



GRUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL
SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT



RAPPORT SPÉCIAL DU GIEC
L'AVIATION ET
L'ATMOSPHÈRE PLANÉTAIRE

Résumé à l'intention des décideurs



GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL
SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT



Résumé à l'intention des décideurs

L'aviation et l'atmosphère planétaire

Responsables de la rédaction

Joyce E. Penner
University of Michigan

David H. Lister
*Defence Research
and Evaluation Agency*

David J. Griggs
*Meteorological Office
(Royaume-Uni)*

David J. Dokken
*University Corporation
for Atmospheric Research*

Mack McFarland
DuPont Fluoroproducts

Rapport spécial des Groupes de travail I et III du GIEC

avec le concours du

Groupe d'experts d'évaluation scientifique du Protocole de Montréal
relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone

Publié pour le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

© 1999, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

ISBN: 92-9169-211-5

Traduit par l'OACI pour le GIEC

Table des matières

Avant-propos	v
Préface	vii
1. Introduction	3
2. Quels sont les effets des avions sur le climat et l’ozone?	3
3. Quelles sont les projections de la croissance des émissions de l’aviation?	6
4. Quels sont les impacts actuels et futurs de l’aviation subsonique sur le forçage radiatif et le rayonnement UV? ..	6
4.1 Dioxyde de carbone	6
4.2 Ozone	7
4.3 Méthane	8
4.4 Vapeur d’eau	8
4.5 Traînée de condensation	8
4.6 Cirrus	8
4.7 Aérosols de sulfate et de suie	8
4.8 Quels sont les effets globaux des avions subsoniques sur le climat?	9
4.9 Quels sont les effets globaux des avions supersoniques sur le rayonnement UV-B?	10
5. Quels sont les effets actuels et futurs de l’aviation supersonique sur le forçage radiatif et le rayonnement UV? ..	10
6. Quelles sont les options pour réduire les émissions et leurs effets?	11
6.1 Options de technologie des avions et des moteurs	11
6.2 Options de carburants	12
6.3 Options opérationnelles	12
6.4 Options réglementaires, économiques et autres	12
7. Questions pour l’avenir	13
Liste des publications du GIEC	15

Avant-propos

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été formé conjointement en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) pour : *a*) évaluer les informations disponibles sur la science, les effets, les aspects économiques et les options d'atténuation de l'évolution du climat et/ou d'adaptation à cette évolution; *b*) donner, sur demande, des avis scientifiques/techniques/socio-économiques à la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (UNFCCC). Depuis lors, le GIEC a présenté une série de rapports d'évaluation, rapports spéciaux, notes techniques, méthodologies et autres documents qui sont devenus des ouvrages de référence largement utilisés par les responsables de la politique, les scientifiques et d'autres experts.

Le présent Rapport spécial a été élaboré à la demande de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) et des Parties au Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Il fait le point et l'évaluation des aspects pertinents de la science de l'atmosphère, de la technologie de l'aviation et des aspects socio-économiques liés aux options d'atténuation, pour la flotte aérienne subsonique et la flotte supersonique. Il traite des effets potentiels de l'aviation dans le passé et dans l'avenir, tant sur l'appauvrissement en ozone dans la stratosphère que sur l'évolution du climat dans le monde; cependant, il ne traite pas des impacts environnementaux de l'aviation à l'échelle locale. Le rapport fait la synthèse des constatations qui permettent d'identifier et de caractériser les options d'atténuation des effets futurs.

Comme de coutume dans le GIEC, la réussite de l'élaboration du présent rapport est due surtout et avant tout à l'enthousiasme et à la coopération d'experts du monde entier, dans de

nombreuses disciplines apparentées mais différentes. Nous souhaitons exprimer notre gratitude à l'égard de tous les auteurs coordonnateurs d'avant-projets, auteurs d'avant-projets, auteurs collaborateurs, réviseurs et réviseurs experts. Ces personnes ont consacré énormément de travail et de temps à la réalisation de ce rapport et nous leur sommes extrêmement reconnaissants de leur dévouement à l'activité du GIEC.

Nous souhaitons aussi adresser nos vifs remerciements à :

- Robert Watson, Président du GIEC et Co-Président du Groupe d'experts d'évaluation scientifique du Protocole de Montréal
- John Houghton, Ding Yihui, Bert Metz et Ogunlade Davidson, Co-Présidents des Groupes de travail I et III du GIEC
- Daniel Albritton, Co-Président du Groupe d'experts d'évaluation scientifique du Protocole de Montréal
- David Lister et Joyce Penner, coordonnateurs du présent Rapport spécial
- Daniel Albritton, John Crayston, Ogunlade Davidson, David Griggs, Neil Harris, John Houghton, Mack McFarland, Bert Metz, Nelson Sabogal, N. Sundararaman, Robert Watson et Howard Wesoky, membres du Comité de coordination du présent Rapport spécial
- David Griggs, David Dokken et tout le personnel de soutien technique des Groupes de travail I et II, notamment Mack McFarland, Richard Moss, Anne Murrill, Sandy McCracken, Maria Noguera, Laura Van Wie McGrory, Neil Leary, Paul van der Linden et Flo Ormond, et Neil Harris qui a apporté une aide additionnelle.
- N. Sundararaman, Secrétaire du GIEC, et son personnel : Rudie Bourgeois, Cecilia Tanikie et Chantal Ettori.

G.O.P. Obasi

Secrétaire général
Organisation météorologique mondiale

K. Töpfer

Directeur exécutif
Programme des Nations Unies pour l'environnement
et
Directeur général
Office des Nations Unies à Nairobi

Préface

L'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) ayant demandé une évaluation des conséquences des émissions de gaz à effet de serre venant des moteurs d'aéronefs, le GIEC décida lors de sa douzième session (Mexico, 11-13 septembre 1996) d'élaborer le présent Rapport spécial, *L'aviation et l'atmosphère planétaire*, avec le concours du Groupe d'experts d'évaluation scientifique du Protocole de Montréal. La tâche fut initialement confiée aux Groupes de travail I et II du GIEC, mais à la suite d'un changement dans le mandat des groupes de travail (treizième session du GIEC, Maldives, 22 et 25-28 septembre 1997), la tâche fut transférée aux Groupes de travail I et III du GIEC, le soutien administratif restant confié aux groupes de soutien technique des Groupes de travail I et II.

Il ne s'est écoulé que moins de 100 ans depuis le premier vol d'un appareil propulsé par un moteur, mais l'industrie de l'aviation a connu une croissance rapide et elle est devenue une partie intégrante et vitale de la société moderne. A moins d'intervention politique, la croissance va sans doute se poursuivre. Il importe donc d'étudier les effets actuels et les effets futurs possibles des émissions de moteurs d'aéronefs sur l'atmosphère. Un aspect particulier du présent rapport est celui de la participation active d'experts techniques de l'industrie de l'aviation, y compris transporteurs aériens, aviateurs et motoristes, à côté des scientifiques de l'atmosphère. Cette participation a été cruciale dans la réalisation de ce qui nous paraît être l'évaluation la plus complète à ce jour des effets de l'aviation sur l'atmosphère planétaire. Le présent Rapport spécial est le premier rapport du GIEC à examiner un sous-secteur industriel particulier, mais d'autres secteurs mériteraient tout autant d'être étudiés.

Le rapport examine tous les gaz et particules émis par les aéronefs dans la haute atmosphère et le rôle qu'ils jouent dans la modification des propriétés chimiques de l'atmosphère et dans le déclenchement de la formation de traînées de condensation et de cirrus. Le rapport examine ensuite: *a*) comment les propriétés radiatives de l'atmosphère peuvent en être modifiées et peut-être conduire à des changements climatiques; *b*) comment la couche d'ozone pourrait être modifiée, avec par voie de conséquence des changements dans le rayonnement ultraviolet qui atteint la surface de la Terre. Le rapport examine aussi comment des changements potentiels dans la technologie des aéronefs, l'exploitation technique du transport aérien et le cadre institutionnel, réglementaire et économique pourraient influencer à l'avenir sur les émissions. Le rapport ne traite pas des effets des émissions de moteurs sur la qualité locale de l'air à proximité de la surface.

Le but du présent Rapport spécial est de donner des informations exactes et impartiales en relation avec les décisions de politique, pour servir à l'industrie de l'aviation et aux communautés des experts et des responsables de la politique. Le rapport fait le point des connaissances actuelles et identifie les

secteurs où notre compréhension est insuffisante et sur lesquels il faudrait sans tarder travailler davantage. Il ne présente pas de recommandations de politique et ne suggère pas de préférences de politique, ce qui est conforme à la pratique du GIEC.

Le rapport est le résultat de contributions de 107 auteurs d'avant-projets, ressortissants de 18 pays. Des projets successifs du rapport furent diffusés pour une revue par des experts, suivie d'une revue par des administrations nationales et des experts. Plus de 100 auteurs collaborateurs ont soumis des projets de textes et des informations aux auteurs d'avant-projets et plus de 150 réviseurs ont soumis d'utiles suggestions d'améliorations au cours du processus de revue. Tous les commentaires reçus ont été soigneusement analysés et incorporés dans un document révisé qui fut soumis à l'examen d'une session conjointe des Groupes de travail I et III du GIEC, à San José, Costa Rica, du 12 au 14 avril 1999. C'est là que le Résumé pour les responsables de la politique fut approuvé en détail et que le rapport de base fut accepté.

