dgac

STAC

Aviation et climat

Analyse des moyens d'action publique pour limiter l'impact de l'aviation sur le changement climatique

Rapport d'étude

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat
Développement durable
Prévention des risques
Infrastructures, transports et mer

Présent pour l'avenir

service technique de l'Aviation civile

www.stac.aviation-civile.gouv.fr

Photo de Couverture: © Fotolia/Stéphane Bidouze #6019189

Texte corrigé - Février 2016

Mastère d'action publique

Promotion 2008-2009

Thèse professionnelle

Chems CHKIOUA

Aviation et Climat

"Analyse des moyens d'action publique pour limiter l'impact de l'aviation sur le changement climatique"

Organisme d'accueil

Service Technique de l'Aviation Civile

31 Av du Mal Leclerc
94381 Bonneuil-Sur-Marne Cedex

Correspondant au sein de l'organisme d'accueil :
M. Jean-Philippe Dufour

Directeur de thèse professionnelle :
M. Vincent Spenlehauer

Remerciements

Je souhaite en premier lieu remercier le personnel et la direction du STAC pour l'accueil qui m'a été réservé durant toute la durée de ma mission.

Je souhaite ensuite remercier tout particulièrement M. Jean-Pierre Giblin pour ses conseils, et MM. Jean-Philippe Dufour et Vincent Spenlehauer pour leur disponibilité et leur soutien attentif.

Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes qui m'ont accordé un entretien, pour avoir eu la gentillesse de me faire partager leur expérience et leurs connaissances.

Résumé

Ce rapport analyse les moyens d'action publique pour réduire la contribution de l'aviation aux changements climatiques.

Il décrit le phénomène de l'effet de serre et la contribution spécifique de l'aviation qui dépasse celle des seules émissions de CO_2, et est appelée à augmenter.

Puis il analyse les actions menées pour réduire l'impact climatique de l'aviation. Actions qui n'englobent toutefois ni l'ensemble des acteurs ni l'ensemble des effets de l'aviation.

Il dresse ensuite une typologie des moyens d'action publique.

Enfin il suggère des pistes d'action, notamment par la construction d'un socle commun de connaissances en s'appuyant sur les travaux du GIEC, ou en prenant en compte les effets des trainées de condensation.

Dans tous les cas, la DGAC a un rôle à jouer pour rendre l'aviation plus respectueuse de l'environnement.

Mots-clés : aviation, carburants alternatifs, effet de serre, gaz à effet de serre, GIEC, trainées de condensation

Abstract

This report aims at analyzing the policy measures that could help reducing the contribution of aviation to climate changes.

The greenhouse effect and the impact of aviation on climate changes are first described. Such effect is greater than the effect stemming from CO_2 emissions alone and will rise in the future

An analyze of the progress lines which could allow for a reduction of the aviation impact on climate is then performed. This process however does not involve all the sector's actors nor does it contemplate each of the impact of aviation on climate.

The third chapter provides for a typology and an assessment of policy measures.

Finally the report identifies the most promising measures such as the promotion of a common knowledge basis stemming from the IPCC work or an action on the impact of the persistent linear contrails.

In all and any case the French DGAC may play a central part and contribute to a cleaner aviation compliant with the environment principles.

Keywords : aviation, alternative fuel, greenhouse effect, greenhouse gas, IPCC, persistent linear contrails

Agir sur les émissions de gaz à effet de serre de l'aviation suffit-il à maîtriser son impact sur les changements climatiques ?

Ce rapport a été rédigé à la demande du Service Technique de l'Aviation Civile, dont l'une des missions consiste à apporter une expertise technique à l'appui des politiques de réduction des nuisances environnementales de l'aviation. L'objectif de ce rapport est d'analyser les moyens d'action publique de réduction de la contribution du transport aérien aux changements climatiques. Il est le résultat d'une mission professionnelle effectuée dans le cadre du mastère d'action publique de l'Ecole nationale des ponts et chaussées.

1. Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre contribuent au réchauffement climatique contre lequel la communauté internationale se mobilise

L'effet de serre résulte de l'absorption par l'atmosphère d'une partie du rayonnement infrarouge émis par le sol terrestre lui-même chauffé par les rayons du soleil. L'absorption puis la réémission vers la Terre de ce rayonnement par certains gaz de l'atmosphère, dits « gaz à effet de serre » (GES) contribue au réchauffement de l'atmosphère. Lorsque leur concentration augmente, l'effet de serre s'accroit et la température moyenne augmente.

Le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane, le protoxyde d'azote, et l'ozone sont les principaux gaz à effet de serre. Pour comparer les GES on évalue leur forçage radiatif respectif (grandeur instantanée) et leur potentiel de réchauffement global qui prennent en compte leur durée de vie respective dans l'atmosphère.

Certains GES sont naturellement présents dans l'atmosphère, mais tous ont vu leur concentration augmenter du fait des activités humaines au cours de l'ère industrielle.

La hausse des températures moyennes, conséquence directe de l'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère, entraine l'élévation du niveau des mers. Selon toute vraisemblance elle devrait aussi s'accompagner d'une recrudescence des phénomènes météorologiques exceptionnels. Elle aura des conséquences désastreuses tant sur les populations humaines que sur la biodiversité.

Le quatrième rapport du GIEC est sans équivoque : les activités humaines ont depuis le début de l'ère industrielle lourdement contribué à modifier l'équilibre climatique de la planète.

Le GIEC conclut à la nécessité de limiter d'ici à l'année 2100, la hausse des températures moyennes à 2°C par rapport aux niveaux préindustriels. Cet objectif impose de limiter les émissions anthropiques de GES. Le Protocole de Kyoto (1997) pose un premier jalon en fixant pour la première fois des objectifs contraignants de réductions des émissions de GES pour les pays développés (parties dites de l'Annexe I).

2. Contrairement à d'autres activités économiques, le secteur aérien a été jusqu'à présent exonéré de réduction d'émissions. Pourtant, en l'absence de toute démarche volontariste l'impact du secteur aérien cessera à l'avenir d'être marginal.

L'aviation émet du CO_2 lors de la combustion du kérosène. Selon le GIEC, l'aviation compte pour environ 2% du total des émissions de GES anthropiques. Elle contribue donc à l'effet de serre.

Pourtant les émissions de l'aviation internationale ne sont pas comptabilisées dans le décompte des émissions de GES au titre du protocole de Kyoto. Le soin est aujourd'hui laissé à l'OACI de fixer au secteur les obligations qui lui sembleront les plus appropriées.

En dépit de cette exonération le secteur aérien se doit d'agir. Le trafic pourrait tripler à l'horizon 2050 et la présente crise de l'économie mondiale ne devrait pas remettre en cause ces prévisions. En l'absence de toute mesure, dans un contexte de réduction globale des émissions, l'impact de l'aviation pourrait cesser d'être marginal. Des mesures s'imposent, mais l'OACI ne parvient pas à bâtir un consensus autour de mesures globales de réduction des émissions de GES de l'aviation.

3. L'amélioration des performances du transport aérien est l'une des voies privilégiées pour réduire les émissions de l'aviation mais son impact sera insuffisant.

Des progrès sont attendus en matière de gestion du trafic grâce à une réorganisation de l'espace aérien et à de nouveaux systèmes de contrôle. Les trajectoires pourront ainsi être optimisées. Elles privilégieront les routes directes et les descentes continues. Dans les aéroports, de nouveaux aménagements et de nouveaux équipements permettront aux avions d'effectuer les manœuvres au sol sans avoir recours à leurs moteurs thermiques. L'allègement des structures et l'amélioration des moteurs et de l'aérodynamique des appareils constituent également des axes de progrès pour la construction aéronautique.

Mais, c'est surtout le développement de nouveaux carburants qui concentre le plus d'espoirs.

L'objectif à atteindre est que le CO_2 absorbé lors de la production du carburant puisse compenser autant que possible le CO_2 rejeté lors de sa combustion dans les moteurs.

Dans tous les cas, l'exploration de ces voies de progrès sera longue, nécessitera d'importants investissements et la mobilisation de l'ensemble des acteurs du secteur.

