eux aussi de nombreux problèmes. Tout d'abord, ils continuent à entrer en concurrence avec l'alimentation humaine par des mécanismes économiques indirects, en provoquant potentiellement la hausse des prix agricoles¹⁵⁹. Par ailleurs, les monocultures intensives (type maïs ou colza) et les pratiques de collecte des résidus peuvent participer à l'érosion et au compactage des sols ainsi qu'au déclin de la biodiversité; elles nécessitent aussi une quantité importante d'eau et d'intrants qui viennent perturber les cycles de l'azote et du phosphore^{160-162,EPA09}. Le développement de la bioénergie engendre donc des problèmes potentiellement aussi importants que le réchauffement climatique (déclin de la biodiversité, famines), qui contraignent l'échelle à laquelle ces solutions peuvent être déployées de manière durable^{159,163}.

Ce point est détaillé dans le rapport spécial du GIEC sur les terres^{IPCC19}, qui souligne l'importance de prendre en compte l'utilisation des sols concernant le développement de la bioénergie. Ainsi, un développement massif de la bioénergie serait très vertueux pour l'atténuation du réchauffement climatique mais diminuerait les capacités d'adaptation au réchauffement, augmenterait les phénomènes de désertification et de dégradation des terres ainsi que les risques de sécurité alimentaire. Le développement des BECSC permettant de capter plusieurs GtCO₂ par an augmenterait alors de 150 millions le nombre d'individus pouvant souffrir de famine. En outre, une conversion massive des terres peut aussi avoir des effets secondaires négatifs sur l'approvisionnement en eau et la biodiversité^{IPCC19}.

Exemple 2 : Impacts systémiques de l'électricité bas-carbone

La production d'électricité bas-carbone, centrale dans tous les scénarios prospectifs limitant le réchauffement climatique, pose le même genre de problèmes^{18,164}. Une analyse peut par exemple être réalisée pour la production d'électricité renouvelable.

En effet, le développement massif d'énergies renouvelables accroît l'emprise au sol, qui est le premier facteur de déclin de la biodiversité^{IPB19}. Ensuite, le développement d'énergies renouvelables nécessite aussi l'utilisation de moyens de stockage de l'électricité. Ainsi, une des solutions envisagées, la production d'hydrogène à partir d'électrolyse, nécessite de l'eau qui peut être une ressource limitée dans les endroits propices à la production électrique renouvelable comme les zones désertiques fortement ensoleillées.

De plus, la construction des infrastructures de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables peut nécessiter des quantités importantes de ressources minières (béton pour les éoliennes, mais aussi métaux rares, cuivre, etc). L'exploitation de ces ressources engendre potentiellement des problèmes socio-économiques dans les pays où elle a lieu¹⁶⁵ ainsi que des pollutions massives des écosystèmes environnants les installations minières¹⁶⁶⁻¹⁶⁸. Par ailleurs, même

si à ce jour, l'essor de nouvelles technologies et les gains d'efficacité ont permis de répondre à la demande exponentielle de ressources minières malgré la diminution de la concentration des gisements, de possibles ruptures d'approvisionnement sont envisageables à court terme pour deux raisons. D'une part, à taux d'amélioration constant de l'efficacité énergétique, les premières contraintes physiques devraient apparaître dans les années à venir du fait du rapprochement des limites thermodynamiques¹⁶⁹. Et d'autre part, certaines matières premières sont devenues « critiques » de par leur importance économique et les risques liés à leur chaîne d'approvisionnement^{Eur20}. Pour certaines matières premières, la situation de quasi-monopole d'un pays induit des enjeux géopolitiques qui dépendent de la stabilité politique des pays exportateurs. En 2020, l'Union européenne identifiait ainsi 30 matières premières critiques dont 18 concernaient les énergies renouvelables^{Com20 a}.

Ces différents éléments mènent à penser la transition écologique de façon systémique, en s'appuyant notamment sur des travaux scientifiques initiés dans les années 1970.

Penser la transition de manière systémique

Du rapport Meadows...

Alors que Jean-Baptiste Say écrivait en 1832 dans son cours d'économie que « les richesses naturelles sont inépuisables »^b, l'atteinte des limites planétaires vient remettre en cause cette vision d'un monde à la fois stable et infini. Dès les années 1970, une équipe de chercheurs du MIT mandatée par le Club de Rome s'est intéressée au caractère durable de la croissance exponentielle de différents indicateurs sociaux-économiques et environnementaux depuis la fin de la Seconde guerre mondiale. Ces indicateurs sont par exemple la population mondiale, le PIB, la consommation d'énergie primaire ou encore le tourisme international¹⁷⁰.

La première version de leur rapport *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*¹⁷¹, plus connu sous le nom de rapport au Club de Rome ou rapport Meadows, est publiée en 1972 et connaît un grand succès. Ces travaux utilisent la théorie de la dynamique des systèmes et la modélisation informatique pour analyser les causes et les conséquences à long terme des croissances démographique et économique, qui sont les deux seules sources possibles de croissance exponentielle. Pour cela, ils considèrent dans leur modèle numérique l'augmentation de la population et de l'utilisation des ressources et les limites physiques auxquelles la population peut se heurter, notamment les ressources naturelles et la capacité de la Terre à absorber les pollutions industrielles et agricoles. Une conclusion importante de la première version du rapport est que sans régulation des croissances démographique et économique couplée à des changements de comportements sociaux et à une amélioration de l'efficacité énergétique, les modèles produisent systématiquement des trajectoires présentant au bout d'un certain temps une décroissance subie de la population, due notamment à la dégradation des capacités productives entraînée par les pollutions. En particulier,

a. Ce même rapport de l'Union européenne identifiait aussi 26 matières critiques pour l'aérospatial et la défense comme le cobalt, le lithium ou le titane.

b. Jean-Baptiste Say, « Cours complet d'économie politique pratique », vol. 1, Bruxelles, Meline, 1832, p. 83, in « L'évènement Anthropocène », art. cit.

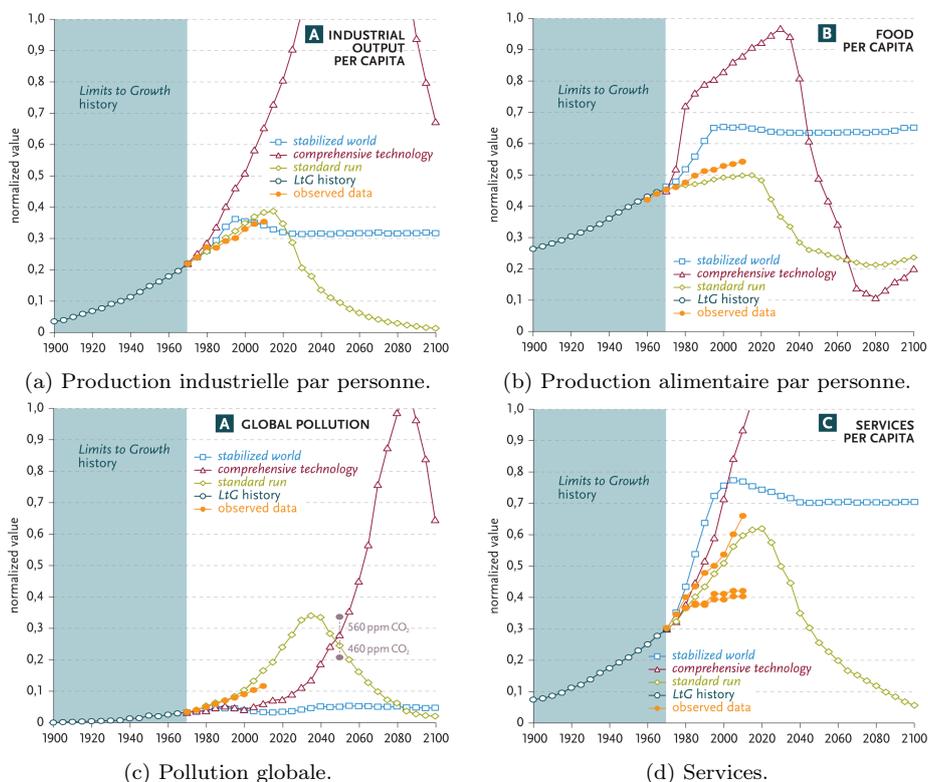


FIGURE 9.10 – Comparaison de l'évolution historique de quatre indicateurs sur la période 1972–2012 avec les prévisions de trois scénarios du rapport Meadows de 1972. Le scénario tendanciel est le plus proche des données historiques. D'après les figures 2 et 3 de Turner¹⁷³.

le scénario *tendanciel*, qui poursuit les trajectoires passées, et le scénario *tout technologique*, qui repose uniquement sur la technologie pour résoudre les problèmes^a, mènent tous deux à un effondrement rapide et subi de la population.

Depuis sa première version en 1972 ce rapport a été régulièrement mis à jour, notamment par les auteurs originaux à l'occasion de son trentième anniversaire en 2004¹⁷², et plus récemment, pour son quarantième anniversaire, par le physicien australien Graham Turner en 2012¹⁷³. Ce dernier a ainsi comparé trois scénarios étudiés dans le rapport Meadows à l'évolution historique entre 1972 et 2012 de huit indicateurs. Ces trois scénarios sont les scénarios tendanciel et tout technologique évoqués ci-dessus ainsi que le scénario *monde stabilisé* qui évite un effondrement de la population. La figure 9.10 illustre cette comparaison sur quatre des huit indicateurs et montre que le scénario tendanciel correspond le mieux aux données observées. Sur certains autres indicateurs, notamment ceux démographiques, les données sont plus proches du scénario tout technologique mais dans tous les cas, aucune donnée n'est compatible avec le scénario *monde stabilisé*. Turner conclut ainsi en 2012 que les données disponibles confirment

a. Comme Jean-Baptiste Say, ce scénario fait l'hypothèse de ressources naturelles infinies mais pour une raison différente, à savoir le concept économique de *substituabilité* selon lequel les progrès technologiques permettront toujours de pallier la pénurie d'une ressource donnée.

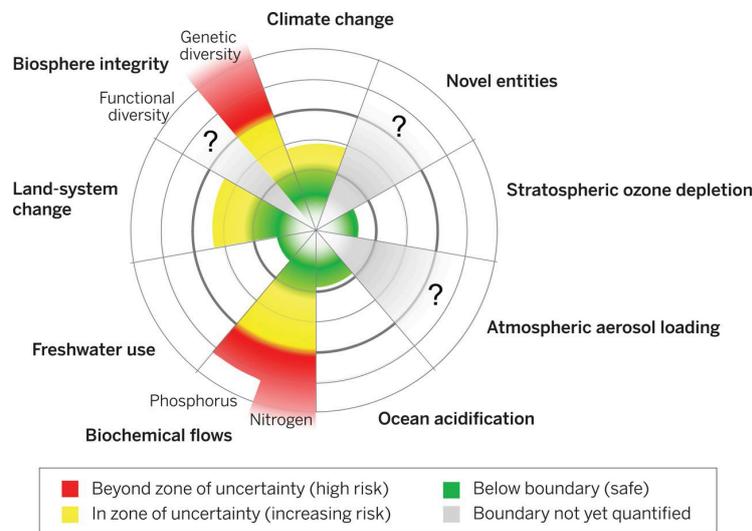


FIGURE 9.11 – État actuel des variables de contrôle pour sept des frontières planétaires. La zone verte représente l'espace opérationnel sûr, la zone jaune représente la zone d'incertitude (risque croissant) et la zone rouge est une zone à haut risque. La limite planétaire elle-même se trouve à l'intersection des zones verte et jaune. Les variables de contrôle ont été normalisées pour la zone d'incertitude; le centre de la figure ne représente donc pas des valeurs de 0 pour les variables de contrôle. La variable de contrôle indiquée pour le changement climatique est la concentration de CO_2 atmosphérique. Les processus pour lesquels les limites au niveau mondial ne peuvent pas encore être quantifiées sont représentés par des coins gris; il s'agit de la charge d'aérosols atmosphériques, des nouvelles entités et du rôle fonctionnel de l'intégrité de la biosphère. D'après la figure et sa légende de Steffen *et al.*¹⁷⁵.

que la trajectoire suivie depuis 1972 est celle du scénario tendanciel qui mène à un effondrement de la population dans la première moitié du XXI^e siècle. Par ailleurs, les mises à jour successives du rapport original soulignent le fait que si des scénarios durables sont encore possibles, leurs possibilités de réalisation sont de plus en plus restreintes à mesure que l'on continue à suivre le scénario tendanciel. Cette conclusion généralise la remarque faite précédemment concernant la baisse des émissions de CO_2 , qui doit être d'autant plus importante qu'elle commence tard.