Nous souhaitons adresser nos vifs remerciements aux coordonnateurs du rapport, David Lister et Joyce Penner; à tous les auteurs coordonnateurs d'avant-projets, aux auteurs d'avant-projets et aux participants aux revues, dont les compétences, la diligence et la patience ont étayé la réussite de la confection du présent rapport; et aux nombreux collaborateurs et réviseurs pour leur dévouement et leur travail précieux et assidu. Nous remercions le Comité de coordination de ses sages conseils et indications durant la préparation du rapport. Nous sommes reconnaissants :

- à l'OACI d'avoir été l'hôte de la réunion initiale d'orientation sur le rapport et de la réunion finale de rédaction, et d'avoir traduit le Résumé à l'intention des décideurs en français, en arabe, en chinois, en espagnol et en russe (l'OACI a aussi apporté la contribution technique demandée),
- au Gouvernement de la Trinité-et-Tobago qui a été l'hôte de la première réunion de rédaction,
- à l'Association du transport aérien international (IATA) qui a été l'hôte de la deuxième réunion de rédaction,
- au Gouvernement de Costa Rica qui a été l'hôte de la session conjointe des Groupes de travail I et III du GIEC (12-14 avril 1999) au cours de laquelle le Résumé à l'intention des décideurs a été approuvé ligne par ligne et l'évaluation de base a été acceptée.

En particulier, nous sommes reconnaissants à John Crayston (OACI), Steve Pollonais (Gouvernement de la Trinité-et-Tobago), Leonie Dobbie (IATA) et Max Campos (Gouvernement de Costa Rica) d'avoir pris sur eux la lourde charge de l'organisation de ces réunions.

Nous remercions aussi Anne Murrill, du Groupe de soutien technique du Groupe de travail I, et Sandy MacCracken, du Groupe de soutien technique du Groupe de travail II, de leur soutien plaisant et inlassable pendant toute la durée de l'élaboration du rapport. D'autres membres des groupes de soutien technique des Groupes de travail I et II ont aussi apporté un aide considérable, notamment Richard Moss, Mack McFarland, Maria Noguera, Laura Van Wie McGrory, Neil Leary, Paul van der Linden et Flo Ormond. Le personnel du Secrétariat du GIEC, Rudie Bourgeois, Cecilia Tanikie et Chantal Etori, ont assuré le soutien logistique des relations avec les gouvernements et des déplacements des experts de pays en développement et à économie en transition.

Robert Watson, Président du GIEC

John Houghton, Co-Président du Groupe de travail I du GIEC

Ding Yihui, Co-Président du Groupe de travail I du GIEC

Bert Metz, Co-Président du Groupe de travail III du GIEC

Ogunlade Davidson, Co-Président du Groupe de travail III du GIEC

N. Sundararaman, Secrétaire du GIEC

David Griggs, soutien technique du Groupe de travail I du GIEC

David Dokken, soutien technique du Groupe de travail II du GIEC

RÉSUMÉ À L'INTENTION DES DÉCIDEURS

L'AVIATION ET L'ATMOSPHÈRE PLANÉTAIRE

Rapport spécial des Groupes de travail I et III du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Le présent résumé, approuvé en détail lors d'une session conjointe des Groupes de travail I et III du GIEC (San José, Costa Rica, 12-14 avril 1999), constitue la déclaration officiellement agréée du GIEC au sujet des connaissances actuelles sur l'aviation et l'atmosphère planétaire.

Basé sur un projet rédigé par :

David H. Lister, Joyce E. Penner, David J. Griggs, John T. Houghton, Daniel L. Albritton, John Begin, Gerard Bekebrede, John Crayston, Ogunlade Davidson, Richard G. Derwent, David J. Dokken, Julie Ellis, David W. Fahey, John E. Frederick, Randall Friedl, Neil Harris, Stephen C. Henderson, John F. Hennigan, Ivar Isaksen, Charles H. Jackman, Jerry Lewis, Mack McFarland, Bert Metz, John Montgomery, Richard W. Niedzwiecki, Michael Prather, Keith R. Ryan, Nelson Sabogal, Robert Sausen, Ulrich Schumann, Hugh J. Somerville, N. Sundararaman, Ding Yihui, Upali K. Wickrama, Howard L. Wesoky

1. Introduction

Le présent rapport évalue l'effet des aéronefs sur le climat et l'ozone atmosphérique; c'est le premier rapport du GIEC sur un sous-secteur industriel particulier. Il a été élaboré par le GIEC avec le concours du Groupe d'experts d'évaluation scientifique du Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, à la suite d'une demande présentée par l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI)¹ à cause de l'impact potentiel des émissions de l'aviation. Celles-ci sont les émissions anthropogènes prédominantes déposées directement dans la haute troposphère et la basse stratosphère.

L'aviation a connu une expansion rapide en parallèle avec la croissance de l'économie mondiale. Le trafic de passagers (exprimé en passagers-kilomètres payants²) a augmenté depuis 1960 de près de 9 pour cent par an, 2,4 fois le taux de croissance moyen du Produit intérieur brut (PIB). Le trafic de fret, transporté à raison de 80 pour cent environ par des avions de transport de passagers, s'est aussi développé dans le même temps. Le taux de croissance du trafic de passagers a ralenti, l'industrie de l'aviation arrivant à sa maturité, pour s'établir à 5 pour cent environ en 1997. Les émissions totales de l'aviation ont augmenté, car la demande accrue de transport aérien a progressé plus vite que les réductions dans les émissions spécifiques³ dues à des améliorations constantes de la technologie et des procédures opérationnelles. S'il n'y a pas de restrictions à la demande, il est à prévoir que le trafic de passagers augmenterait à des taux supérieurs à ceux du PIB durant la période évaluée dans le présent rapport.

Les effets de l'aviation d'aujourd'hui et d'un éventail de projections de croissance de l'aviation (comprenant passagers, fret et militaires), en l'absence de restrictions, sont examinés dans le présent rapport, y compris les effets possibles d'une flotte d'avions supersoniques commerciaux de deuxième génération. Le rapport décrit aussi la situation actuelle de la technologie des aéronefs, des procédures opérationnelles et des options pour atténuer l'impact futur de l'aviation sur l'atmosphère planétaire. Le rapport n'examine pas les effets environnementaux locaux des émissions de moteurs d'aéronefs, ni les effets environnementaux indirects de l'activité de l'aviation, par exemple l'utilisation d'énergie par les transports au sol dans les aéroports.

2. Quels sont les effets des aéronefs sur le climat et l'ozone?

Les aéronefs émettent des gaz et des particules directement dans la haute troposphère et dans la basse stratosphère, où ils ont un impact sur la composition de l'atmosphère. Ces gaz et particules modifient la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, notamment le dioxyde de carbone (CO₂), l'ozone (O₃) et le méthane (CH₄), déclenchent la formation de traînées de condensation et pourraient augmenter la nébulosité en cirrus, tout cela contribuant à des changements climatiques (voir encadré page 4).

Les principales émissions des aéronefs comprennent les gaz à effet de serre dioxyde de carbone et vapeur d'eau (H₂O). D'autres émissions majeures sont l'oxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO₂) (qui ensemble sont appelés NO_x), les oxydes de soufre (SO_x) et la suie. La quantité totale de carburant aviation brûlée, ainsi que les émissions totales de dioxyde de carbone, NO_x et vapeur d'eau par les aéronefs, sont bien comprises comparativement à d'autres paramètres importants dans l'évaluation.

Les impacts climatiques des gaz et particules émis et formés à cause de l'aviation sont plus difficiles à quantifier que les émissions; ils peuvent toutefois se comparer les uns avec les autres et avec les effets climatiques d'autres secteurs, par application du concept de forçage radiatif⁴. Comme le dioxyde de carbone a une longue durée de résidence dans l'atmosphère (≈100 ans) et de ce fait se propage bien dans toute l'atmosphère, les effets des émissions de dioxyde de carbone venant des aéronefs ne peuvent se distinguer de la même quantité émise par une autre source. Les autres gaz (par exemple NO_x, SO_x, vapeur d'eau) et particules ont des durées de résidence plus courtes et restent concentrés à proximité des itinéraires de vol, principalement dans les moyennes latitudes de l'hémisphère Nord. Ces émissions peuvent mener à un forçage radiatif se situant régionalement à proximité des itinéraires de vol dans le cas de certains composants (par exemple ozone et traînées de condensation), à la différence des émissions qui se propagent dans le monde (par exemple dioxyde de carbone et méthane).

Le changement climatique moyen dans le monde est assez bien représenté par le forçage radiatif moyen dans le monde, par exemple si on évalue les contributions de l'aviation à l'élévation de la température moyenne dans le monde ou du niveau de la mer. Toutefois, du fait que certaines des principales contributions de l'aviation au forçage radiatif se situent surtout dans les moyennes latitudes de l'hémisphère Nord, la réaction du climat régional pourra différer de celle qui résulte d'un forçage radiatif moyen à l'échelle mondiale. L'impact des aéronefs sur le climat régional pourrait être important mais n'a pas été évalué dans le présent rapport.

¹ L'OACI est l'institution spécialisée des Nations Unies qui a la responsabilité, à l'échelle mondiale, d'établir les normes, pratiques recommandées et éléments indicatifs sur différents aspects de l'aviation civile internationale, y compris la protection de l'environnement.

² Le passager-km payant est une unité de mesure du trafic transporté par l'aviation commerciale : un passager payant transporté sur un km.

³ Les émissions spécifiques sont les émissions par unité de trafic transporté, par exemple par passager-km payant.

⁴ Le forçage radiatif donne une indication de l'ampleur d'un mécanisme de changement potentiel du climat. Il exprime la perturbation ou le changement dans l'équilibre énergétique du système atmosphérique de la Terre, en watts par mètre carré (W m⁻²). Des valeurs positives de forçage radiatif laissent entendre un réchauffement net et des valeurs négatives laissent entendre un refroidissement.