4. Ce constat plaide pour l'inclusion du transport aérien dans les mécanismes d'échange de quotas d'émission.

L'absence à court terme d'alternative technique susceptible de réduire de manière substantielle les émissions, plaide pour l'inclusion globale du transport aérien dans un marché de permis d'émission multi-sectoriel. Le secteur de l'aviation compenserait ainsi ses émissions en finançant la réduction des émissions dans d'autres secteurs où les coûts de dépollution sont plus faibles. L'OACI préconise cette mesure sans pour autant parvenir à l'imposer. Il est vrai qu'en dehors des mesures de soutien à l'innovation qui n'ont d'influence qu'à long terme, l'efficacité d'autres mesures économiques serait moindre. Ainsi une taxe environnementale sur le kérosène ne permettrait pas, pour un coût équivalent, d'atteindre le même niveau de réduction des émissions. En outre elle se heurterait à de nombreux obstacles, notamment juridiques. Une taxe sur les billets d'avion ne serait pas non plus de nature à inciter les compagnies à progresser et la mise en place de redevances de route peut difficilement être une alternative satisfaisante.

L'Union Européenne, sans attendre l'OACI, a adopté en janvier 2009, une directive prévoyant l'inclusion du transport aérien dans son système d'échange de quotas d'émission (*Emission Trading Scheme* – ETS). Ce faisant, l'UE impose à l'ensemble des compagnies qui desservent son territoire, des standards supérieurs à ceux de Kyoto.

5. L'impact du transport aérien sur le climat ne se limite pas aux émissions de CO_2 mais l'appréhension du phénomène dans sa globalité se heurte à l'absence d'un socle commun de connaissance.

Le GIEC estime que l'impact de l'aviation sur le climat est deux à quatre fois supérieur à celui de ses seules émissions de CO_2.

Les NO*x*, les particules et les trainées de condensation émis en altitude, augmentent également l'effet radiatif du transport aérien mais l'évaluation de leur impact et des voies d'atténuation ne font pas l'objet d'une attention suffisante. Les NO*x* et les trainées de

condensation ont des durées de vie courtes, mais des effets puissants très localisés qui sont fonction des conditions atmosphériques. La métrique utilisée pour quantifier l'effet radiatif des GES (qui ont des durées de vie beaucoup plus longues et des effets globaux), n'est pas forcément adaptée dans cette hypothèse. Cela induit un fort degré d'incertitude pour quantifier l'impact de ces autres émissions sur les changements climatiques. Un effet qui a un temps de présence atmosphérique court peut avoir un impact climatique important si sa source est permanente. C'est pourquoi il apparaît nécessaire de prendre en compte l'impact de l'aviation sur le climat de manière globale et non pas seulement en terme d'émission de GES et de le mesurer à l'aune d'une métrique adaptée.

6. La nature des enjeux économiques et environnementaux en cause justifie une intervention de l'action publique sur ces autres facteurs.

Alors que la réduction des émissions de CO_2 rejoint l'intérêt économique des acteurs à diminuer les consommations de carburant, la réduction de l'impact climatique des autres émissions de l'aviation ne bénéficie d'aucune incitation. Plusieurs leviers existent pourtant. Certains, détaillés plus avant dans ce rapport, ont retenu plus particulièrement notre attention :

Au premier rang figure l'élaboration prioritaire d'un socle commun de connaissance. La commande d'un nouveau rapport spécial au GIEC pourrait être le catalyseur d'autres travaux visant à prendre en compte l'ensemble des effets de l'aviation sur le climat. Il pourrait peut-être même être le déclencheur d'une nouvelle mobilisation au sein de l'OACI au profit de l'inclusion de l'aviation dans un marché mondial de quotas d'émissions.

La mise en place d'une norme sur la composition du kérosène visant à diminuer sa teneur en soufre permettrait de limiter les émissions de SO*x*, substances favorisant la formation des trainées de condensation. Une norme sur les NO*x* en croisière pourrait aussi voir le jour.

Parallèlement, le développement d'une « boîte verte » installée à bord des appareils pourrait permettre d'évaluer et d'enregisrer l'effet radiatif réel du trafic aérien grâce aux mesures des différents paramètres du vol. Cela simplifierait les procédures de déclaration des émissions et ouvrirait la voie à la prise en compte de l'ensemble des émissions dans les marchés de permis.