... aux limites planétaires

L'idée de limites physiques mise en avant dans le rapport Meadows a été approfondie en 2009 par une équipe pluridisciplinaire de scientifiques (dont Paul Crutzen) qui ont identifié neuf frontières planétaires définissant une zone durable pour l'humanité¹⁷⁴ (cf. figure 9.11) : le réchauffement climatique, l'érosion de la biodiversité, la perturbation des cycles de l'azote et du phosphore, les changements d'utilisation des sols, l'acidification des océans, l'utilisation de l'eau douce, l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, l'augmentation des aérosols dans l'atmosphère et la diffusion d'entités nouvelles dans l'environnement. Le dépassement d'une ou plusieurs de ces frontières correspond à l'entrée dans un monde non-linéaire où les modifications des mécanismes physiques

peuvent enclencher des transformations brutales et des effets d'emballement, impacter les écosystèmes terrestres à long terme et mettre en péril l'existence et le développement de nos sociétés.

Témoignage de l'impact des activités humaines, quatre de ces frontières étaient dépassées ou en passe de l'être¹⁷⁵ en 2015. Il s'agit des quatre frontières apparaissant en jaune ou rouge sur la figure 9.11, à savoir le réchauffement climatique, l'érosion de la biodiversité, la perturbation des cycles de l'azote et du phosphore et le changement d'usage des sols.

Un enseignement fondamental de ces travaux est que nous vivons dans un monde fini régi par des interactions complexes. Ce constat a de profondes implications pour la résolution des problèmes environnementaux comme le réchauffement climatique puisque toute solution peut exacerber la pression sur les autres limites planétaires. Ce phénomène est désigné dans la littérature sous le nom de déplacement de problème environnemental¹⁶⁴.

Penser la transition du secteur aérien de manière systémique

En cherchant à diminuer son empreinte climatique par le développement de vecteurs énergétiques bas-carbone, le secteur aérien pourrait donc contribuer à aggraver d'autres problèmes socio-environnementaux en accentuant la production de bioénergie et d'électricité renouvelable. Cette problématique n'est évidemment pas propre au secteur aérien, et elle met justement en exergue la nécessité d'envisager la transition du secteur aérien (et de tous les secteurs d'activité) dans un cadre plus large afin d'éviter de se concentrer sur un problème et d'en ignorer de plus importants¹⁷⁶. Une question sensible est celle des ressources disponibles dans un monde bas-carbone. Par exemple, Graham Turner conclut sa mise à jour du rapport Meadows en mettant en garde contre le fait que « la question des contraintes de ressources est un problème plus important que le changement climatique »¹⁷³.

La transition vers un monde bas-carbone doit donc être pensée dans son ensemble. Elle soulève d'épineuses questions d'allocation de ressources, de choix organisationnels, économiques et socio-techniques, de hiérarchisation des priorités et des usages, aux effets différenciés et plus ou moins susceptibles d'occasionner de tels déplacements. Affronter l'enjeu écologique global exige donc plus que des avancées ponctuelles ou sectorielles, mais de situer toute solution (technique ou autre) dans une vision d'ensemble et un cadre d'analyse élargi comme celui des limites planétaires.

Sixième partie

Annexes

Métriques équivalentes

A.1 La métrique équivalente PRG (Pouvoir de réchauffement global)

A.1.1 Définition

Le PRG d'un gaz G sur un horizon temporel H est défini comme le rapport entre l'impact radiatif cumulé du gaz considéré sur l'impact radiatif correspondant du CO₂. Ainsi, il est donné par

$$\text{PRG} = \frac{\int_0^H \text{RF}_G(t) dt}{\int_0^H \text{RF}_{\text{CO}_2}(t) dt} \quad (\text{A.1})$$

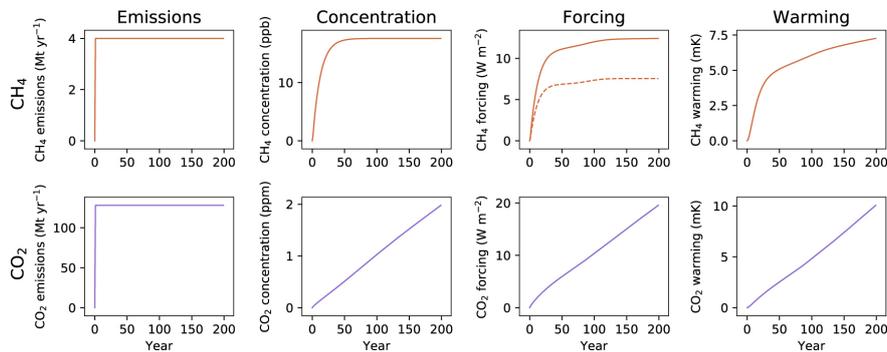
où $\text{RF}_G(t)$, exprimé en $\text{W m}^{-2} \text{kg}^{-1}$, correspond à l'impact sur le forçage radiatif à l'instant t d'un kilo du gaz G émis à l'instant 0. L'intégrale $\int_0^H \text{RF}_G(t) dt$ est appelé PRG absolu, et le PRG est donc le rapport du PRG absolu du gaz considéré et le PRG absolu du CO₂. Le PRG est alors utilisé pour convertir les émissions d'un gaz G en CO₂-eq par la formule $E_{\text{CO}_2\text{-eq}} = \text{PRG} \times E_G$.

Comme on le voit, cette conversion nécessite de fixer un horizon temporel H, et ce choix peut avoir une influence très forte sur la conversion. Par exemple, le méthane est un gaz à effet de serre très puissant mais avec une faible durée de vie, de l'ordre de 12 ans : ainsi, son PRG vaut 84 à 20 ans et 28 à 100 ans^{MSB⁺13}. Habituellement, l'horizon temporel est fixé à 100 ans.

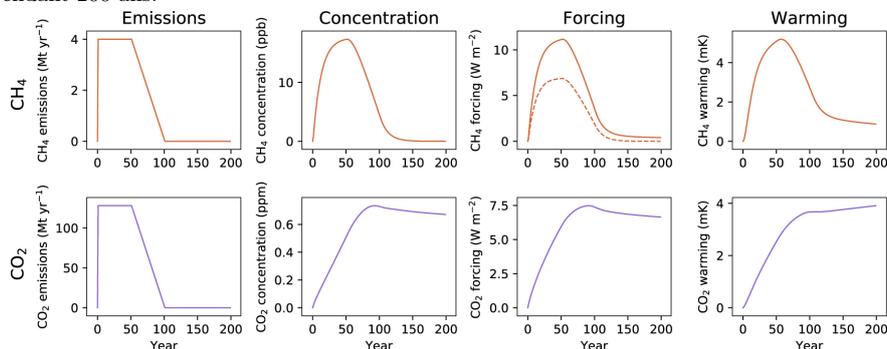
A.1.2 Limites

Comme expliqué en section 2.3, les effets non-CO₂ agissent sur des échelles de temps très différentes des effets CO₂. Cette différence de durée de vie rend l'utilisation du PRG problématique pour tout polluant atmosphérique à courte durée de vie comme les traînées de condensation ou le méthane. Pour expliquer ce problème, nous considérerons deux scénarios d'émission de méthane et de CO₂ illustrés sur la figure A.1.

Dans le premier scénario (figure A.1a), les taux annuels d'émission du méthane et du CO₂ augmentent soudainement au début du scénario puis restent constants pendant 200 ans. Le CO₂ ayant une durée de vie longue, cette hausse



(a) Premier scénario : augmentation des émissions de méthane et de CO₂ à partir de l’an 0 pendant 200 ans.



(b) Deuxième scénario : augmentation des émissions de méthane et de CO₂ à partir de l’an 0 pendant 50 ans, puis déclin des émissions à 0.

FIGURE A.1 – Deux scénarios où les taux d’émission de méthane et de CO₂ varient dans le temps. La réponse en terme de température est très différente pour un gaz cumulatif à longue durée de vie comme le CO₂ et pour un gaz à courte durée de vie comme le méthane. On voit en particulier sur la figure (b) qu’une diminution du taux d’émission se traduit par une stabilisation des températures pour le CO₂ et par une baisse pour le méthane. D’après les figures 1 et 2 de Lynch *et al.*¹⁴⁹.

du taux d’émission se traduit par une augmentation linéaire de la concentration de CO₂ atmosphérique, et in fine par une hausse linéaire du forçage radiatif et de la température. En revanche, le méthane ayant une durée de vie courte, la hausse de son taux d’émission se traduit tout d’abord par une hausse de sa concentration atmosphérique, mais celle-ci se stabilise au bout d’environ 50 ans une fois que le méthane disparaît aussi vite qu’il est émis. L’impact sur le forçage radiatif et la température est alors très différent par rapport au CO₂ : forçage radiatif et température augmentent très fortement pendant environ 40 ans, puis la croissance diminue très fortement. Au bout d’une centaine d’années, le forçage radiatif s’est même quasiment stabilisé. Il est intéressant de noter que l’augmentation de température due aux émissions de méthane est plus forte que celle due au CO₂, en dépit d’émissions beaucoup plus faibles, reflétant ainsi le fait que le méthane est un gaz à effet de serre plus puissant que le CO₂.

Si l’on renverse le raisonnement, il suit donc de manière symétrique qu’en régime stationnaire, une **baisse** des émissions de méthane se traduit par une diminution des températures. Ce phénomène est illustré sur la figure A.1b où un

second scénario est considéré. Comme pour le premier scénario, le taux annuel d'émission augmente initialement, mais contrairement au premier scénario, cette hausse n'est soutenue que pendant 50 ans, après quoi les émissions décroissent linéairement à 0 en 50 ans. Pour le CO₂, la baisse des émissions se traduit par une stabilisation de la concentration, du forçage radiatif et de la température. Pour le méthane en revanche, on voit que les courbes de concentration, de forçage radiatif et de réchauffement suivent les mêmes tendances que le taux d'émissions, *i.e.* croissance puis décroissance.

On voit ainsi qu'en transformant du méthane en CO₂-eq par la méthode du PRG, on le transforme en quelque chose qui, implicitement, reste dans l'atmosphère pendant des siècles, ce qui n'est pas le cas du méthane. Cette méthode ne permet donc pas de reproduire quelque chose qui peut se passer dans la réalité, à savoir la baisse du forçage radiatif (ou des températures) en cas de baisse des émissions. En d'autres termes, la métrique équivalente du PRG n'est pas un bon indicateur de l'impact sur le forçage radiatif pour un gaz à courte durée de vie, et la méthode du PRG* a été précisément introduite pour pallier ce problème.

A.2 La métrique équivalente PRG*

A.2.1 Définition

L'idée du PRG* est de convertir les émissions d'un gaz à courte durée de vie en se basant sur la **variation de son taux d'émission**, et non pas ses émissions absolues comme pour le PRG. Comme on l'a vu, les émissions en CO₂-eq par la méthode du PRG sont calculées en mettant en équivalence l'impact climatique d'une impulsion d'émission d'une tonne d'un gaz considéré avec celle d'une tonne de CO₂ : le PRG est alors défini comme le rapport des PRG absolus, cf. l'équation (A.1), et les émissions en CO₂-eq sont calculées par $E_{\text{CO}_2\text{-eq}} = E \times \text{PRG}$ avec E la valeur absolue des émissions.

Pour calculer des émissions en CO₂-eq* par la méthode du PRG*, on compare l'impact climatique de la **hausse** du taux d'émission d'un gaz, et non plus d'une impulsion, toujours avec une **impulsion** de CO₂. Les émissions en CO₂-eq* sont alors calculées par la formule suivante :

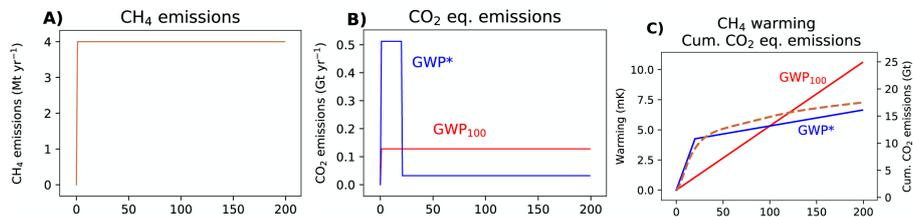
$$E_{\text{CO}_2\text{-eq}^*} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \times \text{PRG}_H \times H \quad (\text{A.2})$$

où ΔE est la variation du taux d'émission annuel du gaz considéré, Δt le pas de temps sur lequel cette variation est calculée, et PRG_H le PRG du gaz sur l'horizon temporel H ^a.