La science du changement climatique

Voici certaines des principales conclusions du Résumé à l'intention des décideurs du Groupe de travail I du deuxième Rapport d'évaluation du GIEC publié en 1995, qui concerne les effets de toutes les émissions anthropogènes sur les changements climatiques :

- Les augmentations des concentrations de gaz à effet de serre depuis l'époque préindustrielle (c'est-à-dire depuis 1750 environ) ont conduit à un forçage radiatif positif du climat, tendant à réchauffer la surface de la Terre et à produire d'autres changements climatiques.
- Les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre, dioxyde de carbone, méthane et oxyde d'azote (N₂O), entre autres, ont nettement augmenté : d'environ 30 pour cent, 145 pour cent et 15 pour cent respectivement (valeurs en 1992). Ces tendances peuvent être attribuées en grande partie aux activités humaines, surtout utilisation de combustibles fossiles, changements dans l'utilisation des terres et agriculture.
- De nombreux gaz à effet de serre restent longtemps dans l'atmosphère (dans le cas du dioxyde de carbone et de l'oxyde d'azote, depuis plusieurs décennies jusqu'à des siècles). C'est ainsi que si les émissions de dioxyde de carbone étaient maintenues plus ou moins aux niveaux actuels (1994), elles conduiraient à un taux d'augmentation presque constant dans les concentrations atmosphériques pendant au moins deux siècles, atteignant environ 500 ppmv (environ deux fois la concentration préindustrielle de 280 ppmv) à la fin du XXI^{ème} siècle.
- Les aérosols troposphériques résultant de la combustion de combustibles fossiles, de la combustion de biomasse et d'autres sources ont conduit à un forçage radiatif négatif qui, tout en étant focalisé dans des régions particulières et des zones subcontinentales, pourrait avoir sur les régimes climatiques des effets allant de continentaux à hémisphériques. Par contraste avec les gaz à effet de serre très durables, les aérosols anthropogènes ont une vie très courte dans l'atmosphère; ainsi leur forçage radiatif s'ajuste rapidement aux augmentations ou diminutions des émissions.
- Notre aptitude à quantifier, à partir des observations du climat, l'influence humaine sur le climat planétaire est actuellement limitée parce que le signal attendu est encore en train d'émerger du bruit de fond de la variabilité naturelle et parce qu'il y a des incertitudes dans des facteurs clés. Ceux-ci comprennent l'ampleur et les modes de la variabilité naturelle sur le long terme, ainsi que les modes temporels de forçage par suite et en fonction de changements dans les concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols, et de changements sur les surfaces terrestres. Néanmoins, la somme des indications donne à penser qu'il y a une influence humaine discernable sur le climat planétaire.
- Le GIEC a développé une série de scénarios, IS92a-f, pour les futures émissions de gaz à effet de serre et émissions annonciatrices d'aérosols, sur la base d'hypothèses relatives à la population et à la croissance économique, à l'utilisation des terres, au changement technologique, à la disponibilité d'énergie et à l'assortiment de combustibles au cours de la période de 1990 à 2100. Grâce à la compréhension du cycle mondial du carbone et de la chimie de l'atmosphère, on peut à partir de ces émissions établir des projections des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et d'aérosols ainsi que des perturbations du forçage radiatif naturel. On peut alors utiliser des modèles climatiques pour établir des projections du climat futur.
- Les estimations de l'élévation de la température moyenne mondiale de l'air à la surface d'ici à 2100 par rapport à 1990, pour les scénarios IS92, vont de 1 °C à 3,5 °C. Dans tous les cas, le taux moyen de réchauffement serait probablement supérieur à tout réchauffement intervenu au cours des 10 000 dernières années. Les changements dans les températures régionales pourraient être nettement différents de la moyenne mondiale et les changements réels d'année en année ou de décennie en décennie marqueraient une variabilité naturelle considérable. Un réchauffement général conduirait probablement à une augmentation de la fréquence de jours extrêmement chauds et à une diminution de la fréquence de jours extrêmement froids.
- Le niveau moyen de la mer s'élèverait probablement par suite de l'expansion thermique des océans et de la fonte des glaciers et des plaques de glace. Les estimations de l'élévation du niveau de la mer d'ici à 2100 par rapport à 1990, pour les scénarios IS92, vont de 15 cm à 95 cm.
- Des températures plus chaudes conduiront à un cycle hydrologique plus vigoureux; cela se traduit par des perspectives de plus grandes sécheresses et/ou inondations en certains endroits et de périodes de moins grandes sécheresses et/ou inondations en d'autres endroits. Plusieurs modèles indiquent une augmentation de l'intensité des précipitations, ce qui laisse entrevoir la possibilité de chutes de pluie plus extrêmes.

L'ozone est un gaz à effet de serre. Il forme aussi un écran de protection de la surface de la Terre contre les rayons ultraviolets (UV) nuisibles, et il est un polluant atmosphérique assez répandu. Les NO_x émis par les aéronefs jouent un rôle dans la chimie de l'ozone. Les avions subsoniques volent dans la haute

troposphère et la basse stratosphère (à des altitudes d'environ 9 à 13 km), alors que les avions supersoniques volent en croisière à plusieurs kilomètres plus haut (à environ 17 à 20 km) dans la stratosphère. Dans la haute troposphère et dans la basse stratosphère, l'ozone augmente normalement par suite des

Tableau 1 : Résumé des scénarios futurs de l'aviation dans le monde utilisés dans le présent rapport

Appellation du scénario	Croissance moyenne du trafic par an (1990–2050) ¹	Taux annuel moyen de croissance des consommations de carburant (1990–2050) ²	Taux annuel moyen de croissance économique	Taux annuel moyen de croissance de la population	Rapport du trafic (2050/1990)	Rapport des consommations de carburant (2050/1990)	Notes
Fa1	3,1%	1,7%	2,9% 1990–2025 2,3% 1990–2100	1,4% 1990–2025 0,7% 1990–2100	6,4	2,7	Scénario de référence élaboré par le Groupe de soutien prévisionnel et d'analyse économique (FESG) de l'OACI; croissance économique médiane du GIEC (1992); technologie pour meilleur rendement des carburants et réduction des NO _x
Fa1H	3,1%	2,0%	2,9% 1990–2025 2,3% 1990–2100	1,4% 1990–2025 0,7% 1990–2100	6,4	3,3	Trafic Fa1 et scénario de technologie avec une flotte d'avions supersoniques remplaçant une partie de la flotte subsonique
Fa2	3,1%	1,7%	2,9% 1990–2025 2,3% 1990–2100	1,4% 1990–2025 0,7% 1990–2100	6,4	2,7	Scénario de trafic Fa1, technologie axée davantage sur la réduction des NO _x , mais amélioration un peu plus faible du rendement des carburants
Fc1	2,2%	0,8%	2,0% 1990–2025 1,2% 1990–2100	1,1% 1990–2025 0,2% 1990–2100	3,6	1,6	Scénario de faible croissance du FESG; technologie comme dans le scénario Fa1
Fe1	3,9%	2,5%	3,5% 1990–2025 3,0% 1990–2100	1,4% 1990–2025 0,7% 1990–2100	10,1	4,4	Scénario de forte croissance du FESG; technologie comme dans le scénario Fa1
Eab	4,0%	3,2%			10,7	6,6	Scénario de croissance du trafic basé sur IS92a élaboré par le Fonds de défense de l'environnement (FDE); technologie pour très faibles NO _x
Edh	4,7%	3,8%			15,5	9,4	Scénario FDE de forte croissance du trafic; technologie pour très faibles NO _x

¹Trafic en passagers-km payants.
²Toute l'aviation (passagers, fret et militaire).

augmentations de NO_x, et le méthane diminue normalement. Aux plus hautes altitudes, les augmentations de NO_x mènent à une diminution de la couche d'ozone stratosphérique. Les durées de vie des NO_x annonciateurs d'ozone dans ces régions

augmentent avec l'altitude et par conséquent les perturbations de l'ozone par les aéronefs dépendent de l'altitude d'injection des NO_x et varient entre l'échelle régionale dans la troposphère et l'échelle mondiale dans la stratosphère.

La vapeur d'eau, les SO_x (qui forment des particules de sulfate) et la suie⁵ jouent des rôles tant directs qu'indirects dans les changements climatiques et la chimie de l'ozone.

3. Quelles sont les projections de la croissance des émissions de l'aviation?

Les voyages de passagers aériens dans le monde, exprimés en passagers-km payants, augmenteraient, selon les projections, d'environ 5 pour cent par an entre 1990 et 2015, alors que la consommation totale de carburant aviation (transports de passagers, fret, militaires) augmenterait de 3 pour cent par an sur la même période, la différence étant due en grande partie à une efficacité améliorée des aéronefs.⁶ Comme les projections au-delà de cette période sont plus incertaines, un éventail de scénarios futurs d'émissions sans restrictions est examiné dans le présent rapport (voir Tableau 1 et Figure 1). Tous ces scénarios admettent l'hypothèse que les améliorations technologiques menant à des émissions réduites par passager-km payant continueront à l'avenir et que l'utilisation optimale de l'espace aérien disponible (c'est-à-dire gestion idéale du trafic aérien) sera réalisée d'ici à 2050. Si ces améliorations ne se réalisent pas, les consommations de carburant et les émissions seront plus fortes. On a admis en outre que le nombre des aéronefs ainsi que le nombre des aéroports et des moyens d'infrastructure connexes continueront d'augmenter et ne limiteront pas la croissance de la demande de voyages aériens. Si l'infrastructure n'était pas disponible, la croissance du trafic admise dans ces scénarios ne se réaliserait pas.

Le GIEC (1992)⁷ a développé un éventail de scénarios (IS92a-f) d'émissions futures de gaz à effet de serre et d'émissions annuaires d'aérosols, basés sur des hypothèses relatives à la population et à la croissance économique, à l'utilisation des terres, aux changements technologiques, à la disponibilité d'énergie et à des assortiments de carburants au cours de la période de 1990 à 2100. Le scénario IS92a est un scénario d'émissions médian. Les scénarios d'émissions futures ne prédisent pas l'avenir. Par leur nature, ils sont incertains parce qu'ils reposent sur des hypothèses différentes au sujet de l'avenir; plus l'horizon s'éloigne, plus les scénarios deviennent incertains. Les scénarios d'émissions d'aéronefs développés ici reposent sur les

hypothèses de croissance économique et de population que l'on trouve dans l'éventail de scénarios IS92 (voir Tableau 1 et Figure 1). Dans les sections qui suivent, le scénario Fa1 servira à illustrer les effets possibles des aéronefs et il sera appelé scénario de référence. Ses hypothèses sont en relation avec celles du scénario IS92a. Les autres scénarios d'émissions d'aéronefs ont été construits à partir d'une gamme de projections de l'économie et de la population venant des scénarios IS92a-e. Ces scénarios représentent un éventail de croissances plausibles de l'aviation et fournissent une base d'analyse de sensibilité pour la modélisation du climat. Cependant, le scénario Edh à forte croissance paraît moins plausible et le scénario Fc1 à faible croissance serait probablement dépassé, vu l'état actuel de l'industrie et les développements planifiés.