La DGAC, au sein du ministère en charge du développement durable, a un rôle à jouer en Europe et au sein des instances internationales pour concilier développement du transport aérien et maîtrise du changement climatique.

Table des matières

REMERCIEMENTS 2

RESUME 3

ABSTRACT 4

AGIR SUR LES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE DE L'AVIATION SUFFIT-IL A MAITRISER SON IMPACT SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ? 5

TABLE DES MATIERES 9

LISTE DES TABLEAUX 12

LISTE DES FIGURES 13

LISTE DES ANNEXES 15

INTRODUCTION 16

1. AVIATION ET EFFET DE SERRE 18

1.1. DESCRIPTION DU PHENOMENE DE L'EFFET DE SERRE 18

1.1.1. L'EFFET DE SERRE 18

1.1.2. LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES 19

1.2. LES GAZ A EFFET DE SERRE 19

1.2.1. LES PRINCIPAUX GES ET LEURS SOURCES 19

1.3. LES CONTRIBUTIONS SPECIFIQUES DE L'AVIATION A L'EFFET DE SERRE 24

1.3.1. LES NO_X 24

1.3.2. LES TRAINEES DE CONDENSATION ET LES PARTICULES 25

1.4. ETAT DES LIEUX 27

1.4.1. LES EMISSIONS DE GES DANS LE MONDE 27

1.4.2. CONTRIBUTION DU TRANSPORT AERIEN AUX EMISSIONS MONDIALES ET PERSPECTIVES 29

1.4.3. CONTRIBUTION DU TRANSPORT AERIEN EUROPEEN 32

1.4.4. LES EMISSIONS DE CO_2 DU TRANSPORT AERIEN DE LA FRANCE 34

1.5. PERSPECTIVES D'EVOLUTION AU NIVEAU MONDIAL 36

1.6. LE TRANSPORT AERIEN DANS LES ACCORDS INTERNATIONAUX DE REDUCTION DES GES 38
1.6.1. LE TRANSPORT AERIEN DE KYOTO A COPENHAGUE 38
1.6.2. LA POLITIQUE EUROPEENNE VIS-A-VIS DU TRANSPORT AERIEN 40
1.6.3. LA POLITIQUE DE L'OACI POUR REDUIRE LES EMISSIONS DU TRANSPORT AERIEN 41

2. LES VOIES DE PROGRES 43

2.1. SPECIFICITES DE L'ECONOMIE DU TRANSPORT AERIEN 43
2.2. REDUIRE L'IMPACT CLIMATIQUE PAR UNE EXPLOITATION OPTIMISEE DES AERONEFS 45
2.2.1. EN OPTIMISANT LES CONSOMMATIONS DE CARBURANT 45
2.2.2. EN RENOUVELANT LES FLOTTES 46
2.3. LA GESTION DU TRAFIC AERIEN ET DES AEROPORTS 48
2.3.1. OPTIMISATION DES ROUTES ET DES CAPACITES 48
2.3.2. AEROPORTS : CONCEPTION, POSTES AU CONTACT, EXPLOITATION, ACCES 50
2.4. SUBSTITUTION ET COMPLEMENTARITE MODALE 51
2.5. LA CONCEPTION ET LA CONSTRUCTION DES AERONEFS 52
2.5.1. LES AVIONS ET LES MOTEURS 53
2.5.2. LES CARBURANTS 57