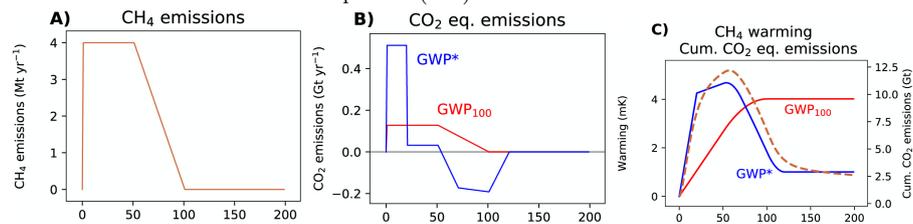
A.2.2 Différence entre PRG et PRG*

La figure A.2 illustre les résultats obtenus en utilisant la méthode du PRG et celle du PRG*, illustrant que la méthode du PRG* est beaucoup plus adaptée pour le méthane, dans le sens où ses émissions cumulées en terme de CO₂-eq* sont étroitement corrélées avec l'évolution des températures, contrairement à ses émissions cumulées en terme de CO₂-eq.

a. Une formule équivalente peut être utilisée à partir des forçages radiatifs, à savoir $E_{\text{CO}_2\text{-eq}^*} = \frac{\Delta F}{\Delta t} \times \frac{H}{\text{PRG}_A}$ où ΔF est la variation du forçage radiatif et PRG_A le PRG



(a) Premier scénario : augmentation du taux annuel d'émission du méthane. Les émissions en $\text{CO}_2\text{-eq}^*$ deviennent nulles après 20 ans, qui est l'horizon sur lequel les variations des taux d'émissions sont calculées dans l'équation (A.2).



(b) Deuxième scénario : augmentation puis baisse du taux annuel d'émission du méthane. Les émissions en $\text{CO}_2\text{-eq}^*$ deviennent négatives au bout de 50 ans, au moment où les émissions baissent.

FIGURE A.2 – Illustration de la méthode du PRG* sur les deux scénarios de la figure A.1. La figure B présente la mise en équivalence du méthane avec le CO_2 : en bleu avec la méthode du PRG* et en rouge avec la méthode du PRG. La figure C illustre l'impact sur la température (courbe pointillés) et les émissions de $\text{CO}_2\text{-eq}$ (rouge) et de $\text{CO}_2\text{-eq}^*$ (bleu). On voit que les émissions cumulées calculées par la méthode du PRG* reflètent bien mieux la variation de température que la méthode du PRG. D'après la figure 4 de Lynch *et al.*¹⁴⁹.

Deux observations très importantes sont à faire suite à cette définition :

1. contrairement aux émissions en $\text{CO}_2\text{-eq}$, les émissions en $\text{CO}_2\text{-eq}^*$ **peuvent devenir négatives** ;
2. la valeur du PRG* dépend de la **trajectoire** d'émission.

Concernant la première observation, il suffit pour que les émissions en $\text{CO}_2\text{-eq}^*$ deviennent négatives que les émissions absolues diminuent. Ce comportement à première vue surprenant correspond au fait que, d'un point de vue climatique, **baissé le taux d'émission d'un polluant avec une faible durée de vie est assimilable à un puits de carbone**. En effet, quand les émissions d'un polluant à faible durée de vie baissent, sa concentration dans l'atmosphère baisse, diminuant ainsi le forçage radiatif. Si on fait l'équivalence entre ces polluants et du CO_2 , tout se passe donc comme si on retirait du CO_2 de l'atmosphère.

Concernant la seconde observation, Lee *et al.*⁹ calculent un PRG* d'environ 2 pour les effets non- CO_2 , ce qui veut dire qu'ils ont un impact climatique environ deux fois supérieur à l'impact des effets CO_2 . Lorsque l'on additionne les deux effets, Lee *et al.* concluent ainsi que « les émissions de l'aviation réchauffent actuellement le climat à un rythme environ trois fois supérieur à celui

absolu.

des seules émissions de CO₂ »^a. Ce PRG* de 2 correspond au fait que les effets non-CO₂ sont, aujourd'hui, environ deux fois plus importants que les effets CO₂. Il est néanmoins important de garder en tête que, par construction, cette valeur dépend de la variation du forçage radiatif sur la période considérée (en l'occurrence, entre 2000 et 2018) et qu'elle pourrait fortement évoluer notamment si le trafic aérien évolue. Par exemple, en cas de baisse du trafic comme c'est le cas actuellement suite à la crise sanitaire (ou comme cela a été le cas en 2009, cf. figure 2.8), les émissions en CO₂-eq* des effets non-CO₂ deviendraient négatives, et seuls les effets CO₂ contribueraient à accentuer le réchauffement climatique^b.

a. On trouve ainsi la phrase suivante dans l'abstract de Lee *et al.*⁹ : « CO₂-warming-equivalent emissions based on global warming potentials (GWP* method) indicate that aviation emissions are currently warming the climate at approximately three times the rate of that associated with aviation CO₂ emissions alone. »

b. Dans cette phrase, la référence est l'année où le trafic a commencé à décroître puisque c'est à partir de ce moment que la diminution du trafic agit comme un puits de carbone pour les effets à courte durée de vie telles que les traînées de condensation. Néanmoins, cela ne présage en rien du fait que les effets non-CO₂ ont bel et bien accentué le réchauffement climatique avant cela, mettant en action des effets de rétroaction qui persistent comme on peut le voir sur la figure A.1b dans le cas du méthane.

Annexe **B**

Détails pour les calculs de l'impact climatique de l'aviation

Nous donnons ici des détails concernant les calculs effectués dans la section 2.2 pour évaluer l'impact climatique de l'aviation, notamment dans la section 2.2.2.

B.1 Index d'émission

Dans ce rapport nous avons pris comme valeur d'index d'émission du kérosène $73,2 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$, valeur que l'on trouve dans Stratton *et al.*¹⁷⁷ En considérant une valeur standard de densité énergétique massique de $43,15 \text{ MJ/kg}$, cela correspond à une valeur de $3,13 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$ ce qui est cohérent avec les $3,16 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$ de Lee *et al.* qui notent que cette valeur est connue avec une incertitude de l'ordre de 1 %⁹. La valeur que nous avons retenue est donc une valeur basse.

Concernant les émissions sur l'ensemble du cycle de vie du kérosène, nous avons utilisé la valeur standard du tableau S6 de Stratton *et al.*¹⁷⁷ qui s'élève à $87,5 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$. En toute rigueur, il s'agit de $\text{gCO}_2\text{-eq}/\text{MJ}$ car les émissions hors combustion incluent une petite partie, typiquement inférieure à 3 %, de méthane et de protoxyde d'azote. Néanmoins, comme nous avons besoin (notamment dans le chapitre 9) de comparer les émissions de CO_2 de l'aviation à des budgets carbone, nous négligeons les émissions hors combustion des gaz à effet de serre autres que le CO_2 . Utiliser une valeur exprimée en $\text{CO}_2\text{-eq}$ en CO_2 augmente artificiellement les émissions de CO_2 , mais cette convention est cohérente avec le fait que la valeur de Stratton *et al.* est en fait dans la fourchette basse des valeurs habituellement retenues pour les émissions hors combustion. En effet, cette valeur est légèrement inférieure à celles retenues par le FVV^a ($88,7 \text{ gCO}_2\text{-eq}/\text{MJ}$)^{SZWR16}, par l'OACI ($89 \text{ gCO}_2\text{-eq}/\text{MJ}$)^b ou par l'Europe via son programme RED II ($94 \text{ gCO}_2\text{-eq}/\text{MJ}$)^c.

a. Il s'agit de l'association de recherche pour les moteurs à combustion, ou *Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen E.v.* en allemand.

b. Source : [EASA, Sustainable Aviation Fuels](#), consulté le 01/02/2021.

c. Cité par [CP17, p26].

B.2 Consommation énergétique

Une fois l'index d'émission fixé, on peut évaluer les émissions de CO₂ à partir des données de consommation énergétique. Pour cela, nous nous sommes basés sur les données de l'AIE^a qui fournissent la consommation énergétique de l'aviation depuis 1973. En 2018 par exemple, l'aviation a consommé 337 Mtep^b d'énergie (202 Mtep pour l'aviation internationale et 135 Mtep pour l'aviation domestique), ce qui représente 14,1 EJ d'énergie et donc 1,03 GtCO₂ d'émissions. Pour la période entre 1940 et 1973, nous avons utilisé les données de Sausen et Schumann¹⁷⁸.

B.3 Émissions anthropiques

L'index d'émission et les données de consommation permettent d'évaluer les émissions brutes du secteur aérien. Pour calculer la part que cela représente, nous avons utilisé les données du Global Carbon Budget concernant les émissions de CO₂ anthropiques. Les émissions depuis 1750 (incluant les émissions liées à l'usage des sols) sont disponibles dans le supplément du Global Carbon Budget 2020^{4c}. Pour les émissions de 2018, nous avons utilisé les données du Global Carbon Budget 2018³, soit 10 GtC pour les émissions dues à la combustion d'énergie fossile et 1,5 GtC pour les émissions dues au changement d'affectation des sols, pour un total de 11,5 GtC soit 42,2 GtCO₂.

B.4 Sources pour les calculs concernant l'estimation de l'impact climatique

Les émissions de CO₂ sont calculées par la même méthode que décrite précédemment. Pour les calculs en forçage radiatif, nous avons utilisé les données de Lee *et al.*⁹ fournies dans leur matériel supplémentaire pour le secteur aérien entre 2000 et 2018, que nous avons corrigées pour les périodes récentes en incluant les émissions de CO₂ liées au cycle de vie du kérosène. Pour obtenir la part que cet impact sur le forçage radiatif représente, nous avons utilisé les sources de la figure 2.10 du chapitre 2 du sixième rapport d'évaluation du GIEC^{GTA+21d}. Les données de trafic proviennent de l'OACI via [airlines.org](https://www.icao.int/airlines).

B.5 Résultats en limitant à l'aviation commerciale

Nous détaillons ici les calculs annoncés dans la partie 2.2.5 pour mesurer l'impact de l'aviation commerciale. Ces résultats sont présentés dans le tableau 2.3.

Comme expliqué ci-dessus, les valeurs présentées dans le chapitre 2 pour les émissions liées à la combustion ont été calculées à partir des données de

a. [IEA Sankey Diagram](https://www.iea.org/energydata/energy_sankey_diagram), consulté le 1^{er} février 2021.

b. Une tonne équivalent pétrole (1 tep) est une unité d'énergie qui représente 41,868 GJ.

c. Disponible sur la page web du [Global Carbon Budget 2020](https://www.globalcarbonbudget.org/).

d. Ces données nous ont aimablement été données par Laurent Terray, que nous remercions chaleureusement.

Source	Estimation (MtCO ₂)
Gössling et Humpe ¹	921
ICCT ^{GZRI9}	918
IATA	905
ATAG	895
Notre méthode	891

TABLEAU B.1 – Estimation des émissions de CO₂ de l’aviation commerciale (passager et fret) en 2018 selon différentes sources.

l’AIE. Ce que recouvrent ces données recèle une part d’ambiguïté. D’un côté, l’AIE demande depuis 2006 à ce que le kérosène pour l’aviation militaire ne soit pas rapporté avec le kérosène pour l’aviation commerciale, mais précise dans le même temps ne pas être sûre que cette consigne soit appliquée^{IEA19a}. En principe, les 1,0 GtCO₂ du tableau 2.1 (1033 MtCO₂ pour être précis) ne prennent donc pas en compte l’aviation militaire. Néanmoins, cette valeur est utilisée par Lee *et al.* qui étudie l’aviation globale, et elle est par ailleurs comparable aux 1046 MtCO₂ estimés pour l’aviation globale aussi par Gössling et Humpe¹. C’est la raison pour laquelle nous considérons que les chiffres précédents concernent bien l’aviation globale.

Concernant l’aviation commerciale, plusieurs estimations concordantes existent pour l’année 2018. Les quatre premières lignes du tableau B.1 récapitulent ainsi quatre estimations différentes qui situent les émissions entre 895 MtCO₂ et 921 MtCO₂, soit des résultats relativement proches.

Afin de généraliser ces estimations et limiter l’étude à l’aviation commerciale, nous utiliserons dans la suite du rapport la méthodologie suivante (qui correspond à la dernière ligne du tableau B.1). L’article de Gössling et Humpe¹ a évalué la part de l’aviation militaire et privée à respectivement 8 % et 4 % de la consommation énergétique du secteur aérien (cf. figure 1), sur un total de 14,1 EJ pour l’aviation globale d’après l’AIE : un coefficient correctif de 88 % est donc considéré. En utilisant un facteur d’émission liée à la combustion de 71,8 gCO₂/MJ considéré par l’ADEME^a, l’utilisation de cette consommation de kérosène de référence permet d’estimer à 891 MtCO₂ les émissions directes de CO₂ (combustion du kérosène) de l’aviation commerciale en 2018, soit 0,4 % d’écart avec la valeur de 895 MtCO₂ annoncée par l’ATAG. Enfin, en plus de la combustion et de la production du kérosène, une majoration de 2 % des émissions de CO₂ est considérée pour inclure les autres phases du cycle de vie des avions¹³⁹.

a. Ce coefficient est plus faible que ceux utilisés par l’AIE et par Stratton *et al.*¹⁷⁷ de l’ordre de 73 gCO₂/MJ. De la même façon, en incluant la production du carburant, l’ADEME considère un facteur d’émission de 86,7 gCO₂/MJ contre 87,5 gCO₂/MJ pour Stratton *et al.*¹⁷⁷.