4. Quels sont les impacts actuels et futurs de l'aviation subsonique sur le forçage radiatif et le rayonnement UV?

Un résumé des effets radiatifs résultant des émissions de moteurs d'avions est donné dans les Figures 2 et 3. Comme le montre la Figure 2, il y a beaucoup d'incertitude sur plusieurs de ces effets.

4.1 Dioxyde de carbone

Les émissions de dioxyde de carbone par les aéronefs étaient de 0,14 Gt de C par an en 1992. Cela correspond à 2 pour cent des émissions anthropogènes totales de dioxyde de carbone en 1992, ou 13 pour cent environ des émissions de

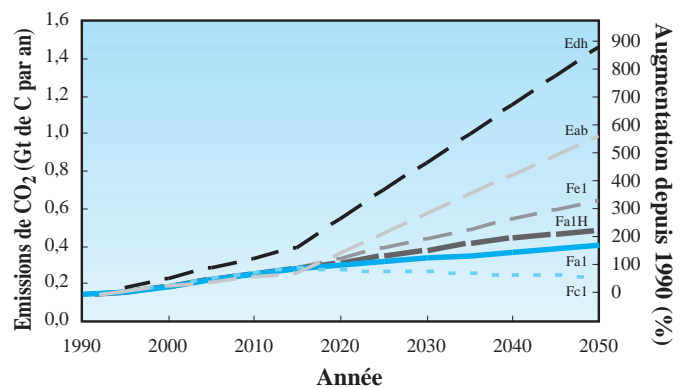


Figure 1: Émissions totales de dioxyde de carbone par l'aviation, dans six scénarios différents de consommations de carburant aviation. Les émissions sont données en Gt de C [ou milliards (10⁹) de tonnes de carbone] par an. Pour convertir les Gt de C en Gt de CO₂, multiplier par 3,67. L'échelle de droite représente l'augmentation en pourcentage de 1990 à 2050. Les émissions de dioxyde de carbone des aéronefs représentent 2,4% des émissions totales de dioxyde de carbone des combustibles fossiles en 1992, ou 2% des émissions anthropogènes totales de dioxyde de carbone. (Note: Il n'y a pas de tracé pour Fa2 parce qu'il serait difficile de distinguer sur la figure entre ce tracé et celui du scénario Fa1.)

⁵ Les particules de sulfate et les particules de suie dans l'atmosphère sont deux exemples d'aérosols. Les aérosols sont des particules microscopiques en suspension dans l'air.

⁶ La répartition des consommations de carburants aviation entre l'aviation civile (passagers plus fret) et l'aviation militaire était de 64% et 36% respectivement en 1976, de 82% et 18% respectivement en 1992. Selon les prévisions, ces valeurs passeraient à 93% et 7% respectivement en 2015, à 97% et 3% respectivement en 2050.

⁷ GIEC, 1992: *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment* [J.T. Houghton, B.A. Callander et S.K. Varney (réd.)]. Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni), 200 p.

dioxyde de carbone venant de toutes les sources de transports. Les projections de l'éventail de scénarios examinés ici indiquent que les émissions de dioxyde de carbone continueront d'augmenter et que d'ici à 2050 elles atteindront de 0,23 à 1,45 Gt de C par an. Dans le cas du scénario de référence (Fa1), ces émissions se multiplient par 3 d'ici à 2050 pour atteindre 0,40 Gt de C par an ou 3 pour cent des émissions anthropogènes totales de dioxyde de carbone projetées par rapport au scénario d'émissions médian du GIEC (IS92a). Dans l'éventail de scénarios, la gamme d'augmentation des émissions de dioxyde de carbone jusqu'à 2050 serait de 1,6 à 10 fois la valeur de 1992.

Les actuelles concentrations et l'actuel forçage radiatif du dioxyde de carbone sont le résultat des émissions des quelque 100 dernières années. La concentration de dioxyde de carbone attribuable à l'aviation dans l'atmosphère de 1992 est de 1 ppmv, un peu plus de 1 pour cent de l'augmentation anthro-

pogène totale. Ce pourcentage est plus faible que dans le cas des émissions (2 pour cent) parce que les émissions n'ont été produites qu'au cours des 50 dernières années. Pour l'éventail de scénarios de la Figure 1, l'accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, attribuable aux aéronefs au cours des 50 prochaines années, serait portée, selon les projections, à une valeur de 5 à 13 ppmv. Dans le scénario de référence (Fa1) cela représente 4 pour cent de l'accumulation due à toutes les activités humaines selon le scénario médian du GIEC (IS92a).

4.2 Ozone

On estime que les émissions de NO_x par les aéronefs subsoniques en 1992 ont augmenté les concentrations d'ozone, aux altitudes de croisière dans les moyennes latitudes de l'hémisphère Nord, d'une valeur allant jusqu'à 6 pour cent par comparaison avec une atmosphère sans émissions d'aéronefs. Les projections indiquent que cette augmentation de l'ozone atteindrait environ 13 pour cent d'ici à 2050 dans le scénario de référence (Fa1). L'effet des concentrations d'ozone dans les autres régions du monde est nettement moindre. Ces augmentations auront tendance, en moyenne, à réchauffer la surface de la Terre.

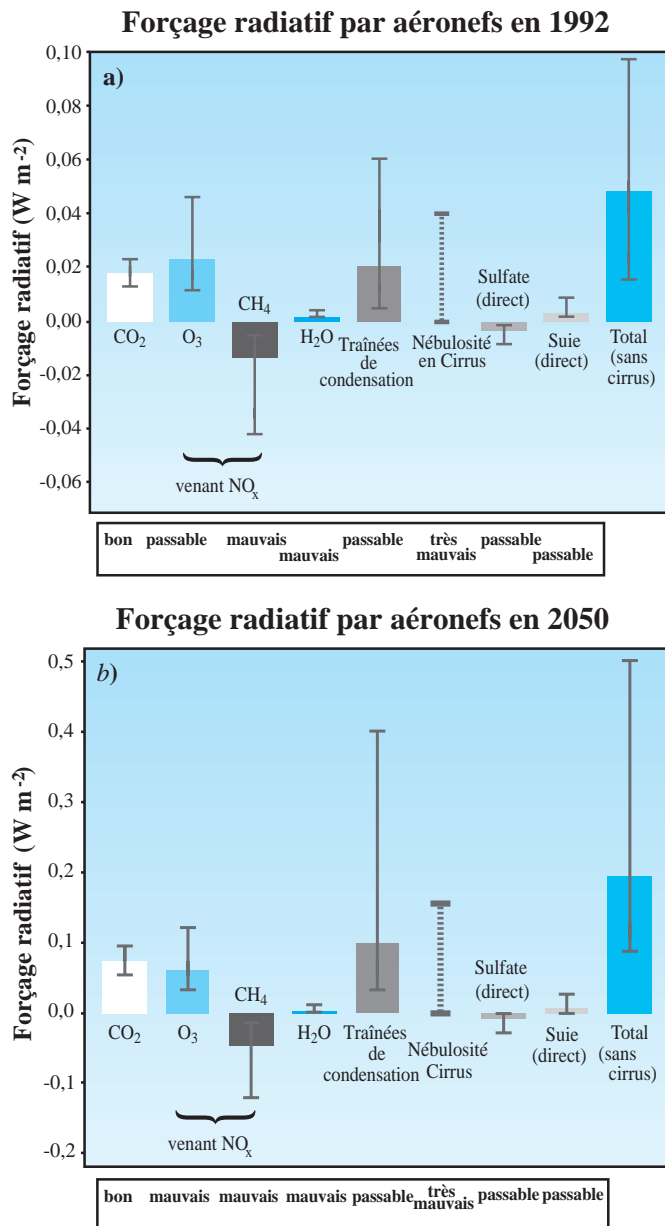


Figure 2: Estimations de la moyenne mondiale annuelle du forçage radiatif ($W m^{-2}$, voir note 4) dû aux émissions d'aéronefs subsoniques en 1992 (2a) et en 2050 pour le scénario Fa1 (2b). L'échelle de la Figure 2b est environ 4 fois plus grande que l'échelle de 2a. Les barres représentent les meilleures estimations du forçage et les lignes qui accompagnent chaque barre représentent une plage d'incertitude de deux tiers sur la base des meilleures connaissances et des meilleurs outils actuellement disponibles. (La plage d'incertitude de deux tiers signifie qu'il y a une probabilité de 67% que la valeur réelle se situe dans cette plage.) Les informations disponibles sur la nébulosité en cirrus sont insuffisantes pour permettre de déterminer une meilleure estimation ou une plage d'incertitude; la ligne de tirets représente une gamme de meilleures estimations possibles. L'estimation du forçage total n'inclut pas l'effet des changements dans la nébulosité en cirrus. L'estimation d'incertitude pour le forçage radiatif total (sans cirrus additionnels) est calculée comme étant la racine carrée des sommes des carrés des plages supérieures et inférieures pour les différents éléments. Les évaluations figurant au-dessous du graphique (bon, passable, mauvais, très mauvais) sont des appréciations relatives liées à chaque élément et indiquent le niveau de compréhension scientifique. Elles sont fondées sur la quantité d'informations disponibles à l'appui des meilleures estimations ainsi que leur incertitude, le degré de consensus dans les publications scientifiques et la portée de l'analyse. Ces évaluations sont distinctes des évaluations de plages d'incertitude représentées par les lignes correspondant à chaque barre. Ce mode de présentation n'est pas le même et il est plus significatif que le degré de confiance représenté dans les graphiques analogues dans *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*.