3. QUELS MOYENS D'ACTION PUBLIQUE POUR REDUIRE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DE L'AVIATION ? 63

3.1. LA CONSTRUCTION D'UN SOCLE COMMUN DE CONNAISSANCE 63
3.1.1. L'APPUI DU GIEC 63
3.1.2. UNE BASE DE DONNEES ET DE MODELES DE REFERENCE 65
3.1.3. PRESERVATION D'UNE FORMATION DES HOMMES ET FEMMES AU MEILLEUR NIVEAU 65
3.2. L'ELABORATION D'UNE DYNAMIQUE COMMUNE 65
3.2.1. LES ACCORDS VOLONTAIRES 66
3.2.2. L'ANIMATION DE RESEAU 68
3.2.3. EXERCICE D'UNE STRATEGIE D'INFLUENCE 69
3.3. LES INSTRUMENTS NORMATIFS DE REDUCTION DES EMISSIONS 69
3.3.1. LES CRITERES DE COMPARAISON DES INSTRUMENTS DE REDUCTION DES POLLUTIONS 69
3.3.2. LES NORMES, REGLEMENTS ET INTERDICTIONS 71
3.4. LES INSTRUMENTS ECONOMIQUES 78
3.4.1. LES TAXES ET REDEVANCES 78
3.4.2. LES PROGRAMMES DE COMPENSATION 80
3.4.3. LES MARCHES DE PERMIS D'EMISSION 81
3.4.4. LE SOUTIEN A LA RECHERCHE 88

4. COMMENT CONTRIBUER A FAIRE D'AVANTAGE PROGRESSER LES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES DE L'AVIATION ? 91

4.1. AVIATION ET CLIMAT : UNE DICHOTOMIE QUI SE RETROUVE DANS L'ORGANISATION INTERNATIONALE… 91

4.1.1. LA CCNUCC 91

4.1.2. L'OACI 92

4.2. LA DGAC : UN ACTEUR ESSENTIEL DE LA MAITRISE DE LA CONTRIBUTION DE L'AVIATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES 92

4.2.1. LA QUESTION CLIMATIQUE AU SEIN DE LA DGAC 93

4.2.2. LE STAC 95

4.3. RECOMMANDATIONS ET MISE EN ŒUVRE DES MOYENS D'ACTION PUBLIQUE 97

4.3.1. ACTIONS RELATIVES A LA CONSTRUCTION D'UN SOCLE COMMUN DE CONNAISSANCE (SCC) 97

4.3.2. ACTIONS RELATIVES A L'EVOLUTION DES INSTRUMENTS DE REDUCTION DES NUISANCES (IRN) 101

CONCLUSION 108

BIBLIOGRAPHIE 110

ANNEXE 1. LETTRE DE MISSION 121

ANNEXE 2. LISTE DES PERSONNES RENCONTREES 123

ANNEXE 3. CARBURANTS ALTERNATIFS : LES DIFFERENTS PROCEDES OU RESSOURCES ENVISAGEABLES 124

ANNEXE 4. ANALYSE MULTICRITERE DES NORMES ENVIRONNEMENTALES DANS L'AVIATION 126

ANNEXE 5. ANALYSE MULTICRITERE D'UNE TAXE ENVIRONNEMENTALE SUR LE KEROSENE 132

ANNEXE 6. ANALYSE MULTICRITERE DE LA MODULATION DES REDEVANCES DE ROUTE 134

ANNEXE 7. ANALYSE MULTICRITERE DE L'INCLUSION DE L'AVIATION DANS UN MARCHE DE PERMIS D'EMISSION 136

ANNEXE 8. GLOSSAIRE 139

Liste des tableaux

Tableau 1-Composition chimique de l'atmosphère (Bruno Sportisse - Pollution Atmosphérique, 2007). _____*20*

Tableau 2-Pouvoir radiatif global des principaux GES (GIEC - Résumé Technique - Groupe de Travail 1, 2007) _____*23*

Tableau 3-Prévisions de trafic de l'OACI pour la période 1985-2025 (OACI - Rapport environnemental, 2007) _____*31*

Tableau 4-Evolution des émissions de CO_2 de l'aviation par Etat membre de l'UE 15 (EEA - Annual European Community GHG Report, 2008) _____*33*

Tableau 5-Evolution des émissions de CO_2 des soutes internationales de l'aviation par Etat membre de l'UE 15 (EEA - Annual European Community GHG Report, 2008) _____*34*

Tableau 6-Émissions de CO_2 du transport aérien de la France (CITEPA / CORALIE / format SECTEN / màj fev 2008, 2008) _____*35*

Tableau 7-Croissance des émissions et du trafic aérien commercial de la France entre 1990 et 2006 (CITEPA / CORALIE / format SECTEN / màj fev 2008, 2008) (DGAC - Aviation et CO2 : les chiffres clés, 2009) _____*36*