Voies HEFA/HVO et Fischer–Tropsch

C.1 Voie HEFA/HVO

HEFA/HVO est la voie la plus utilisée aujourd’hui, et probablement dans le futur proche. Néanmoins, on voit sur la figure 6.2 que pour qu’elle soit vraiment intéressante d’un point de vue climatique elle doit reposer sur des matières premières précises (huiles utilisées, matières grasses animales), mais qui sont en ressource limitée^{94,95}. Elle comprend trois grandes étapes⁹² :

- une étape d’hydrogénation où un ajout d’hydrogène permet de remplacer les liaisons double entre atomes de carbone par des liaisons simples, ce qui a pour effet de saturer les acides gras de la matière première de départ (huiles végétales, etc) ;
- une étape de hydrodéoxygénation et de décarboxylation où un ajout d’hydrogène permet de supprimer l’eau et le gaz carbonique des acides gras, les transformant ainsi en hydrocarbures (alcanes de longueurs de chaînes C₁₅ à C₁₈) ;
- enfin une étape d’isomérisation et d’hydrocraquage qui permet de raffiner les alcanes et produire les biocarburants.

C.2 Voie Fischer–Tropsch

La gazéification de la biomasse associée au processus de Fischer–Tropsch semble la voie la plus prometteuse pour la production industrielle de biocarburants de deuxième génération^{97,108}. Elle consiste en deux grandes étapes :

- La gazéification est un procédé thermochimique qui convertit un combustible solide (charbon, bois, paille, etc.) en un combustible gazeux et ce via l’injection en quantité réduite et contrôlée d’un agent oxydant (O₂, air, CO₂, vapeur d’eau, ...) ^a. Elle produit du gaz de synthèse ou *syngas* qui est un mélange de monoxyde de carbone CO et d’hydrogène H₂ ;

a. Gazeification.info, consulté le 21 janvier 2021.

- le processus de Fischer–Tropsch est un ensemble de réactions chimiques qui transforment du gaz de synthèse en hydrocarbures liquides, la formule générale de la réaction est de la forme $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{-CH}_2\text{-} + \text{H}_2\text{O}$ où le terme $\text{-CH}_2\text{-}$ est la brique élémentaire de chaînes d'hydrocarbures.

Références

Littérature scientifique : articles, thèses, livres, chapitres de livres

- ¹ Stefan Gössling and Andreas Humpe. The global scale, distribution and growth of aviation: Implications for climate change. *Global Environmental Change*, 65:102194, 2020.
- ² Jean-Louis Dufresne and Jacques Treiner. L'effet de serre atmosphérique : plus subtil qu'on ne le croit ! *La Météorologie*, 72:31–41, 2011.
- ³ P. Friedlingstein, M. W. Jones, M. O'Sullivan, R. M. Andrew, J. Hauck, G. P. Peters, W. Peters, J. Pongratz, S. Sitch, C. Le Quéré, D. C. E. Bakker, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, P. Anthoni, L. Barbero, A. Bastos, V. Bastrikov, M. Becker, L. Bopp, E. Buitenhuis, N. Chandra, F. Chevallier, L. P. Chini, K. I. Currie, R. A. Feely, M. Gehlen, D. Gilfillan, T. Gkritzalis, D. S. Goll, N. Gruber, S. Gutekunst, I. Harris, V. Haverd, R. A. Houghton, G. Hurtt, T. Ilyina, A. K. Jain, E. Joetzjer, J. O. Kaplan, E. Kato, K. Klein Goldewijk, J. I. Korsbakken, P. Landschützer, S. K. Lauvset, N. Lefèvre, A. Lenton, S. Lienert, D. Lombardozzi, G. Marland, P. C. McGuire, J. R. Melton, N. Metzl, D. R. Munro, J. E. M. S. Nabel, S.-I. Nakaoka, C. Neill, A. M. Omar, T. Ono, A. Peregón, D. Pierrot, B. Poulter, G. Rehder, L. Resplandy, E. Robertson, C. Rödenbeck, R. Séférian, J. Schwinger, N. Smith, P. P. Tans, H. Tian, B. Tilbrook, F. N. Tubiello, G. R. van der Werf, A. J. Wiltshire, and S. Zaehle. Global carbon budget 2019. *Earth System Science Data*, 11(4):1783–1838, 2019.
- ⁴ P. Friedlingstein, M. O'Sullivan, M. W. Jones, R. M. Andrew, J. Hauck, A. Olsen, G. P. Peters, W. Peters, J. Pongratz, S. Sitch, C. Le Quéré, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. Alin, L. E. O. C. Aragão, A. Arneeth, V. Arora, N. R. Bates, M. Becker, A. Benoit-Cattin, H. C. Bittig, L. Bopp, S. Bultan, N. Chandra, F. Chevallier, L. P. Chini, W. Evans, L. Florentie, P. M. Forster, T. Gasser, M. Gehlen, D. Gilfillan, T. Gkritzalis, L. Gregor, N. Gruber, I. Harris, K. Hartung, V. Haverd, R. A. Houghton, T. Ilyina, A. K. Jain, E. Joetzjer, K. Kadono, E. Kato, V. Kitidis, J. I. Korsbakken, P. Landschützer, N. Lefèvre, A. Lenton, S. Lienert, Z. Liu, D. Lombardozzi, G. Marland, N. Metzl, D. R. Munro, J. E. M. S. Nabel, S.-I. Nakaoka, Y. Niwa, K. O'Brien, T. Ono, P. I. Palmer, D. Pierrot, B. Poulter, L. Resplandy, E. Robertson, C. Rödenbeck, J. Schwinger, R. Séférian, I. Skjelvan, A. J. P. Smith, A. J. Sutton, T. Tanhua, P. P. Tans, H. Tian, B. Tilbrook,

- G. van der Werf, N. Vuichard, A. P. Walker, R. Wanninkhof, A. J. Watson, D. Willis, A. J. Wiltshire, W. Yuan, X. Yue, and S. Zaehle. Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 12(4):3269–3340, 2020.
- ⁵ Andreas Petzold and Bernd Kärcher. *Aerosols in the Atmosphere*, pages 37–53. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- ⁶ Aaron J Cohen, Michael Brauer, Richard Burnett, H Ross Anderson, Joseph Frostad, Kara Estep, Kalpana Balakrishnan, Bert Brunekreef, Lalit Dandona, Rakhi Dandona, Valery Feigin, Greg Freedman, Bryan Hubbell, Amelia Jobling, Haidong Kan, Luke Knibbs, Yang Liu, Randall Martin, Lidia Morawska, C Arden Pope, Hwashin Shin, Kurt Straif, Gavin Shaddick, Matthew Thomas, Rita van Dingenen, Aaron van Donkelaar, Theo Vos, Christopher J L Murray, and Mohammad H Forouzanfar. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082):1907–1918, 2017.
- ⁷ Steven R. H. Barrett, Rex E. Britter, and Ian A. Waitz. Global Mortality Attributable to Aircraft Cruise Emissions. *Environmental Science & Technology*, 44(19):7736–7742, 10 2010.
- ⁸ Z. Z. Kapadia, D. V. Spracklen, S. R. Arnold, D. J. Borman, G. W. Mann, K. J. Pringle, S. A. Monks, C. L. Reddington, F. Benduhn, A. Rap, C. E. Scott, E. W. Butt, and M. Yoshioka. Impacts of aviation fuel sulfur content on climate and human health. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(16):10521–10541, 2016.
- ⁹ D.S. Lee, D.W. Fahey, A. Skowron, M.R. Allen, U. Burkhardt, Q. Chen, S.J. Doherty, S. Freeman, P.M. Forster, J. Fuglestedt, A. Gettelman, R.R. De León, L.L. Lim, M.T. Lund, R.J. Millar, B. Owen, J.E. Penner, G. Pitari, M.J. Prather, R. Sausen, and L.J. Wilcox. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, page 117834, 2020.
- ¹⁰ C. Heinze, V. Eyring, P. Friedlingstein, C. Jones, Y. Balkanski, W. Collins, T. Fichet, S. Gao, A. Hall, D. Ivanova, W. Knorr, R. Knutti, A. Löw, M. Ponater, M. G. Schultz, M. Schulz, P. Siebesma, J. Teixeira, G. Tselioudis, and M. Vancoppenolle. ESD reviews: Climate feedbacks in the earth system and prospects for their evaluation. *Earth System Dynamics*, 10(3):379–452, 2019.
- ¹¹ Simone Russo, Jana Sillmann, and Andreas Sterl. Humid heat waves at different warming levels. *Scientific Reports*, 7(1):7477, 2017.
- ¹² Will Steffen, Johan Rockström, Katherine Richardson, Timothy M. Lenton, Carl Folke, Diana Liverman, Colin P. Summerhayes, Anthony D. Barnosky, Sarah E. Cornell, Michel Crucifix, Jonathan F. Donges, Ingo Fetzer, Steven J. Lade, Marten Scheffer, Ricarda Winkelmann, and Hans Joachim Schellnhuber. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33):8252–8259, 2018.
- ¹³ Allen A. Fawcett, Gokul C. Iyer, Leon E. Clarke, James A. Edmonds, Nathan E. Hultman, Haewon C. McJeon, Joeri Rogelj, Reed Schuler, Jameel Alsalam, Ghassem R. Asrar, Jared Creason, Minji Jeong, James McFarland, Anupriya Mundra, and Wenjing Shi. Can Paris pledges avert severe climate change? *Science*, 350(6265):1168–1169, 2015.

- ¹⁴ Joeri Rogelj, Michel den Elzen, Niklas Höhne, Taryn Fransen, Hanna Fekete, Harald Winkler, Roberto Schaeffer, Fu Sha, Keywan Riahi, and Malte Meinshausen. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature*, 534(7609):631–639, 2016.
- ¹⁵ S. C. Sherwood, M. J. Webb, J. D. Annan, K. C. Armour, P. M. Forster, J. C. Hargreaves, G. Hegerl, S. A. Klein, K. D. Marvel, E. J. Rohling, M. Watanabe, T. Andrews, P. Braconnot, C. S. Bretherton, G. L. Foster, Z. Hausfather, A. S. von der Heydt, R. Knutti, T. Mauritsen, J. R. Norris, C. Proistosescu, M. Rugenstein, G. A. Schmidt, K. B. Tokarska, and M. D. Zelinka. An Assessment of Earth’s Climate Sensitivity Using Multiple Lines of Evidence. *Reviews of Geophysics*, 58(4):e2019RG000678, 2020.
- ¹⁶ Dan Tong, Qiang Zhang, Yixuan Zheng, Ken Caldeira, Christine Shearer, Chaopeng Hong, Yue Qin, and Steven J. Davis. Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 °C climate target. *Nature*, 572(7769):373–377, 2019.
- ¹⁷ W. Steffen, P. J. Crutzen, and J.R McNeil. The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature? *Ambio*, 36(8):614–621, 2007.
- ¹⁸ Patrick Moriarty and Damon Honnery. Can renewable energy power the future? *Energy Policy*, 93:3–7, 2016.
- ¹⁹ Sofia Pinheiro Melo, Alexander Barke, Felipe Cerdas, Christian Thies, Mark Mennenga, Thomas S. Spengler, and Christoph Herrmann. Sustainability assessment and engineering of emerging aircraft technologies—challenges, methods and tools. *Sustainability*, 12(14), 2020.
- ²⁰ L. Dufour. Microphysiques des nuages. *Ciel et Terre*, 77:68–81, 1961.
- ²¹ Klaus Gierens, Peter Spichtinger, and Ulrich Schumann. *Ice Supersaturation*, pages 135–150. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- ²² F. Noppel and R. Singh. Overview on Contrail and Cirrus Cloud Avoidance Technology. *Journal of Aircraft*, 44(5):1721–1726, 2007.
- ²³ Bernd Kärcher. Formation and radiative forcing of contrail cirrus. *Nature Communications*, 9(1):1824, 2018.
- ²⁴ Ulrich Schumann, Kaspar Graf, Hermann Mannstein, and Bernhard Mayer. *Contrails: Visible Aviation Induced Climate Impact*, pages 239–257. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- ²⁵ Frank G. Noppel. *Contrail and cirrus cloud avoidance technology*. PhD thesis, School of Mechanical Engineering, Cranfield University, 2007.
- ²⁶ C. Breitsamter. Wake vortex characteristics of transport aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 47(2):89–134, 2011.
- ²⁷ Philippe R. Spalart. On the motion of laminar wing wakes in a stratified fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, 327:139–160, 1996.
- ²⁸ Thomas Gerz and Frank Holzzapfel. Wing-tip vortices, turbulence, and the distribution of emissions. *AIAA Journal*, 37(10):1270–1276, 1999.
- ²⁹ Volker Grewe, Sigrun Matthes, and Katrin Dahlmann. The contribution of aviation NO_x emissions to climate change: are we ignoring methodological flaws? *Environmental Research Letters*, 14(12):121003, dec 2019.