Les émissions de NO_x par les aéronefs produisent davantage d'ozone dans la haute troposphère qu'une quantité équivalente d'émissions à la surface. Les augmentations de l'ozone dans la haute troposphère augmentent aussi le forçage radiatif davantage que les augmentations aux altitudes plus basses. A cause de ces augmentations, la colonne d'ozone totale calculée dans les moyennes latitudes de l'hémisphère Nord augmenterait, selon les projections, d'environ 0,4 pour cent et 1,2 pour cent en 1992 et 2050 respectivement. Cependant, les émissions de soufre et d'eau par les aéronefs dans la stratosphère tendent à diminuer l'ozone, ce qui compense en partie les augmentations d'ozone dues aux NO_x . L'ampleur de ce phénomène n'est pas encore quantifiée. Il faudrait par conséquent mieux évaluer l'impact des émissions d'aéronefs subsoniques sur l'ozone stratosphérique. Les plus grandes augmentations de la concentration d'ozone dues aux émissions d'aéronefs se situeraient, selon les calculs, à proximité de la tropopause où la variabilité naturelle est élevée. A l'heure actuelle, les changements ne ressortent pas clairement des observations.

4.3 Méthane

En plus d'augmenter les concentrations d'ozone dans la troposphère, il y a lieu de s'attendre à ce que les émissions de NO_x par les aéronefs diminuent la concentration du méthane, qui est lui aussi un gaz à effet de serre. Ces réductions du méthane tendent à refroidir la surface de la Terre. On estime ici que la concentration de méthane en 1992 est inférieure de 2 pour cent environ à ce qu'elle aurait été dans une atmosphère sans aéronefs. Cette réduction de la concentration de méthane due aux aéronefs est nettement plus faible que l'augmentation totale observée de 2,5 fois depuis l'époque préindustrielle. Les incertitudes au sujet des sources et des réceptacles du méthane empêchent de tester l'impact de l'aviation sur les concentrations de méthane par des observations atmosphériques. Dans le scénario de référence (Fa1), la quantité de méthane serait inférieure d'environ 5 pour cent à celle qui est calculée pour une atmosphère en 2050 sans aéronefs.

Les changements de l'ozone troposphérique se situent surtout dans l'hémisphère Nord, alors que ceux du méthane se manifestent à l'échelle du monde; ainsi, bien que les forçages radiatifs moyens dans le monde soient du même ordre de grandeur et de sens opposé, la structure du forçage en latitudes est différente, de sorte que les effets radiatifs régionaux nets ne s'annulent pas mutuellement.

4.4 Vapeur d'eau

Les émissions de vapeur d'eau par les aéronefs subsoniques se produisent principalement dans la troposphère où elles sont rapidement éliminées sous la forme de précipitation, en une à deux semaines. Une fraction plus faible des émissions de vapeur d'eau se situe dans la basse stratosphère, où elle peut s'accumuler pour former de plus grandes concentrations. Comme la vapeur d'eau est un gaz à effet de serre, ces augmentations ten-

dent à réchauffer la surface de la Terre, mais dans le cas des aéronefs subsoniques cet effet est plus faible que ceux des autres émissions d'aéronefs telles que le dioxyde de carbone et les NO_x .

4.5 Traînée de condensation

On estime qu'en 1992 les traînées de condensation linéaires produites par des aéronefs couvraient environ 0,1 pour cent de la surface de la Terre sur une base de moyenne annuelle, avec des valeurs régionales plus élevées. Les traînées de condensation tendent à réchauffer la surface de la Terre, de la même façon que de minces couches de nuages en altitude. Selon les projections, l'étendue des traînées de condensation passerait à 0,5 pour cent d'ici à 2050 dans le scénario de référence (Fa1), avec un taux de croissance plus élevé que celui de la consommation de carburants aviation. Cette croissance plus rapide de l'étendue des traînées de condensation est à prévoir parce que le trafic aérien augmentera principalement dans la haute troposphère, où les traînées de condensation se forment de préférence, et pourrait aussi être le résultat d'améliorations dans le rendement énergétique des carburants aviation. Les traînées de condensation sont déclenchées par la vapeur d'eau qu'émettent les aéronefs et leurs propriétés optiques dépendent des particules émises ou formées dans le sillage des aéronefs et des conditions ambiantes. L'effet radiatif des traînées de condensation dépend de leurs propriétés optiques et de l'étendue qu'elles atteignent dans le monde; ces deux éléments sont incertains. Des traînées de condensation ont été observées sous la forme de nuages linéaires par des satellites sur des zones de trafic aérien intense; elles couvraient en moyenne environ 0,5 pour cent de l'Europe centrale en 1996 et 1997.

4.6 Cirrus

On peut observer de grands développements de cirrus après la formation de traînées de condensation persistantes. Des augmentations de la nébulosité en cirrus (au-delà de celles qui sont identifiées comme des traînées de condensation linéaires) ont été mises en corrélation avec les émissions d'aéronefs dans un petit nombre d'études. Les cirrus recouvrent environ 30 pour cent de la surface de la Terre. En moyenne, une augmentation de la nébulosité en cirrus tend à réchauffer la surface de la Terre. Les estimations de la nébulosité en cirrus due aux aéronefs pour la fin de la décennie des années 90 vont de 0 pour cent à 0,2 pour cent de la surface de la Terre. Dans le scénario Fa1, ce pourcentage pourrait être multiplié par 4 (0 à 0,8 pour cent) d'ici à 2050; toutefois, les mécanismes liés aux augmentations de la nébulosité en cirrus ne sont pas bien compris et devront être davantage étudiés.

4.7 Aérosols de sulfate et de suie

Les concentrations massiques d'aérosols dues aux aéronefs sont faibles, en 1992, par rapport à celles qui sont dues à des sources de surface. L'accumulation d'aérosols augmentera en

fonction de la consommation de carburants aviation, mais les concentrations massiques d'aérosols dues aux avions resteraient faibles en 2050, selon les projections, par comparaison avec les sources de surface. Les augmentations de suie tendent à réchauffer alors que les augmentations de sulfate tendent à refroidir la surface de la Terre. Le forçage radiatif direct des aérosols de sulfate et de suie dus aux avions est faible comparativement à celui des autres émissions d'avions. Comme les aérosols agissent sur la formation de nuages, l'accumulation d'aérosols due aux avions pourrait jouer un rôle dans l'augmentation de la nébulosité et changer les propriétés radiatives des nuages.

4.8 Quels sont les effets globaux des avions subsoniques sur le climat?

Les effets climatiques de différentes émissions anthropogènes peuvent se comparer par application de la notion de forçage radiatif. La meilleure estimation du forçage radiatif par les avions en 1992 est de $0,05 \text{ W m}^{-2}$, ou environ 3,5% du forçage radiatif total par toutes les activités anthropogènes. Dans le cas du scénario de référence (Fa1), le forçage radiatif par les avions en 2050 est de $0,19 \text{ W m}^{-2}$, ou 5 pour cent du forçage radiatif du scénario médian IS92a (3,8 fois la valeur de 1992). Dans l'éventail des scénarios examinés ici, il est prévu que le forçage serait porté à une valeur de $0,13$ à $0,56 \text{ W m}^{-2}$ en 2050, soit de 1,5 fois moins à 3 fois plus que dans Fa1 et de 2,6 à 11 fois la valeur de 1992. Ces estimations de forçage combinent les effets des changements de concentrations de dioxyde de carbone, d'ozone, de méthane, de vapeur d'eau, de traînées de condensation linéaires et d'aérosols, mais n'incluent pas les changements possibles de la nébulosité en cirrus.

Les valeurs moyennes mondiales du forçage radiatif dû à différents composants en 1992 et en 2050 dans le scénario de référence (Fa1) sont indiquées dans la Figure 2. Cette figure donne les meilleures estimations du forçage pour chaque composant et la plage d'incertitude de probabilité de deux tiers.⁸ La détermination des plages d'incertitude fait intervenir un jugement scientifique expert et peut aussi comporter des modèles statistiques objectifs. La plage d'incertitude du forçage radiatif qui est indiquée ici combine l'incertitude dans le calcul des changements atmosphériques dans les gaz à effet de serre et les aérosols avec l'incertitude dans le calcul du forçage radiatif. Pour la nébulosité additionnelle en cirrus, seule est donnée une plage pour la meilleure estimation; elle n'est pas incluse dans le forçage radiatif total.

L'état des connaissances scientifiques est évalué pour chaque composant. Cela n'est pas la même chose que le degré de confiance exprimé dans des documents antérieurs du GIEC. Cette évaluation est distincte de la plage d'incertitude et elle comporte une appréciation relative des connaissances scientifiques

⁸ La plage d'incertitude de deux tiers signifie qu'il y a une probabilité de 67% que la valeur réelle se situe dans cette plage.

pour chaque composant. L'évaluation est basée sur la quantité d'informations disponibles à l'appui de la meilleure estimation ainsi que sur son incertitude, le degré de consensus dans les publications scientifiques et la portée de l'analyse. Le forçage radiatif total dans chacun des six scénarios de croissance de l'aviation est indiqué dans la Figure 3 pour la période de 1990 à 2050.

Le forçage radiatif total dû à l'aviation (sans forçage de la nébulosité additionnelle en cirrus) se situe probablement dans la plage de $0,01$ à $0,1 \text{ W m}^{-2}$ en 1992, les plus grandes incertitudes venant des traînées de condensation et du méthane. Ainsi, le forçage radiatif total pourrait être environ deux fois plus fort ou cinq fois plus faible que la meilleure estimation. Pour tout scénario en 2050, la plage d'incertitude du forçage radiatif est légèrement plus grande que pour 1992, mais les plus grandes variations du forçage radiatif projeté viennent de l'éventail des scénarios.