Tableau 8-Tableau des critères d'évaluation d'une mesure d'action publique _____*71*

Liste des figures

Figure 1-Phénomène de l'effet de serre (Okanagan University College (Ca), Oxford University (GB), EPA (USA), 1996) ____ *18*
Figure 2-Variation de concentration des 3 principaux GES. Observations issues de carottes glacières. (GIEC - Résumé Technique - Groupe de Travail 1, 2007) ____ *22*
Figure 3-Forçages radiatifs globaux de 1750 à 2005. (GIEC - Résumé Technique - Groupe de Travail 1, 2007) ____ *22*
Figure 4-Schéma de combustion d'un carburant au sein d'un moteur d'avion. (SNECMA, 2005). ____ *24*
Figure 5-Répartition par GES en 2004 (GIEC - Rapport du groupe de travail I, 2007) ____ *27*
Figure 6-Evolution des émissions globales de GES par secteur entre 1990 et 2004 (GIEC - Rapport du groupe de travail I, 2007) ____ *28*
Figure 7-Répartition régionale des émissions de GES par habitant (GIEC - Changements Climatiques - Rapport de synthèse, 2007) ____ *28*
Figure 8-Part des émissions de CO_2 de l'aviation dans le total des émissions globales (GIEC - Résumé technique - Groupe de travail III, 2007) ____ *29*
Figure 9-Emissions globales de $CO_{2éq}$ par secteurs en 2004 (GIEC - Résumé technique - Groupe de travail III, 2007) ____ *29*
Figure 10-Emissions de CO_2 des transports historiques et estimées de 1970 à 2050 (GIEC - Résumé technique - Groupe de travail III, 2007) ____ *30*
Figure 11-Evolution de la consommation moyenne au 100km par passager (Airbus - Document commercial, 2008) ____ *31*
Figure 12-Evolution des émissions de CO_2 de l'aviation dans l'UE 15 (EEA - Annual European Community GHG Report, 2008) ____ *32*
Figure 13-Evolution des émissions de CO_2 des soutes internationale de l'UE 15 (EEA - Annual European Community GHG Report, 2008) ____ *34*
Figure 14-Comparaison de différents scénarios de croissance de demande de transport aérien de passagers (CONSAVE 2050 - European Commission, 2005) ____ *37*
Figure 15-Croissance annuelle des principaux flux de trafic par couple provenance/destination entre 2000 et 2050 (CONSAVE 2050 - European Commission, 2005) ____ *37*
Figure 16-Prévisions de croissance moyenne annuelle sur la période 2007-2030 (Eurocontrol - Long Term Forecast Flight Movements 2008-2030, 2008) ____ *38*
Figure 17-Evolution de la part du poste carburant dans les coûts des compagnies (50% moyens courriers / 50% longs courriers) de 1994 à 2008, en fonction du prix du baril – Données EIA/AEA (ENAC/TSE - Air Transport Market, 2009) ____ *44*

Figure 18-Evolution des profits et des recettes des 150 compagnies les plus rentables, sur la base des estimations réalisées par l'Association internationale des Compagnies Aériennes (ENAC/TSE - Air Transport Market, 2009) 44
Figure 19-Comparaison profil de CDA et profil de descente classique (STAC - Bilan environnemental de la phase III de l'expérimentation Green Tracks, 2009) 49
Figure 20-Illustration des perspectives de développement des stratégies de hub (Airbus - Global Market Forecast 2004-2023, 2004) 52
Figure 21-Schéma, en coupe longitudinale, d'un turboréacteur à double flux. (ENAC-Yves Bienvenu, 2009) 54
Figure 22-Illustration des équilibres entre différentes contraintes environnementales qui s'appliquent à la conception d'un turboréacteur (SNECMA, 2005) 55
Figure 23-Diagramme Payload/Range Boeing 777 (BOEING, 2004), (ENAC-Yves Bienvenu, 2009) 73
Figure 24-Diagramme Payload/Range Airbus A380 (Airbus, 2003), (ENAC-Yves Bienvenu, 2009) 74
Perspectives de réduction des émissions de GES de l'aviation. (Patrick Monclar - Président du Comité Technique du Gifas, 2009) 89
Exemple de classification en blocs selon les catégories de la CCNUCC (AEA - Contribution to a global approach for international aviation , 2008) 106
Figure 25-Inventaire des projets de carburants aéronautiques alternatifs 125