- ³⁰ Bernd Kärcher, Fabian Mahrt, and Claudia Marcolli. Process-oriented analysis of aircraft soot-cirrus interactions constrains the climate impact of aviation. *Communications Earth & Environment*, 2(1):113, 2021.
- ³¹ David Archer, Michael Eby, Victor Brovkin, Andy Ridgwell, Long Cao, Uwe Mikolajewicz, Ken Caldeira, Katsumi Matsumoto, Guy Munhoven, Alvaro Montenegro, and Kathy Tokos. Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37(1):117–134, 2009.
- ³² D. C. Lewellen. Persistent Contrails and Contrail Cirrus. Part II: Full Lifetime Behavior. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(12):4420–4438, 2014.
- ³³ R. Burbidge. Adapting european airports to a changing climate. *Transportation Research Procedia*, 14:14–23, 2016.
- ³⁴ R. Burbidge. Adapting aviation to a changing climate: key priorities for action. *Air Transport Management*, 71:167–174, 2018.
- ³⁵ A. N. Yesudian and Dawson R. J. Global analysis of sea level rise risk to airports. *Climate Risk Management*, 31:100266, 2021.
- ³⁶ E. A. Irvine, K. P. Shine, and M. A. Stringer. What are the implications of climate change for trans-atlantic aircraft routing and flight time? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47:44–53, 2016.
- ³⁷ P. D. Williams. Transatlantic flight times and climate change. *Environmental Research Letters*, 11:024008, 2016.
- ³⁸ R. Sharman, C. Tebaldi, G. Wiener, and J. Wolff. An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting. *Weather and Forecasting*, 21:268–287, 2006.
- ³⁹ N. Storer, L., P. D. Williams, and M. M. Joshi. Global response of clear-air turbulence to climate change. *Geophysical Research Letters*, 44:9976–9984, 2017.
- ⁴⁰ B. T. Carpenter. An overview and analysis of the impacts of extreme heat on the aviation industry. *Undergraduate Research at The University of Tennessee*, 9:2, 2019.
- ⁴¹ E. Coffel and R. Horton. Climate change and the impact of extreme temperatures on aviation. *Weather, Climate, and Society*, 7:94–102, 2015.
- ⁴² Y Zhou, N. Zhang, C. Li, Y. Liu, and P. Huang. Decreased takeoff performance of aircraft due to climate change. *Climatic Change*, 151:463–472, 2018.
- ⁴³ D. Ren, R. E. Dickinson, R. Fu, J. F. Bornman, W. Guo, S. Yang, and L. M. Leslie. Impacts of climate warming on maximum aviation payloads. *Climate Dynamics*, 52:1711–1721, 2019.
- ⁴⁴ Yoichi Kaya and Keiichi Yokobori, editors. *Environment, energy, and economy : strategies for sustainability : Tokyo conference on Global Environment, Energy and Economic Development (1993)*. United Nations Univ. Press, Tokyo, 1997.
- ⁴⁵ A. Abbas, J. de Vicente, and E. Valero. Aerodynamic technologies to improve aircraft performance. *Aerospace Science and Technology*, 28(1):100–132, 2013.

- ⁴⁶ J.D. Mattingly. *Elements of Gas Turbine Propulsion*. McGraw-Hill series in aeronautical and aerospace engineering. McGraw-Hill, 1996.
- ⁴⁷ P. M. Peeters and J. Middel. Historical and future development of air transport fuel efficiency. In *Proceedings of an International Conference on Transport, Atmosphere and Climate (TAC)*, pages 42–47, 2006.
- ⁴⁸ Ming Zhang, Qianwen Huang, Sihan Liu, and Huiying Li. Assessment method of fuel consumption and emissions of aircraft during taxiing on airport surface under given meteorological conditions. *Sustainability*, 11(21):6110, 2019.
- ⁴⁹ Jean-Charles Maré. *Les actionneurs aéronautiques 1: besoins, fiabilité et solutions à puissance hydraulique*, volume 1. ISTE Group, 2016.
- ⁵⁰ Susan Liscouet-Hanke. *A model-based methodology for integrated preliminary sizing and analysis of aircraft power system architectures*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2008.
- ⁵¹ Albert R. Gnadt, Raymond L. Speth, Jayant S. Sabnis, and Steven R.H. Barrett. Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 105:1–30, 2019.
- ⁵² Vijay K. Garg. Heat transfer research on gas turbine airfoils at nasa grc. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 23(2):109–136, 2002.
- ⁵³ Daniel Giesecke, Marcel Lehmler, Jens Friedrichs, Jason Blinstrub, Lothar Bertsch, and Wolfgang Heinze. Evaluation of ultra-high bypass ratio engines for an over-wing aircraft configuration. *J. of the Global Power and Propulsion Society*, 2:493–515, 2018.
- ⁵⁴ D. Van Zante, F. Collier, A. Orton, S. Khalid, J. Wojno, and T. Wood. Progress in open rotor propulsors: The faa/ge/nasa open rotor test campaign. *The Aeronautical Journal*, 118(1208):1181–1213, 2014.
- ⁵⁵ L.S. Langston. Open rotor engines - still an open question? *ASME Mechanical Engineering*, 140(2):46–48, 2018.
- ⁵⁶ T. T. Grönstedt, M. Irannezhad, X. Lei, O. Thulin, and A. Lundblad. First and second law analysis of future aircraft engines. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 136(3):031202, 2014.
- ⁵⁷ Vijay Anand, Andrew St. George, Ethan Knight, and Ephraim Gutmark. Investigation of pulse detonation combustors — axial turbine system. *Aerospace Science and Technology*, 93:105350, 2019.
- ⁵⁸ Y. Bury, T. Jardin, and A. Klöckner. Experimental investigation of the vortical activity in the close wake of a simplified military transport aircraft. *Experiments in Fluids*, 54(5):1–15, 2013.
- ⁵⁹ Zhong-Hua Han, Jing Chen, Ke-Shi Zhang, Zhen-Ming Xu, Zhen Zhu, and Wen-Ping Song. Aerodynamic shape optimization of natural-laminar-flow wing using surrogate-based approach. *AIAA Journal*, 56(7):2579–2593, 2018.
- ⁶⁰ T.I. Saeed and W. R. Graham. Design study for a laminar-flying-wing aircraft. *J. of Aircraft*, 52(5), 2015.
- ⁶¹ W. R. Kruger and J. König. Editorial for the ceas aeronautical journal special edition on smart fixed wing aircraft, wp 1.2 “load control”. *CEAS Aeronautical Journal*, 10:975–976, 2019.

- ⁶² Joel E. Guerrero, Dario Maestro, and Alessandro Bottaro. Biomimetic spiroid winglets for lift and drag control. *Comptes Rendus Mécanique*, 340(1):67–80, 2012.
- ⁶³ M. R. Chiarelli, M. Cagnoni, M. Ciabattari, M. De Biasio, and A. Massai. High aspect ratio wing with curved planform: Cfd and fe analyses. In *27th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences*, page 10, 2010.
- ⁶⁴ Geoffrey J. Frank, James J. Joo, Brian Sanders, David M. Garner, and Andrew P. Murray. Mechanization of a high aspect ratio wing for aerodynamic control. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 19(9):1101–1112, 2008.
- ⁶⁵ A. Bejan, J. D. Charles, and S. Lorente. The evolution of airplanes. *Journal of Applied Physics*, 116(4):044901, 2014.
- ⁶⁶ Benoit Montagne. *Effet de l'interaction fixation composite sur les modes de rupture des assemblages boulonnés composites*. PhD thesis, Université de Toulouse, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, 2020.
- ⁶⁷ Runze Huang, Matthew Riddle, Diane Graziano, Joshua Warren, Sujit Das, Sachin Nimbalkar, Joe Cresko, and Eric Masanet. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production*, 135:1559–1570, 2016.
- ⁶⁸ V. Madonna, P. Giangrande, and M. Galea. Electrical power generation in aircraft: review, challenges and opportunities. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(3):646–659, 2018.
- ⁶⁹ Xavier Giraud, Marc Budinger, Xavier Roboam, Hubert Piquet, Marc Sartor, and Jérôme Faucher. Optimal design of the integrated modular power electronics cabinet. *Aerospace Science and Technology*, 48:37–52, 2016.
- ⁷⁰ Dominique Van Den Bossche. The A380 flight control electrohydrostatic actuators, achievements and lessons learnt. In *25th international congress of the aeronautical sciences*, pages 1–8, 2006.
- ⁷¹ W. Cao, B. C. Mecrow, G. J. Atkinson, J. W. Bennett, and D. J. Atkinson. Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 59(9):3523–3531, 2012.
- ⁷² Lester Faleiro. Summary of the European power optimised aircraft (POA) project. In *25th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS*, pages 3–8, 2006.
- ⁷³ Nick Nagel. Actuation challenges in the more electric aircraft: Overcoming hurdles in the electrification of actuation systems. *IEEE Electrification Magazine*, 5(4):38–45, 2017.
- ⁷⁴ Marc Budinger, Valérie Pommier-Budinger, Aurélien Reysset, and Valerian Palanque. Electromechanical resonant ice protection systems: Energetic and power considerations. *AIAA Journal*, pages 1–13, 2021.
- ⁷⁵ Jean-Charles Maré. *Les actionneurs aéronautiques 2: solutions à puissance et signaux électriques*, volume 2. ISTE Group, 2017.
- ⁷⁶ M. Lukic, A. Hebala, P. Giangrande, C. Klumpner, S. Nuzzo, G. Chen, C. Gerada, C. Eastwick, and M. Galea. State of the art of electric taxiing systems. *IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft*,

- Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, pages 1–6, 2018.
- ⁷⁷ Jakub Hospodka. Cost-benefit analysis of electric taxi systems for aircraft. *Journal of Air Transport Management*, 39:81–88, 2014.
- ⁷⁸ Kun Zhao, Patrick Okolo, Eleonora Neri, Peng Chen, John Kennedy, and Gareth J Bennett. Noise reduction technologies for aircraft landing gear—a bibliographic review. *Progress in Aerospace Sciences*, 112:100589, 2020.
- ⁷⁹ A Plas, D Crichton, M Sargeant, T Hynes, E Greitzer, C Hall, and V Madani. Performance of a Boundary Layer Ingesting (BLI) Propulsion System. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2007.
- ⁸⁰ R. H. Liebeck. Design of the blended wing body subsonic transport. *J. of Aircraft*, 41(1), 2004.
- ⁸¹ N. Binder. *Aéro-thermodynamique des Turbomachines en Fonctionnement Hors-Adaptation*. Habilitation à Diriger des Recherches. Université de Toulouse, 2016.
- ⁸² Alan H. Epstein and Steven M. O’Flarity. Considerations for Reducing Aviation’s CO₂ with Aircraft Electric Propulsion. *Journal of Propulsion and Power*, 35(3):572–582, 2019.
- ⁸³ Jérôme Thauvin. *Exploring the design space for a hybrid-electric regional aircraft with multidisciplinary design optimisation methods*. PhD thesis, 2018.
- ⁸⁴ Martin Boll, Matthias Corduan, Stefan Biser, Mykhaylo Filipenko, Quoc Huang Pham, Sonja Schlachter, Peter Rostek, and Mathias Noe. A holistic system approach for short range passenger aircraft with cryogenic propulsion system. *Superconductor Science and Technology*, 33(4):044014, 2020.
- ⁸⁵ Sarah J. Gerssen-Gondelach and André P.C. Faaij. Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term. *Journal of Power Sources*, 212:111–129, 2012.
- ⁸⁶ Jérôme Thauvin. *Exploring the design space for a hybrid-electric regional aircraft with multidisciplinary design optimisation methods*. PhD thesis, INP, Université de Toulouse, 2018.
- ⁸⁷ Ralph Jansen, Cheryl Bowman, Amy Jankovsky, Rodger Dyson, and James Felder. Overview of NASA Electrified Aircraft Propulsion (EAP) Research for Large Subsonic Transports. In *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2017.
- ⁸⁸ D. Verstraete. On the energy efficiency of hydrogen-fuelled transport aircraft. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(23):7388–7394, 2015.
- ⁸⁹ Richa Kothari, D. Buddhi, and R.L. Sawhney. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2):553–563, 2008.
- ⁹⁰ Michael Ponater, Susanne Pechtl, Robert Sausen, Ulrich Schumann, and Gerhard Hüttig. Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: A state-of-the-art assessment. *Atmospheric Environment*, 40(36):6928–6944, 2006.
- ⁹¹ Richard H. Moore, Kenneth L. Thornhill, Bernadett Weinzierl, Daniel Sauer, Eugenio D’Ascoli, Jin Kim, Michael Lichtenstern, Monika Scheibe, Brian