Sur la période de 1992 à 2050, le forçage radiatif total par les avions (à l'exclusion du forçage dû aux changements dans la nébulosité en cirrus) pour tous les scénarios du présent rapport est de deux à quatre fois plus fort que le forçage par le seul dioxyde de carbone émis par les avions. Le forçage radiatif total pour la somme de toutes les activités humaines est évalué comme étant au maximum 1,5 fois celui du seul dioxyde de carbone.

Les émissions de NO_x causent des changements dans le méthane et l'ozone, avec une influence sur le forçage radiatif que l'on estime être du même ordre de grandeur, mais de sens opposé. Cependant, comme on l'a vu plus haut, la répartition géographique du forçage d'ozone dû aux avions est beaucoup plus régionale que celle du forçage de méthane dû aux avions.

Les effets des avions sur le climat se superposent à ceux des autres émissions anthropogènes de gaz à effet de serre et de particules ainsi qu'à la variabilité naturelle. Le forçage radiatif par

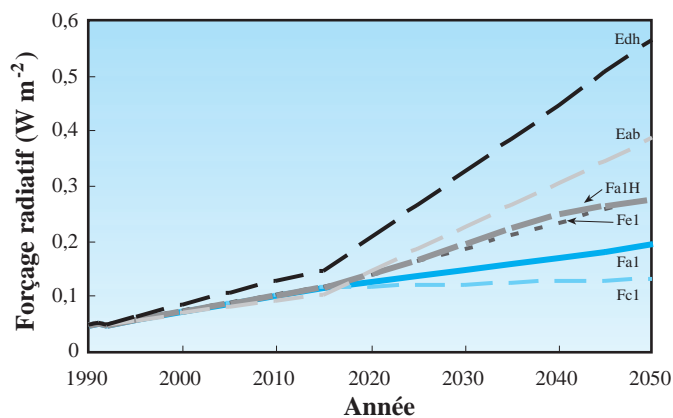


Figure 3: Estimations de la moyenne mondiale annuelle du forçage radiatif total (sans cirrus) dû aux émissions de l'aviation dans chacun des six scénarios de croissance de l'aviation de 1990 à 2050. (Il n'y a pas de tracé pour Fa2 parce qu'il serait difficile de distinguer sur la figure entre ce tracé et celui du scénario Fa1.)

l'aviation correspond à 3,5 pour cent environ du forçage radiatif total en 1992. Il n'a pas été possible de faire la distinction entre l'influence de l'aviation sur les changements climatiques dans le monde (ni d'aucun autre secteur ayant un forçage radiatif similaire) et celle de toutes les autres activités anthropogènes. Les aéronefs contribuent aux changements dans le monde approximativement en proportion de leur contribution au forçage radiatif.

4.9 Quels sont les effets globaux des aéronefs supersoniques sur le rayonnement UV-B?

L'ozone, dont la plus grande partie réside dans la stratosphère, forme un écran contre le rayonnement solaire ultraviolet. La dose érythémique, définie comme l'irradiation UV pondérée selon le degré auquel elle produit effectivement une brûlure solaire, aurait selon les estimations été abaissée par les aéronefs en 1992 d'environ 0,5 pour cent à 45° N en juillet. Aux fins de comparaison, l'augmentation calculée de la dose érythémique due à l'appauvrissement en ozone observé est d'environ 4 pour cent sur la période de 1970 à 1992 à 45° N en juillet.⁹ L'effet net des aéronefs subsoniques paraît être une augmentation de la colonne d'ozone et une diminution du rayonnement UV, qui est due surtout aux émissions de NO_x par les aéronefs. Des changements beaucoup plus faibles du rayonnement UV sont liés aux traînées de condensation, aux aérosols et à la nébulosité induite. Dans l'hémisphère Sud, les effets calculés des émissions d'aéronefs sur la dose érythémique sont environ 4 fois plus faibles que dans l'hémisphère Nord.

Dans le cas du scénario de référence (Fa1), le changement de la dose érythémique à 45° N en juillet en 2050, par comparaison avec une simulation sans aéronefs, est de 1,3 pour cent (avec une plage d'incertitude de deux tiers, de 0,7 pour cent à 2,6 pour cent). Par comparaison, le changement calculé de la dose érythémique dû aux changements dans les concentrations d'éléments traces, autres que ceux qui sont dus aux aéronefs, est d'environ 3 pour cent à 45° N entre 1970 et 2050, une diminution qui est le résultat net de deux effets opposés: 1) le rétablissement incomplet de l'ozone stratosphérique aux niveaux de 1970 à cause de la persistance de composés très durables contenant des halogènes; 2) des augmentations des émissions de surface projetées de polluants moins durables qui produisent de l'ozone dans la troposphère.

5. Quels sont les effets actuels et futurs de l'aviation supersonique sur le forçage radiatif et le rayonnement UV?

Une possibilité pour l'avenir est la mise en service d'une flotte d'avions supersoniques de deuxième génération, dits avions de

transport civil à grande vitesse (HSCT), bien qu'il règne encore beaucoup d'incertitude au sujet de la mise en ligne d'une flotte aérienne de ce genre. Ces avions supersoniques voleraient en croisière à une altitude d'environ 19 km, quelque 8 km plus haut que les avions subsoniques, et émettraient du dioxyde de carbone, de la vapeur d'eau, des NO_x, des SO_x et de la suie dans la stratosphère. Les NO_x, la vapeur d'eau et les SO_x des émissions d'avions supersoniques contribuent tous à des changements dans l'ozone stratosphérique. Le forçage radiatif des avions supersoniques civils est, selon les estimations, environ cinq fois plus fort que celui des avions subsoniques qu'ils remplaceraient dans le scénario Fa1H. Le forçage radiatif calculé des avions supersoniques dépend de la façon dont la vapeur d'eau et l'ozone sont traités dans les modèles. Cet effet est difficile à simuler dans les modèles d'aujourd'hui, aussi est-il très incertain.

Le scénario Fa1H prend en compte d'addition d'une flotte d'avions supersoniques civils qui serait mise en service en 2015 et atteindrait un maximum de 1000 avions en 2040. Comparativement, à la fin de 1997 la flotte subsonique civile comprenait environ 12 000 avions. Dans ce scénario, les avions sont conçus pour voler en croisière à Mach 2,4 et on a admis des technologies nouvelles qui maintiendraient les émissions à 5 g de NO₂ par kg de carburant (moins que les avions supersoniques civils d'aujourd'hui, qui émettent environ 22 g de NO₂ par kg de carburant). On a admis que ces avions supersoniques se substitueraient à une partie de la flotte aérienne subsonique (11 pour cent, en termes d'émissions dans le scénario Fa1). Les avions supersoniques consomment plus de deux fois plus de carburant par passager-km que les avions subsoniques. D'ici à 2050, la flotte combinée (scénario Fa1H) ajouterait 0,08 W m⁻² (42 pour cent) au forçage radiatif de 0,19 W m⁻² du scénario Fa1 (voir Figure 4). La plus grande partie de ce forçage additionnel est due à l'accumulation de vapeur d'eau dans la stratosphère.

L'introduction d'avions supersoniques civils dans une flotte combinée (Fa1H) a aussi pour effet de diminuer l'ozone stratosphérique et d'augmenter la dose érythémique. L'effet maximal calculé se situe à 45° N où, en juillet, le changement de la colonne d'ozone en 2050 dû à une flotte subsonique et supersonique combinée, par comparaison avec l'absence d'aéronefs, est de -0,4 pour cent. L'effet de la composante supersonique sur la colonne d'ozone est de -1,3 pour cent et celui de la composante subsonique est de +0,9 pour cent.

La flotte combinée changerait de +0,3 pour cent la dose érythémique à 45° N en juillet, par rapport à une atmosphère sans aéronefs en 2050. La plage d'incertitude de deux tiers pour la flotte combinée va de -1,7 pour cent à +3,3 pour cent. Cela peut se comparer au changement projeté de -1,3 pour cent dans Fa1. Des altitudes de vol plus élevées conduisent à de plus grandes diminutions de la colonne d'ozone, alors que des altitudes de vol plus basses conduisent à des diminutions plus faibles de la colonne d'ozone et peuvent même aboutir à une augmentation de la colonne d'ozone dans le cas des vols dans

⁹ Cette valeur est basée sur des observations de satellites et des calculs sur modèles. Voir OMM, 1999: *Evaluation scientifique de l'appauvrissement en ozone* : 1998. Rapport N° 44, Projet de recherche et de monitoring de l'ozone dans le monde, Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse, 732 p.

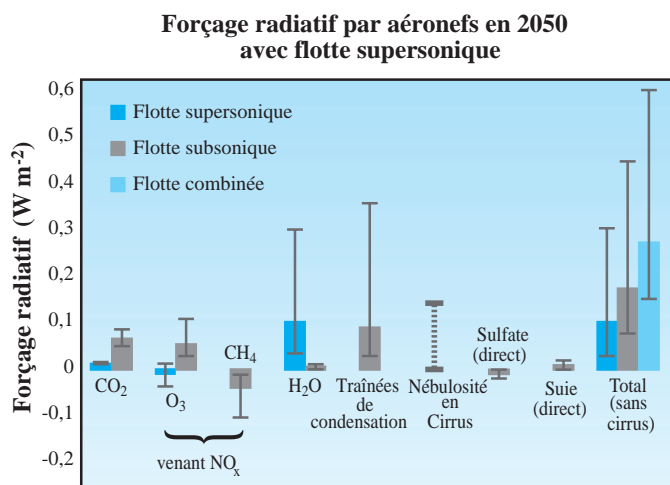


Figure 4: Estimations de la moyenne mondiale annuelle du forçage radiatif dû à une flotte combinée d'avions subsoniques et d'avions supersoniques (en $W m^{-2}$) par suite de changements dans les gaz à effet de serre, les aérosols et les traînées de condensation en 2050, dans le scénario Fa1H. Dans ce scénario, les avions supersoniques sont censés remplacer une partie de la flotte subsonique (11% en termes d'émissions dans le scénario Fa1). Les barres représentent les meilleures estimations du forçage et les lignes qui accompagnent chaque barre représentent une plage d'incertitude de deux tiers sur la base des meilleures connaissances et des meilleurs outils actuellement disponibles. (La plage d'incertitude de deux tiers veut dire qu'il y a une probabilité de 67% que la valeur réelle se situe dans cette plage.) Les informations disponibles sur la nébulosité en cirrus sont insuffisantes pour permettre de déterminer une meilleure estimation ou une plage d'incertitude; la ligne de tirets représente une gamme de meilleures estimations possibles. L'estimation du forçage total n'inclut pas l'effet des changements dans la nébulosité en cirrus. L'estimation d'incertitude pour le forçage radiatif total (sans cirrus additionnels) est calculée comme étant la racine carrée des sommes des carrés des plages supérieures et inférieures. Le niveau de compréhension scientifique des éléments supersoniques est : dioxyde de carbone, bon; ozone, mauvais; vapeur d'eau, mauvais.

la plus basse stratosphère. De plus, les émissions d'avions supersoniques dans la stratosphère de l'hémisphère Nord peuvent être transportées dans l'hémisphère Sud où elles causent une diminution de l'ozone.

6. Quelles sont les options pour réduire les émissions et leurs effets?

Il y a un éventail d'options pour réduire les effets des émissions de l'aviation, notamment des changements dans la technologie des avions et des moteurs, les carburants, les pratiques opérationnelles et les mesures réglementaires et économiques. Elles pourraient être mises en œuvre individuellement ou en

combinaison par le secteur public et/ou privé. Des progrès notables dans la technologie des avions et des moteurs et les améliorations de la gestion du trafic aérien qui sont décrites dans le présent rapport sont déjà incorporés dans les scénarios d'émissions d'avions utilisés pour les calculs de changements climatiques. Les scénarios ne prennent pas en compte d'autres mesures opérationnelles qui permettraient éventuellement de réduire les émissions, ni les carburants alternatifs. D'autres progrès technologiques pourraient amener d'autres réductions des consommations des carburants et des émissions. Dans la pratique, il y a lieu de s'attendre à ce que certaines des améliorations soient réalisées pour des motifs commerciaux. Le calendrier et la portée des options réglementaires, économiques et autres pourraient influencer sur l'introduction d'améliorations et sur la demande de transport aérien. Les options d'atténuation de la vapeur d'eau et de la nébulosité n'ont pas été entièrement traitées.

La sécurité de l'exploitation, la performance opérationnelle et environnementale et les coûts sont les considérations dominantes lorsque l'industrie de l'aviation évalue de nouveaux achats de matériel volant ou d'éventuels changements techniques ou opérationnels. Les avions ont typiquement une durée de vie utile de 25 à 35 ans. Il faut prendre en compte ces facteurs lorsqu'on évalue la cadence à laquelle des progrès technologiques et des options de politique liées à la technologie pourraient réduire les émissions de l'aviation.

6.1 Options de technologie des avions et des moteurs

Des progrès technologiques ont nettement réduit la plupart des émissions par passager-km, mais il reste encore de la place pour d'autres améliorations. Tout changement technologique peut comporter un équilibre entre différents effets environnementaux.

Les avions subsoniques en production aujourd'hui ont un rendement énergétique par passager-km qui est environ 70 pour cent meilleur qu'il y a 40 ans. Cette progression a été réalisée dans sa majeure partie par des améliorations des moteurs, le reste par des améliorations dans la conception des cellules. Une amélioration de 20 pour cent dans le rendement énergétique est projetée pour 2015, et une amélioration de 40 à 50 pour cent pour 2050, par rapport aux avions en production aujourd'hui. Les scénarios de 2050 développés dans le présent rapport prennent déjà en compte ces gains de rendement énergétique dans les estimations de consommations de carburant et d'émissions. Les améliorations du rendement des moteurs réduisent la consommation spécifique et la plupart des types d'émissions; cependant, les traînées de condensation pourraient augmenter et, s'il n'y a pas de progrès dans la technologie des chambres de combustion, les émissions de NO_x pourraient aussi augmenter.

La conception des futurs moteurs et des futures cellules fait intervenir un processus décisionnel complexe et un équilibre de considérations entre de nombreux facteurs (par exemple:

émissions de dioxyde de carbone, émissions de NO_x au niveau du sol, émissions de NO_x en altitude, émissions de vapeur d'eau, production de traînées de condensation et de cirrus, bruit). Ces aspects n'ont pas été suffisamment caractérisés ou quantifiés dans le présent rapport.

D'importants programmes de recherche sur les moteurs qui sont en cours à l'échelle internationale ont pour objectifs de réduire les émissions de NO_x des cycles d'atterrissage et décollage d'une valeur allant jusqu'à 70 pour cent par rapport aux normes réglementaires d'aujourd'hui, tout en améliorant de 8 à 10 pour cent la consommation de carburant des moteurs, par rapport aux moteurs les plus récemment en production, d'ici à 2010 environ. La réduction des émissions de NO_x serait aussi réalisée aux altitudes de croisière, mais pas nécessairement dans la même proportion que dans le cas des atterrissages et décollages. À supposer que les objectifs puissent être atteints, le transfert de cette technologie à des nombres appréciables d'aéronefs nouvellement produits demandera plus de temps, typiquement une décennie. Sont aussi en cours des programmes de recherche sur les émissions de NO_x des avions supersoniques.

6.2 Options de carburants

Il ne paraît pas y avoir de moyens pratiques de remplacer les carburants à base de kérosène pour les avions commerciaux à réaction dans les prochaines décennies. Une réduction de la teneur en soufre du kérosène réduirait les émissions de SO_x et la formation de particules de sulfate.

Les avions à réaction ont besoin d'un carburant à haute densité énergétique, particulièrement pour les vols long-courriers. D'autres options de carburant, par exemple l'hydrogène, pourraient être viables sur le long terme mais nécessiteraient de nouvelles conceptions d'aéronefs et une nouvelle infrastructure d'avitaillement. Un carburant à hydrogène éliminerait les émissions de dioxyde de carbone des aéronefs mais augmenterait les émissions de vapeur d'eau. Les effets environnementaux globaux et la viabilité environnementale durable de la production et de l'utilisation d'hydrogène ou de tous autres carburants de remplacement n'ont pas été déterminés.

La formation de particules de sulfate venant des émissions d'aéronefs, qui dépend des caractéristiques des moteurs et des panaches, diminue à mesure que diminue la teneur en soufre du carburant. Il existe une technologie qui permet d'enlever pratiquement tout le soufre du carburant, mais cela aboutit à une réduction du pouvoir lubrifiant.

6.3 Options opérationnelles

Des améliorations dans la gestion du trafic aérien (ATM) et d'autres procédures opérationnelles pourraient réduire la consommation de carburant aviation de 8 à 18 pour cent. La plus

grande partie (6 à 12 pour cent) des réductions viendrait d'améliorations dans l'ATM dont la mise en œuvre complète est attendue dans les 20 prochaines années. Toutes les émissions de moteurs seront réduites par voie de conséquence. Dans tous les scénarios d'émissions de l'aviation examinés dans le présent rapport, les réductions venant de l'ATM ont déjà été prises en compte. La cadence d'introduction d'améliorations dans l'ATM dépendra de la mise en œuvre d'arrangements institutionnels essentiels à un niveau international.

Les systèmes de gestion du trafic aérien sont utilisés pour guider, séparer, coordonner et contrôler les mouvements aériens. Les actuels systèmes nationaux et internationaux de gestion du trafic aérien ont des limitations qui résultent, par exemple, de l'attente (aéronefs volant sur un circuit fixe en attendant l'autorisation d'atterrir), d'itinéraires inefficaces et de profils de vol non optimaux. Ces limitations aboutissent à des consommations additionnelles de carburant et par conséquent à des émissions additionnelles.

Pour l'actuelle flotte aérienne et l'activité aérienne d'aujourd'hui, une action sur les limitations mentionnées ci-dessus des systèmes de gestion du trafic aérien pourrait réduire le carburant consommé par voyage de quelque 6 à 12 pour cent. Il est à prévoir que les améliorations nécessaires pour réaliser ces réductions des consommations seront entièrement mises en œuvre d'ici 20 ans, à condition que les arrangements institutionnels et réglementaires nécessaires soient mis en place à temps. Les scénarios développés dans le présent rapport pré-supposent, dans les estimations des consommations de carburant, la mise en œuvre opportune de ces améliorations de l'ATM.

D'autres mesures opérationnelles qui pourraient réduire la quantité de carburant consommée par passager-km comprennent l'augmentation des coefficients de remplissage (transporter davantage de passagers ou de fret sur un aéronef donné), l'élimination des masses non indispensables, l'optimisation des vitesses des aéronefs, la limitation de l'emploi d'énergie auxiliaire (par exemple chauffage, ventilation) et la réduction du roulement au sol. Les améliorations potentielles de ces mesures opérationnelles pourraient aboutir à une réduction du carburant consommé par voyage, et par conséquent des émissions, de quelque 2 à 6 pour cent.

Il serait peut-être possible d'améliorer l'efficacité opérationnelle en attirant du trafic aérien additionnel, mais aucune étude visant à montrer l'existence de cet effet n'a été identifiée.

6.4 Options réglementaires, économiques et autres

Des améliorations dans la technologie des aéronefs et des moteurs et dans l'efficacité du système de gestion du trafic aérien apporteront des avantages environnementaux, mais ceux-ci ne compenseront pas entièrement les effets de l'augmentation des émissions résultant de la croissance projetée de l'aviation. Les options de politique pour

réduire davantage les émissions comprennent des règlements plus rigoureux sur les émissions des moteurs d'aéronefs, l'élimination des subventions et incitatifs qui ont des conséquences négatives sur l'environnement, des options basées sur le marché telles que des paiements environnementaux (redevances et taxes) et des échanges de permis d'émissions, des accords volontaires, des programmes de recherche et le remplacement de services aériens par des liaisons ferroviaires et routières. La plupart de ces options augmenteraient les coûts et les tarifs des transporteurs aériens. Certaines de ces approches n'ont pas été entièrement investiguées ou testées dans l'aviation et leurs aboutissements sont incertains.