- Beaton, Andreas J. Beyersdorf, John Barrick, Dan Bulzan, Chelsea A. Corr, Ewan Crosbie, Tina Jurkat, Robert Martin, Dean Riddick, Michael Shook, Gregory Slover, Christiane Voigt, Robert White, Edward Winstead, Richard Yasky, Luke D. Ziemba, Anthony Brown, Hans Schlager, and Bruce E. Anderson. Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions. *Nature*, 543(7645):411–415, 2017.
- ⁹² Hongjian Wei, Wenzhi Liu, Xinyu Chen, Qing Yang, Jiashuo Li, and Hanping Chen. Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review. *Fuel*, 254:115599, 2019.
- ⁹³ Rebecca Mawhood, Evangelos Gazis, Sierk de Jong, Ric Hoefnagels, and Raphael Slade. Production pathways for renewable jet fuel: a review of commercialization status and future prospects. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 10(4):462–484, 2016.
- ⁹⁴ Mark D. Staples, Robert Malina, and Steven R. H. Barrett. The limits of bioenergy for mitigating global life-cycle greenhouse gas emissions from fossil fuels. *Nature Energy*, 2(2):16202, 2017.
- ⁹⁵ Kathrin Sunde, Andreas Brekke, and Birger Solberg. Environmental Impacts and Costs of Hydrotreated Vegetable Oils, Transesterified Lipids and Woody BTL—A Review. *Energies*, 4(6):845–877, 2011.
- ⁹⁶ Adrian O’Connell, Marina Kousoulidou, Laura Lonza, and Werner Weindorf. Considerations on GHG emissions and energy balances of promising aviation biofuel pathways. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101:504–515, 2019.
- ⁹⁷ Michiel J.A. Tijmensen, André P.C. Faaij, Carlo N. Hamelinck, and Martijn R.M. van Hardeveld. Exploration of the possibilities for production of Fischer Tropsch liquids and power via biomass gasification. *Biomass and Bioenergy*, 23(2):129–152, 2002.
- ⁹⁸ Dominik Unruh, Kyra Pabst, and Georg Schaub. Fischer-Tropsch Synfuels from Biomass: Maximizing Carbon Efficiency and Hydrocarbon Yield. *Energy & Fuels*, 24(4):2634–2641, 04 2010.
- ⁹⁹ Vineet Singh Sikarwar, Ming Zhao, Paul S. Fennell, Nilay Shah, and Edward J. Anthony. Progress in biofuel production from gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 61:189–248, 2017.
- ¹⁰⁰ Meng Wang, Raf. Dewil, Kyriakos Maniatis, John Wheeldon, Tianwei Tan, Jan Baeyens, and Yunming Fang. Biomass-derived aviation fuels: Challenges and perspective. *Progress in Energy and Combustion Science*, 74:31–49, 2019.
- ¹⁰¹ Mahdi Fasihi, Dmitrii Bogdanov, and Christian Breyer. Techno-economic assessment of power-to-liquids (ptl) fuels production and global trading based on hybrid pv-wind power plants. *Energy Procedia*, 99:243–268, 2016. 10th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2016, 15-17 March 2016, Düsseldorf, Germany.
- ¹⁰² Mariane Trépanier, Ahmad Tavasoli, Ajay K. Dalai, and Nicolas Abatzoglou. Co, Ru and K loadings effects on the activity and selectivity of carbon nanotubes supported cobalt catalyst in Fischer–Tropsch synthesis. *Applied Catalysis A: General*, 353(2):193–202, 2009.
- ¹⁰³ Timothy D. Searchinger. Biofuels and the need for additional carbon. *Environmental Research Letters*, 5(2):024007, apr 2010.

- ¹⁰⁴ Helmut Haberl, Detlef Sprinz, Marc Bonazountas, Pierluigi Cocco, Yves Desaubies, Mogens Henze, Ole Hertel, Richard K. Johnson, Ulrike Kastrup, Pierre Laconte, Eckart Lange, Peter Novak, Jouni Paavola, Anette Reenberg, Sybille van den Hove, Theo Vermeire, Peter Wadhams, and Timothy Searchinger. Correcting a fundamental error in greenhouse gas accounting related to bioenergy. *Energy Policy*, 45:18–23, 2012.
- ¹⁰⁵ Helmut Haberl. Net land-atmosphere flows of biogenic carbon related to bioenergy: towards an understanding of systemic feedbacks. *Global change biology. Bioenergy*, 5(4):351–357, 07 2013.
- ¹⁰⁶ Timothy D. Searchinger, Tim Beringer, and Asa Strong. Does the world have low-carbon bioenergy potential from the dedicated use of land? *Energy Policy*, 110:434–446, 2017.
- ¹⁰⁷ Felix Creutzig, N. H. Ravindranath, Göran Berndes, Simon Bolwig, Ryan Bright, Francesco Cherubini, Helena Chum, Esteve Corbera, Mark Delucchi, Andre Faaij, Joseph Fargione, Helmut Haberl, Garvin Heath, Oswaldo Lucon, Richard Plevin, Alexander Popp, Carmenza Robledo-Abad, Steven Rose, Pete Smith, Anders Stromman, Sangwon Suh, and Omar Masera. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. *GCB Bioenergy*, 7(5):916–944, 2015.
- ¹⁰⁸ Sierk de Jong, Kay Antonissen, Ric Hoefnagels, Laura Lonza, Michael Wang, André Faaij, and Martin Junginger. Life-cycle analysis of greenhouse gas emissions from renewable jet fuel production. *Biotechnology for Biofuels*, 10(1):64, 2017.
- ¹⁰⁹ Xin Zhao, Farzad Taheripour, Robert Malina, Mark D. Staples, and Wallace E. Tyner. Estimating induced land use change emissions for sustainable aviation biofuel pathways. *Science of The Total Environment*, page 146238, 2021.
- ¹¹⁰ Annie Levasseur, Pascal Lesage, Manuele Margni, and Réjean Samson. Biogenic carbon and temporary storage addressed with dynamic life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1):117–128, 2013.
- ¹¹¹ John L. Field, Tom L. Richard, Erica A. H. Smithwick, Hao Cai, Mark S. Laser, David S. LeBauer, Stephen P. Long, Keith Paustian, Zhangcai Qin, John J. Sheehan, Pete Smith, Michael Q. Wang, and Lee R. Lynd. Robust paths to net greenhouse gas mitigation and negative emissions via advanced biofuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(36):21968–21977, 2020.
- ¹¹² Kadambari Lokesh, Vishal Sethi, Theoklis Nikolaidis, Eric Goodger, and Devaiah Nalianda. Life cycle greenhouse gas analysis of biojet fuels with a technical investigation into their impact on jet engine performance. *Biomass and Bioenergy*, 77:26–44, 2015.
- ¹¹³ Rafael Martinez-Feria and Bruno Basso. Predicting soil carbon changes in switchgrass grown on marginal lands under climate change and adaptation strategies. *GCB Bioenergy*, 12(9):742–755, 2020.
- ¹¹⁴ Thales A. P. West, Jan Börner, Erin O. Sills, and Andreas Kontoleon. Overstated carbon emission reductions from voluntary REDD+ projects in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(39):24188–24194, 2020.

- ¹¹⁵ Stefano Amaducci, Gianni Facciotto, Sara Bergante, Alessia Perego, Paolo Serra, Andrea Ferrarini, and Carlo Chimento. Biomass production and energy balance of herbaceous and woody crops on marginal soils in the po valley. *GCB Bioenergy*, 9(1):31–45, 2017.
- ¹¹⁶ Richard J. Plevin, Michael O’Hare , Andrew D. Jones, Margaret S. Torn, and Holly K. Gibbs. Greenhouse gas emissions from biofuels’ indirect land use change are uncertain but may be much greater than previously estimated. *Environmental Science & Technology*, 44(21):8015–8021, 2010. PMID: 20942480.
- ¹¹⁷ Patrick Schmidt, Valentin Batteiger, Arne Roth, Werner Weindorf, and Tetyana Raksha. Power-to-liquids as renewable fuel option for aviation: A review. *Chemie Ingenieur Technik*, 90(1-2):127–140, 2018.
- ¹¹⁸ Niklas von der Assen, Leonard J. Müller, Annette Steingrube, Philip Voll, and André Bardow. Selecting CO₂ Sources for CO₂ Utilization by Environmental-Merit-Order Curves. *Environmental Science & Technology*, 50(3):1093–1101, 02 2016.
- ¹¹⁹ Carlotta Panzone, Régis Philippe, Alban Chappaz, Pascal Fongarland, and Alain Bengaouer. Power-to-Liquid catalytic CO₂ valorization into fuels and chemicals: focus on the Fischer-Tropsch route. *Journal of CO₂ Utilization*, 38:314–347, 2020.
- ¹²⁰ Jermanto S Kurniawan and Salah Khardi. Comparison of methodologies estimating emissions of aircraft pollutants, environmental impact assessment around airports. *Environmental Impact Assessment Review*, 31(3):240–252, 2011.
- ¹²¹ Louis Tsague, Thomas Tamo Tatietsé, John Ngundam, and Joseph Tsogo. Prediction of emissions in turbojet engines exhausts: relationship between nitrogen oxides emission index (EINO_x) and the operational parameters. *Aerospace science and technology*, 11(6):459–463, 2007.
- ¹²² Agnieszka Skowron, David S. Lee, Rubén Rodríguez De León, Ling L. Lim, and Bethan Owen. Greater fuel efficiency is potentially preferable to reducing nox emissions for aviation’s climate impacts. *Nature Communications*, 12(1):564, 2021.
- ¹²³ Roger Teoh, Ulrich Schumann, Arnab Majumdar, and Marc E. J. Stettler. Mitigating the climate forcing of aircraft contrails by small-scale diversions and technology adoption. *Environmental Science & Technology*, 54(5):2941–2950, 03 2020.
- ¹²⁴ Klaus Gierens, Ling Lim, and Kostas Eleftheratos. A Review of Various Strategies for Contrail Avoidance. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2:1–7, 2008.
- ¹²⁵ B. Kärcher and C. Voigt. Susceptibility of contrail ice crystal numbers to aircraft soot particle emissions. *Geophysical Research Letters*, 44(15):8037–8046, 2017.
- ¹²⁶ C. Rojo, X. Vancassel, P. Mirabel, J.-L. Ponche, and F. Garnier. Impact of alternative jet fuels on aircraft-induced aerosols. *Fuel*, 144:335–341, 2015.
- ¹²⁷ Ulrike Burkhardt, Lisa Bock, and Andreas Bier. Mitigating the contrail cirrus climate impact by reducing aircraft soot number emissions. *npj Climate and Atmospheric Science*, 1(1):37, 2018.

- ¹²⁸ Sigrun Matthes, Benjamin Lührs, Katrin Dahlmann, Volker Grewe, Florian Linke, Feijia Yin, Emma Klingaman, and Keith P Shine. Climate-optimized trajectories and robust mitigation potential: Flying atm4e. *Aerospace*, 7(11):156, 2020.
- ¹²⁹ J. Crouch. Airplane trailing vortices and their control. *Comptes Rendus Physique*, 6(4):487–499, 2005. Aircraft trailing vortices.
- ¹³⁰ S. C. Crow. Stability theory for a pair of trailing vortices. *AIAA Journal*, 8(12):2172–2179, 1970.
- ¹³¹ J. D. Crouch, G. D. Miller, and P. R. Spalart. Active-control system for breakup of airplane trailing vortices. *AIAA Journal*, 39(12):2374–2381, 2001.
- ¹³² Vincent Brion, Denis Sipp, and Laurent Jacquin. Optimal amplification of the crow instability. *Physics of Fluids*, 19(11):111703, 2007.
- ¹³³ Kevin Anderson and Glen Peters. The trouble with negative emissions. *Science*, 354(6309):182–183, 2016.
- ¹³⁴ Pete Smith, Steven J. Davis, Felix Creutzig, Sabine Fuss, Jan Minx, Benoit Gabrielle, Etsushi Kato, Robert B. Jackson, Annette Cowie, Elmar Kriegler, Detlef P. van Vuuren, Joeri Rogelj, Philippe Ciais, Jennifer Milne, Josep G. Canadell, David McCollum, Glen Peters, Robbie Andrew, Volker Krey, Gyami Shrestha, Pierre Friedlingstein, Thomas Gasser, Arnulf Grübler, Wolfgang K. Heidug, Matthias Jonas, Chris D. Jones, Florian Kraxner, Emma Littleton, Jason Lowe, JoséRoberto Moreira, Nebojsa Nakicenovic, Michael Obersteiner, Anand Patwardhan, Mathis Rogner, Ed Rubin, Ayyoob Sharifi, Asbjørn Torvanger, Yoshiki Yamagata, Jae Edmonds, and Cho Yongsung. Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions. *Nature Climate Change*, 6(1):42–50, 2016.
- ¹³⁵ Corinne Le Quéré, Glen P. Peters, Pierre Friedlingstein, Robbie M. Andrew, Josep G. Canadell, Steven J. Davis, Robert B. Jackson, and Matthew W. Jones. Fossil CO2 emissions in the post-COVID-19 era. *Nature Climate Change*, 11(3):197–199, 2021.
- ¹³⁶ Volker Grewe, Arvind Gangoli Rao, Tomas Grönstedt, Carlos Xisto, Florian Linke, Joris Melkert, Jan Middel, Barbara Ohlenforst, Simon Blakey, Simon Christie, et al. Evaluating the climate impact of aviation emission scenarios towards the Paris agreement including COVID-19 effects. *Nature Communications*, 12(1):1–10, 2021.
- ¹³⁷ H. Damon Matthews, Katarzyna B. Tokarska, Joeri Rogelj, Christopher J. Smith, Andrew H. MacDougall, Karsten Haustein, Nadine Mengis, Sebastian Sippel, Piers M. Forster, and Reto Knutti. An integrated approach to quantifying uncertainties in the remaining carbon budget. *Communications Earth & Environment*, 2(1):7, 2021.
- ¹³⁸ Joeri Rogelj, Piers M Forster, Elmar Kriegler, Christopher J Smith, and Roland Séférian. Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets. *Nature*, 571(7765):335–342, 2019.
- ¹³⁹ Thomas Planès, Scott Delbecq, Valérie Pommier-Budinger, and Emmanuel Bénard. Simulation and evaluation of sustainable climate trajectories for aviation. *Journal of Environmental Management*, 2021.
- ¹⁴⁰ William R. L. Anderegg, Anna T. Trugman, Grayson Badgley, Christa M. Anderson, Ann Bartuska, Philippe Ciais, Danny Cullenward, Christo-