La certification des émissions de moteurs est un moyen de réduire des émissions spécifiques. Les autorités de l'aviation ont déjà recours à cette approche pour réglementer les émissions de monoxyde de carbone, d'hydrocarbures, de NO_x et de fumée. L'Organisation de l'aviation civile internationale a commencé des travaux afin d'évaluer la nécessité de normes sur les émissions d'aéronefs aux altitudes de croisière pour compléter les actuelles normes applicables aux atterrissages et aux décollages pour les NO_x et d'autres émissions.

Les options basées sur le marché, telles que les paiements environnementaux (redevances et taxes) et les échanges de permis d'émissions, pourraient servir à stimuler l'innovation technique et améliorer l'efficacité et pourraient mener à une réduction de la demande de voyages aériens. La plupart de ces approches n'ont pas été entièrement investiguées ou testées dans l'aviation et leurs aboutissements sont incertains.

Les paiements environnementaux (redevances et taxes) pourraient être un moyen de freiner l'augmentation des émissions d'aéronefs en stimulant le développement et l'utilisation d'aéronefs plus efficaces et en réduisant la demande de transport aérien. Des études montrent que pour être efficaces sur le plan de l'environnement, les paiements devraient être étudiés dans un cadre international.

Une autre approche qui pourrait être envisagée pour atténuer les émissions de l'aviation est l'échange de permis d'émissions, une approche basée sur le marché qui permet aux participants de coopérer pour minimiser les coûts de réduction des émissions. Cette approche n'a pas été testée dans l'aviation, bien qu'elle était appliquée au dioxyde de soufre (SO₂) aux États-Unis d'Amérique et qu'elle soit applicable, en vertu du Protocole de Montréal, aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone. Cette approche est une des dispositions du Protocole de Kyoto, où elle s'applique aux Parties de l'Annexe B.

On explore aussi actuellement des accords volontaires comme moyen de réaliser des réductions dans les émissions provenant du secteur de l'aviation. On a eu recours à ce genre d'accord dans d'autres secteurs pour réduire les émissions de gaz à effet de serre ou pour améliorer des réceptacles.

Au nombre des mesures qui pourraient aussi être envisagées, il y a l'élimination des subventions ou incitatifs ayant des conséquences négatives sur l'environnement, et des programmes de recherche.

Le remplacement par des trains et des autocars pourrait aboutir à une réduction des émissions de dioxyde de carbone par passager-km. Le champ d'application de cette réduction se limite aux routes à forte densité et sur courtes distances, qui pourraient être desservies par des liaisons routières ou ferroviaires. Des estimations montrent qu'en Europe jusqu'à 10 pour cent des voyageurs pourraient être transférés des services aériens à des trains rapides. Pour explorer le potentiel des substitutions, il faudrait analyser davantage, y compris les interactions à l'intérieur d'un large éventail d'effets environnementaux (par exemple nuisances acoustiques, qualité locale de l'air et effets atmosphériques mondiaux).

7. Questions pour l'avenir

Le présent rapport a évalué les changements potentiels dans le climat et l'ozone, dus aux aéronefs, jusqu'à l'an 2050 dans différents scénarios. Il a constaté que les effets de certains types d'émissions d'aéronefs sont bien compris. Il a aussi montré que les effets de certains autres ne le sont pas, à cause des nombreuses incertitudes scientifiques. Il y a eu une amélioration soutenue dans la caractérisation des effets potentiels des activités humaines, y compris les effets de l'aviation sur l'atmosphère planétaire. Le rapport a examiné aussi le progrès technologique, les améliorations de l'infrastructure et des mesures réglementaires ou basées sur le marché pour réduire les émissions de l'aviation. Il est nécessaire de poursuivre les travaux afin de pouvoir réduire les incertitudes scientifiques et autres, mieux comprendre les options de réduction des émissions et mieux informer les responsables de la politique, ainsi qu'améliorer la compréhension des aspects sociaux et économiques liés à la demande de transport aérien.

Il y a plusieurs secteurs cruciaux d'incertitude scientifique qui limitent notre capacité à faire des projections des effets de l'aviation sur le climat et l'ozone :

- l'influence des traînées de condensation et des aérosols sur la nébulosité en cirrus
- le rôle des NO_x dans les changements de concentrations d'ozone et de méthane
- la capacité des aérosols à modifier des processus chimiques
- le transport des gaz et particules atmosphériques dans la haute troposphère/basse stratosphère
- la réaction du climat aux forçages régionaux et aux perturbations stratosphériques.

Il y a plusieurs aspects cruciaux, socio-économiques et technologiques, qu'il faudrait mieux définir, notamment les suivants :

- caractérisation de la demande de services d'aviation commerciale, y compris contraintes d'infrastructure d'aéroports et de voies aériennes et évolution technologique connexe
- méthodes d'évaluation des coûts externes et des avantages environnementaux d'options réglementaires et d'options basées sur le marché
- évaluation des effets macroéconomiques, dans l'industrie de l'aviation, de réductions d'émissions qui pourraient être le résultat de mesures d'atténuation
- moyens technologiques et pratiques opérationnelles pour réduire les émissions qui mènent à la formation de traînées de condensation et à une augmentation de la nébulosité
- compréhension des effets économiques et environnementaux de la réalisation de scénarios potentiels de stabilisation (pour les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre), y compris mesures pour réduire les émissions de l'aviation et aussi aspects tels que les effets relatifs de différents modes de transport sur l'environnement.

LISTE DES PUBLICATIONS DU GIEC

I. PREMIER RAPPORT D'ÉVALUATION DU GIEC, 1990

- a) **Aspects scientifiques du changement climatique.** Rapport 1990 rédigé pour le GIEC par le Groupe de travail I (*en anglais, chinois, espagnol, français et russe*).
- b) **Incidences potentielles du changement climatique.** Rapport 1990 rédigé pour le GIEC par le Groupe de travail II (*en anglais, chinois, espagnol, français et russe*).
- c) **Stratégies d'adaptation au changement climatique.** Rapport 1990 rédigé pour le GIEC par le Groupe de travail III (*en anglais, chinois, espagnol, français et russe*).
- d) **Overview and Policymaker Summaries, 1990.**

Emissions Scenarios (préparé par le Groupe de travail III du GIEC), 1990.

Assessment of the Vulnerability of Coastal Areas to Sea Level Rise — A Common Methodology, 1991.

II. SUPPLÉMENT DU GIEC, 1992

- a) **CLIMATE CHANGE 1992 — The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment.** The 1992 report of the IPCC Scientific Assessment Working Group.
- b) **CLIMATE CHANGE 1992 — The Supplementary Report to the IPCC Impacts Assessment.** The 1992 report of the IPCC Impacts Assessment Working Group.

Changement climatique : Les évaluations du GIEC de 1990 et 1992 — Premier rapport d'évaluation du GIEC, Aperçu général et Résumés destinés aux décideurs, et Supplément 1992 du GIEC (*en anglais, chinois, espagnol, français et russe*).

Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea. Coastal Zone Management Subgroup of the IPCC Response Strategies Working Group, 1992.

Report of the IPCC Country Study Workshop, 1992.

Preliminary Guidelines for Assessing Impacts of Climate Change, 1992.

III. RAPPORT SPÉCIAL DU GIEC, 1994

CLIMATE CHANGE 1994 — Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios.

IV. DEUXIÈME RAPPORT D'ÉVALUATION DU GIEC, 1995

- a) **CLIMATE CHANGE 1995 — The Science of Climate Change.** (Avec résumé destiné aux décideurs). Report of IPCC Working Group I, 1995.
- b) **CLIMATE CHANGE 1995 — Scientific-Technical Analyses of Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change.** (Avec résumé destiné aux décideurs). Report of IPCC Working Group II, 1995.
- c) **CLIMATE CHANGE 1995 — The Economic and Social Dimensions of Climate Change.** (Avec résumé destiné aux décideurs). Report of IPCC Working Group III, 1995.

- d) **Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 1995.**

(A noter que le Document de synthèse des informations scientifiques et techniques relatives à l'interprétation de l'article 2 de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et les trois résumés destinés aux décideurs sont disponibles en anglais, arabe, chinois, espagnol, français et russe).

V. MÉTHODOLOGIES DU GIEC

- a) **Lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (3 volumes), 1994** (*en anglais, espagnol, français et russe*).
- b) **Directives techniques du GIEC pour l'évaluation des incidences de l'évolution du climat et des stratégies d'adaptation, 1995** (*en anglais, arabe, chinois, espagnol, français et russe*).
- c) **Révision 1996 des lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre (3 volumes), 1996.**

VI. DOCUMENTS TECHNIQUES DU GIEC

Techniques, politiques et mesures d'atténuation des changements climatiques — Document technique 1 du GIEC, 1996 (*également en anglais et espagnol*)

Introduction aux modèles climatiques simples employés dans le Deuxième rapport d'évaluation du GIEC — Document technique 2 du GIEC, 1997 (*également en anglais et espagnol*)

Stabilisation de gaz atmosphériques à effet de serre : conséquences physiques, biologiques et socio-économiques — Document technique 3 du GIEC, 1997 (*également en anglais et espagnol*)

Incidences des propositions de limitation des émissions de CO₂ — Document technique 4 du GIEC, 1997 (*également en anglais et espagnol*)

VII. RAPPORT SPÉCIAL DU GIEC, 1997

Incidences de l'évolution du climat dans les régions : Evaluation de la vulnérabilité (avec résumé à l'intention des décideurs). Rapport spécial du Groupe de travail II du GIEC, 1997.

VIII. RAPPORT SPÉCIAL DU GIEC, 1999

L'aviation et l'atmosphère planétaire (y compris le résumé à l'intention des décideurs, qui est disponible en *anglais, en arabe, en chinois, en espagnol, en français et en russe*). Rapport spécial des groupes de travail I et III du GIEC.