- pher B. Field, Jeremy Freeman, Scott J. Goetz, Jeffrey A. Hicke, Deborah Huntzinger, Robert B. Jackson, John Nickerson, Stephen Pacala, and James T. Randerson. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science*, 368(6497), 2020.
- ¹⁴¹ Kevin Anderson. The inconvenient truth of carbon offsets. *Nature*, 484:7, 2012.
- ¹⁴² William J. Bond, Nicola Stevens, Guy F. Midgley, and Caroline E.R. Lehmann. The Trouble with Trees: Afforestation Plans for Africa. *Trends in Ecology & Evolution*, 34(11):963–965, 2019.
- ¹⁴³ Anu Vedantham and Michael Oppenheimer. Long-term scenarios for aviation: Demand and emissions of co2 and nox. *Energy Policy*, 26(8):625–641, 1998.
- ¹⁴⁴ Sveinn Vidar Gudmundsson and Annela Anger. Global carbon dioxide emissions scenarios for aviation derived from IPCC storylines: A meta-analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(1):61–65, 2012.
- ¹⁴⁵ Jonas Åkerman. Sustainable air transport—on track in 2050. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10(2):111–126, 2005.
- ¹⁴⁶ E Terrenoire, D A Hauglustaine, T Gasser, and O Penanhoat. The contribution of carbon dioxide emissions from the aviation sector to future climate change. *Environmental Research Letters*, 14(8):084019, jul 2019.
- ¹⁴⁷ M Sharmina, OY Edelenbosch, C Wilson, R Freeman, DEHJ Gernaat, P Gilbert, A Larkin, EW Littleton, M Traut, DP Van Vuuren, et al. Decarbonising the critical sectors of aviation, shipping, road freight and industry to limit warming to 1.5–2 °C. *Climate Policy*, pages 1–20, 2020.
- ¹⁴⁸ Janina Scheelhaase, Sven Maertens, Wolfgang Grimme, and Martin Jung. EU ETS versus CORSIA—A critical assessment of two approaches to limit air transport’s CO2 emissions by market-based measures. *Journal of Air Transport Management*, 67:55–62, 2018.
- ¹⁴⁹ John Lynch, Michelle Cain, Raymond Pierrehumbert, and Myles Allen. Demonstrating GWP*: a means of reporting warming-equivalent emissions that captures the contrasting impacts of short- and long-lived climate pollutants. *Environmental Research Letters*, 15(4):044023, apr 2020.
- ¹⁵⁰ Mark D. Staples, Robert Malina, Pooja Suresh, James I. Hileman, and Steven R.H. Barrett. Aviation co2 emissions reductions from the use of alternative jet fuels. *Energy Policy*, 114:342–354, 2018.
- ¹⁵¹ Stephanie Searle and Chris Malins. A reassessment of global bioenergy potential in 2050. *GCB Bioenergy*, 7(2):328–336, 2015.
- ¹⁵² Raphael Slade, Ausilio Bauen, and Robert Gross. Global bioenergy resources. *Nature Climate Change*, 4(2):99–105, 2014.
- ¹⁵³ William J. Ripple, Christopher Wolf, Thomas M. Newsome, Mauro Galetti, Mohammed Alamgir, Eileen Crist, Mahmoud I. Mahmoud, William F. Laurance, and 364 scientist signatories from 184 countries 15. World Scientists’ Warning to Humanity: A Second Notice. *BioScience*, 67(12):1026–1028, 11 2017.

- ¹⁵⁴ Eloy R. Lozano, Walter W. Melvin Jr., and Seymour ochheiser. Air pollution emissions from jet engines. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 18(6):392–394, 1968.
- ¹⁵⁵ Robert F. Sawyer. Reducing jet pollution before it becomes serious. *Astronautics and Aeronautics*, 1970.
- ¹⁵⁶ Jonas Åkerman. *Transport systems meeting long-term climate targets : A backcasting approach*. PhD thesis, KTH, Environmental Strategies, 2011.
- ¹⁵⁷ P. J. Crutzen and E. F. Stoermer. The “Anthropocene”. *Global Change Newsletter*, pages 17–18, 2000.
- ¹⁵⁸ Paul J. Crutzen. Geology of mankind. *Nature*, 415(6867):23–23, 2002.
- ¹⁵⁹ Florian Humpenöder, Alexander Popp, Benjamin Leon Bodirsky, Isabelle Weindl, Anne Biewald, Hermann Lotze-Campen, Jan Philipp Dietrich, David Klein, Ulrich Kreidenweis, Christoph Müller, Susanne Rolinski, and Miodrag Stevanovic. Large-scale bioenergy production: how to resolve sustainability trade-offs? *Environmental Research Letters*, 13(2):024011, feb 2018.
- ¹⁶⁰ Jay S Gregg and R César Izaurralde. Effect of crop residue harvest on long-term crop yield, soil erosion and nutrient balance: trade-offs for a sustainable bioenergy feedstock. *Biofuels*, 1(1):69–83, 2010.
- ¹⁶¹ Thorsten Ruf, Mario Gilcher, Thomas Udelhoven, and Christoph Emmerling. Implications of bioenergy cropping for soil: Remote sensing identification of silage maize cultivation and risk assessment concerning soil erosion and compaction. *Land*, 10(2), 2021.
- ¹⁶² Yiping Wu, Fubo Zhao, Shuguang Liu, Lijing Wang, Linjing Qiu, Georgii Alexandrov, and Vinayakam Jothiprakash. Bioenergy production and environmental impacts. *Geoscience Letters*, 5(1):14, 2018.
- ¹⁶³ Markus Bonsch, Florian Humpenöder, Alexander Popp, Benjamin Bodirsky, Jan Philipp Dietrich, Susanne Rolinski, Anne Biewald, Hermann Lotze-Campen, Isabelle Weindl, Dieter Gerten, and Miodrag Stevanovic. Trade-offs between land and water requirements for large-scale bioenergy production. *GCB Bioenergy*, 8(1):11–24, 2016.
- ¹⁶⁴ Jeroen van den Bergh, Carl Folke, Stephen Polasky, Marten Scheffer, and Will Steffen. What if solar energy becomes really cheap? a thought experiment on environmental problem shifting. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14:170–179, 2015.
- ¹⁶⁵ Jasper Abembia Ayelazuno. The ‘new extractivism’ in Ghana: A critical review of its development prospects. *The Extractive Industries and Society*, 1(2):292–302, 2014.
- ¹⁶⁶ Sk. Md. Equeenuddin, S. Tripathy, P.K. Sahoo, and M.K. Panigrahi. Hydrogeochemical characteristics of acid mine drainage and water pollution at makum coalfield, india. *Journal of Geochemical Exploration*, 105(3):75–82, 2010.
- ¹⁶⁷ Nataliya Viktorovna Yurkevich, Natalya Aleksandrovna Abrosimova, Svetlana Borisovna Bortnikova, Yuriy Grigoryevich Karin, and Olga Petrovna Saeva. Geophysical investigations for evaluation of environmental pollution in a mine tailings area. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 99(9-10):1328–1345, 2017.

- ¹⁶⁸ Xiangqin Wang, Mengchang He, Jun Xie, Jianhong Xi, and Xiaofei Lu. Heavy metal pollution of the world largest antimony mine-affected agricultural soils in human province (china). *Journal of Soils and Sediments*, 10(5):827–837, 2010.
- ¹⁶⁹ Olivier Vidal, Fatma Rostom, Cyril François, and Gael Giraud. Global Trends in Metal Consumption and Supply: The Raw Material–Energy Nexus. *Elements*, 13(5):319–324, October 2017.
- ¹⁷⁰ Will Steffen, Wendy Broadgate, Lisa Deutsch, Owen Gaffney, and Cornelia Ludwig. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1):81–98, April 2015.
- ¹⁷¹ Donella H Meadows, Dennis L Meadows, Jorgen Randers, and William W Behrens. The limits to growth. *New York*, 102(1972):27, 1972.
- ¹⁷² Donella Meadows, Jorgen Randers, and Dennis Meadows. *Limits to Growth: The 30-Year Update*. Chelsea Green Publishing, June 2004.
- ¹⁷³ Graham M. Turner. On the Cusp of Global Collapse? Updated Comparison of The Limits to Growth with Historical Data. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 21(2):116–123, 2012.
- ¹⁷⁴ Johan Rockström, Will Steffen, Kevin Noone, Åsa Persson, F. Stuart III Chapin, Eric Lambin, Timothy Lenton, Marten Scheffer, Carl Folke, Hans Joachim Schellnhuber, Björn Nykvist, Cynthia de Wit, Terry Hughes, Sander van der Leeuw, Henning Rodhe, Sverker Sörlin, Peter Snyder, Robert Costanza, Uno Svedin, Malin Falkenmark, Louise Karlberg, Robert Corell, Victoria Fabry, James Hansen, Brian Walker, Diana Liverman, Katherine Richardson, Paul Crutzen, and Jonathan Foley. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 14, November 2009.
- ¹⁷⁵ W. Steffen, K. Richardson, J. Rockström, S. E. Cornell, I. Fetzer, E. M. Bennett, R. Biggs, S. R. Carpenter, W. de Vries, C. A. de Wit, C. Folke, D. Gerten, J. Heinke, G. M. Mace, L. M. Persson, V. Ramanathan, B. Reyers, and S. Sorlin. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223):1259855–1259855, February 2015.
- ¹⁷⁶ Jianguo Liu, Harold Mooney, Vanessa Hull, Steven J. Davis, Joanne Gaskell, Thomas Hertel, Jane Lubchenco, Karen C. Seto, Peter Gleick, Claire Kremen, and Shuxin Li. Systems integration for global sustainability. *Science*, 347(6225), 2015.
- ¹⁷⁷ Russell W. Stratton, Philip J. Wolfe, and James I. Hileman. Impact of Aviation Non-CO₂ Combustion Effects on the Environmental Feasibility of Alternative Jet Fuels. *Environmental Science & Technology*, 45(24):10736–10743, 12 2011.
- ¹⁷⁸ Robert Sausen and Ulrich Schumann. Estimates of the Climate Response to Aircraft CO₂ and NO_x Emissions Scenarios. *Climatic Change*, 44(1):27–58, 2000.

Rapports du GIEC

- IPC¹⁹ IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- IPC¹⁸ IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- ADS⁺¹⁸ Allen, M.R., O.P. Dube, W. Solecki, F. Aragón-Durand, W. Cramer, S. Humphreys, M. Kainuma, J. Kala, N. Mahowald, Y. Mulugetta, R. Perez, M. Wairiu, and K. Zickfeld, 2018: Framing and Context. In: *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- RSJ⁺¹⁸ Rogelj, J., D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Kheshgi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, and M.V. Vilariño, 2018: Mitigation Pathways Compatible with 1.5 °C in the Context of Sustainable Development. In: *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pört-

- ner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)). In Press.
- IPC13 IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- MSB⁺¹³ Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- FMA⁺¹³ Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason and M. Rummukainen, 2013: Evaluation of Climate Models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- KPA⁺¹³ Kirtman, B., S.B. Power, J.A. Adedoyin, G.J. Boer, R. Bojariu, I. Camilloni, F.J. Doblas-Reyes, A.M. Fiore, M. Kimoto, G.A. Meehl, M. Prather, A. Sarr, C. Schär, R. Sutton, G.J. van Oldenborgh, G. Vecchi and H.J. Wang, 2013: Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPC14a IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- SQP⁺¹³ Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, N.L. Bindoff, F.-M. Bréon, J.A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J.M. Gregory, D.L. Hartmann, E. Jansen,

- B. Kirtman, R. Knutti, K. Krishna Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan and S.-P. Xie, 2013: Technical Summary. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- SBA⁺¹⁴ P. Smith, M. Bustamante, H. Ahammad, H. Clark, H. Dong, E.A. El-siddig, H. Haberl, R. Harper, J. House, M. Jafari, O. Masera, C. Mbow, N.H. Ravindranath, C.W. Rice, C. Robledo Abad, A. Romanovskaya, F. Sperling, and F. Tubiello. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, chapter Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
- SBF⁺¹⁴ Schlömer S., T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, and R. Wiser, 2014: Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPC14b IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1–32.
- IPC21 IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- GTA⁺²¹ Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn, F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, H.C. Nnamchi, J. Quaas, J.A. Rivera, S. Sathyendranath, S.L. Smith, B. Trewin, K. von Schuck-

- mann, and R.S. Vose, 2021: Changing State of the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- FSA⁺²¹ Forster, P., T. Storelvmo, K. Armour, W. Collins, J.-L. Dufresne, D. Frame, D.J. Lunt, T. Mauritsen, M.D. Palmer, M. Watanabe, M. Wild, and H. Zhang, 2021: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- IPC00 IPCC, 2000: Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPC01 IPCC, 2001: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2001: Synthesis Report*.
- IPC10 IPCC, 2010: *Climate Change: The IPCC 1990 and 1992 Assessments*. Digitized by the Digitization and Microform Unit, UNOG Library.
- PLG⁺⁹⁹ Penner, J.E., D.H. Lister, D.J. Griggs, D.J. Dokken, and M. McFarland, 1999: *L'aviation et l'atmosphère planétaire* [Penner J.E., D.H. Lister, D.J. Griggs, D.J. Dokken, and M. McFarland (eds.)].

Autres : rapports institutionnels et d'acteurs privés

- ^{ALO+20} Stephen Arrowsmith, David S. Lee, Bethan Owen, Jasper Faber, Lisanne van Wijngaarden, Olivier Boucher, Ayce Celikel, Robin Deransy, Jan Fuglestvedt, Joonas Laukia, Marianne Tronstad Lund, Robert Sausen, Martin Schaefer, Agnieszka Skowron, Stavros Stromatas, and Andrew Watt. Updated analysis of the non-CO₂ climate impacts of aviation and potential policy measures pursuant to the EU Emissions Trading System Directive Article 30(4). Technical report, European Commission, 2020.
- ^{ATA20} ATAG. Waypoint 2050. Technical report, ATAG, 2020.
- ^{Boa12} EPA's Science Advisory Board. SAB Review of EPA's Accounting Framework for Biogenic CO₂ Emissions from Stationary Sources. Technical report, UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2012.
- ^{CGSC15} Martin Cames, Jakob Graichen, Anne Siemons, and Vanessa Cook. Emission Reduction Targets for International Aviation and Shipping. Technical report, Policy Department A for the Committee on Environment, Public Health and Food Safety (ENVI), 2015.
- ^{CHF+16} Martin Cames, Ralph O. Harthan, Jürg Füssler, Michael Lazarus, Carrie M. Lee, Pete Erickson, and Randall Spalding-Fecher. How additional is the Clean Development Mechanism? Technical report, Öko-Institut e.V., 2016.
- ^{Com11} EEA Scientific Committee. Opinion of the EEA Scientific Committee on Greenhouse Gas Accounting in Relation to Bioenergy. Technical report, European Environment Agency, 2011.
- ^{Com20} European Commission. Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability, September 2020.
- ^{Con09} MOET Consortium. More open electrical technologies (moet) project. Technical report, 2009.
- ^{CP17} Adam Christensen and Chelsea Petrenko. CO₂-Based Synthetic Fuel: Assessment of Potential European Capacity and Environmental Performance. Technical report, ICCT, 2017.

- dHv⁺17 Sierk de Jong, Ric Hoefnagels, Joost van Stralen, Marc Londo, Raphael Slade, André Faaij, and Martin Junginger. Renewable Jet Fuel in the European Union – Scenarios and Preconditions for Renewable Jet Fuel Deployment towards 2030. Technical report, Utrecht University, 2017.
- EAS18 EASAC. Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets? Technical report, European Academies’ Science Advisory Council, 2018.
- EAS19 Eurocontrol EASA, EEA. European aviation environmental report 2019. Technical report, EASA, 2019.
- EE15 Ecofys, , and E4tech. The land use change impact of biofuels consumed in the EU. Technical report, European Commission, 2015.
- EPA09 EPA. Draft Regulatory Impact Analysis: Changes to Renewable Fuel Standard Program. Technical Report EPA-420-D-09-001, United States Environmental Protection Agency, May 2009.
- Ern17 Almuth Ernsting. Aviation biofuels: How ICAO and industry plans for ‘sustainable alternative aviation fuels’ could lead to planes flying on palm oil. Technical report, Biofuelwatch, 2017.
- Eur20 European Commission. Directorate General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. *Study on the EU’s list of critical raw materials (2020): final report*. Publications Office, LU, 2020.
- Fel15 James L Felder. Nasa electric propulsion system studies. 2015.
- Gmb03 Airbus Deutschland GmbH. Liquid hydrogen fuelled aircraft – system analysis. cryoplane. Technical report, 2003.
- gro18 Environment group. Climate adaptation synthesis. Technical report, International Civil Aviation Organization, 2018.
- GZR19 Brandon Graver, Kevin Zhang, and Dan Rutherford. CO₂ emissions from commercial aviation, 2018. Technical report, ICCT, 2019.
- IAN⁺20 ICF Consulting, Air Transportation Analytics, NewClimate Institute, Cambridge Econometrics, HFW, and Sven Starckx. Assessment of ICAO’s global market-based measure (CORSIA) pursuant to Article 28b and for studying cost pass-through pursuant to Article 3d of the EU ETS Directive. Technical report, European Commission, 2020.
- IAT19 IATA. Carbon offsetting for international aviation. Technical report, IATA, 2019.
- IAT20 IATA. Aircraft technology roadmap to 2050. Technical report, International Air Transport Association, 2020.
- ICA18 ICAO. Sustainable Aviation Fuels Guide. Technical report, ICAO, 2018.
- ICA19a ICAO *Environmental Report 2019*, chapter Chapter 4. Climate Change Mitigation: Technology and Operations. ICAO, 2019.
- ICA19b ICAO *Environmental Report 2019*, chapter Chapter 6. Climate Change Mitigation: CORSIA. ICAO, 2019.
- ICA19c ICAO. *ICAO Environmental Report 2019*, chapter Chapter 5. Climate Change Mitigation: Sustainable Aviation Fuels. ICAO, 2019.
- IEA12 IEA. Key world energy statistics 2012. Technical report, IEA, 2012.
- IEA19a IEA. Co₂ emissions from fuel combustion. Technical report, IEA, 2019.

- IEA^{19b} IEA. Renewables 2019. Technical report, IEA, 2019.
- IEA^{20a} IEA. Co₂ emissions from fuel combustion 2020 edition. Technical report, IEA, 2020.
- IEA^{20b} IEA. Energy efficiency indicators. Technical report, IEA, 2020.
- IEA^{20c} IEA. Key world energy statistics 2020. Technical report, IEA, 2020.
- IPB¹⁹ IPBES. *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES secretariat, Bonn, Germany, 2019.
- KAL⁺²¹ Milan Klöwer, Myles Allen, David Lee, Simon Proud, Leo Gallagher, and Agnieszka Skowron. Quantifying aviation’s contribution to global warming. *Earth and Space Science Open Archive*, page 20, 2021.
- KH²⁰ Barbara Kuepper and Jonas Hulsens. The Dark Side of Neste’s Biofuel Production. Technical report, Milieudefensie, Friends of the Earth Netherlands, 2020.
- Kir¹¹ D. R. Kirk. *MAE3241: Aerodynamics and flight mechanics course*. Florida Institute of Technology, 2011.
- LBMB²⁰ Charles Adrien Louis, César Bouvet, Guillaume Martin, and Sylvain Boucherand. Climat : pouvons-nous (encore) prendre l’avion ? Technical report, B & L Evolution, 2020.
- Lee¹⁸ David S. Lee. International aviation and the Paris Agreement temperature. Technical report, Manchester Metropolitan University, 2018.
- Mac⁶⁵ Colin M. MacLeod. Restoring the quality of our environment. Technical report, Environmental Pollution Panel, President’s Science Advisory Committee, 1965.
- Mal¹⁷ Chris Malins. What role is there for electrofuel technologies in European transport’s low carbon future? Technical report, Cerulogy, 2017.
- McK²⁰ McKinsey & Company. Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. Technical report, Clean Sky 2 JU and Fuel Cells and Hydrogen 2 JU, 2020.
- MGS⁺¹⁸ Marilena Muntean, Diego Guizzardi, Edwin Schaaf, Monica Crippa, Efisio Solazzo, Jos Olivier, and Elisabetta Vignati. Fossil CO₂ emissions of all world countries. Technical report, Joint Research Centre, 2018.
- NAS¹⁶ National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research: Reducing Global Carbon Emissions*. The National Academies Press, Washington, DC, 2016.
- OP²⁰ J.G.J. Olivier and J.A.H.W. Peters. Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions: 2020 report. Technical report, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague, 2020.
- OPS²¹ Jane O’Malley, Nikita Pavlenko, and Stephanie Searle. Estimating sustainable aviation fuel feedstock availability to meet growing European Union demand. Working paper 2021-13, ICCT, 2021.
- PBSC¹⁰ Jean-Loup Puget, René Blanchet, Jean Salençon, and Alain Carpentier. Le changement climatique. Technical report, Académie des sciences, 2010.

- Pra20 L. Prado. Influence of climate change on commercial aviation: sensitivity analysis study on takeoff distance calculation. Technical report, ISAE-SUPAERO Master thesis, 2020.
- Pro17 Environmental Protection. Annex 16 to the convention on international civil aviation—volume i, ii and iii. *ICAO*, 2017.
- RFL⁺17 John Risher, Obaid Faroon, Fernandos Llados, Lisa Ingerman, and Mario Citra. Toxicological Profile for JP-5, JP-8, and Jet A fuels. Technical report, U.S. Department of health and human services, 2017.
- Sin07 M Sinnett. 787 No-Bleed Systems: Saving Fuel and enhancing operational efficiencies. *Aero Quarterly, QTR-04 / 07*, 4:6, 2007.
- SWH10 Russell W. Stratton, Hsin Min Wong, and James I. Hileman. Life Cycle Greenhouse Gas Emission from Alternative Jet Fuels. Project 28 report, PARTNER, 2010.
- SWR⁺16 Patrick Schmidt, Werner Weindorf, Arne Roth, Valentin Batteiger, and Florian Riegel. Power-to-Liquids: Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel. Technical report, German Environment Agency, 2016.
- SZWR16 Patrick Schmidt, Werner Zittel, Werner Weindorf, and Tetyana Raksha. Renewables in transport 2050. Technical report, FVV, 2016.
- TD10 C. Thomas and A. J. Drew. Challenges of growth environmental update study: Climate adaptation case studies. Technical report, EUROCONTROL, 2010.
- UNE20 UNEP. Emissions gap report 2020. Technical report, United Nations Environment Programme (UNEP), 2020.

**Peut-on caractériser l'impact de l'aviation sur le climat ?
Peut-on comparer les effets CO₂ et les effets non CO₂ ?
Quelles sont les solutions technologiques étudiées de nos jours pour rendre l'aviation durable ? Peut-on relier la vitesse d'évolution du trafic aérien à la part du budget carbone consacrée à l'aviation ? Peut-on faire un bilan des ressources énergétiques disponibles ?**

Ces questions ont motivé l'écriture d'un rapport de référence au sein de l'ISAE-SUPAERO. L'objectif de ces travaux n'est pas de prendre parti ni de répondre aux différentes questions évoquées, car les réponses dépendent en grande partie de choix de société et d'évolutions techno-économiques impossibles à prédire avec certitude. En revanche, l'objectif de ce rapport est de fournir à chacun, à partir de notre position de scientifiques, les éléments nécessaires à la construction d'opinions éclairées sur ces questions, aussi objectivement que possible. Par effet d'entraînement, nous espérons aussi via ce rapport susciter des débats et ainsi participer à l'émergence d'un positionnement collectif sur ces enjeux cruciaux.

ISAE-SUPAERO

10, avenue Édouard Belin - BP 54032
31 055 Toulouse CEDEX 4 - France
contact-referentiel@isae-supaero.fr

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



DOI 10.34849/76rd-c59