Liste des annexes

Annexe 1. Lettre de mission ____ *121*
Annexe 2. Liste des personnes rencontrées ____ *123*
Annexe 3. Carburants alternatifs : les différents procédés ou ressources envisageables ____ *124*
Annexe 4. Analyse multicritère des normes environnementales dans l'aviation ____ *126*
Annexe 5. Analyse multicritère d'une taxe environnementale sur le kérosène ____ *132*
Annexe 6. Analyse multicritère de la modulation des redevances de route ____ *134*
Annexe 7. Analyse multicritère de l'inclusion de l'aviation dans un marché de permis d'émission ____ *136*
Annexe 8. Glossaire ____ *139*

Introduction

Ce rapport a été rédigé dans le cadre d'une mission commandée par le Service Technique de l'Aviation Civile (STAC). Cette mission professionnelle s'inscrit dans le programme pédagogique du Mastère d'Action Publique de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Elle est décrite en Annexe 1.

Depuis des décennies, le trafic aérien français (intérieur, intra européen, international) connaît une croissance soutenue et le trafic mondial davantage encore. Des prévisions de long terme s'accordent sur une croissance du trafic mondial qui, à l'horizon 2050, pourrait être encore multipliée par trois.

S'il est indéniable que le secteur a réalisé d'importants progrès d'efficacité énergétique, les gains escomptés à l'avenir ne suffiront pas à limiter l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) résultant de la croissance du trafic.

Dans le même temps d'autres secteurs verront leurs émissions diminuer pour répondre à l'objectif de division par deux des émissions globales d'ici à 2050 nécessaire à maintenir une élévation des températures à +2°C à la fin du siècle[1], dont le Protocole de Kyoto constitue le premier jalon au plan international de cette dynamique.

Dans ce contexte la contribution du secteur aérien pourrait cesser d'être marginale. On lui attribue en effet aujourd'hui environ 2% du total des émissions anthropiques de GES.

En 2005, à la suite de la présentation du plan climat qui doit permettre à la France de tenir ses engagements pris dans le cadre du Protocole de Kyoto, le Ministre en charge de l'Equipement et le Secrétaire d'Etat aux transports confiaient à Jean-Pierre Giblin la mission d'animer un groupe de travail sur la maîtrise des émissions de GES du transport aérien. Les recommandations de ce groupe de travail interministériel ont été reprises par l'Etat français et ont fait l'objet d'un mémorandum adressé aux instances européennes. L'une des recommandations phare était l'inclusion du secteur aérien dans un marché de permis d'émission. Elle s'est concrétisée en janvier 2009, par l'adoption de la directive 2008/101/EC

[1] Le GIEC a conclu à la nécessité de limiter la hausse des températures moyennes à 2°C par rapport aux niveaux préindustriels d'ici à la 2100 de manière à éviter une perturbation anthropique dangereuse. Compte tenu des écarts d'émissions par habitant, cet objectif conduira à diviser par trois à cinq les émissions des pays industrialisés. La France a fait sien cet objectif et l'initiative Facteur 4 vise une division par quatre des émissions totales du pays vers la moitié de ce siècle.

incluant l'aviation dans le système européen ETS (*Emission Trading Scheme*) d'échange de quotas d'émission de CO_2.

Mais, au-delà des seules émissions de CO_2 de l'aviation, il est nécessaire de maîtriser l'ensemble de la contribution du secteur aérien au réchauffement global. Les émissions de CO_2, provenant de la combustion du kérosène, ne constituent qu'une part de la contribution de l'aviation aux changements climatiques. Selon le 4ème rapport du GIEC, l'impact général de l'aviation sur le réchauffement est deux à quatre fois plus important que celui du CO_2 seul. D'autres facteurs, comme les trainées de condensation ou les NO*x* émis en croisière, sont à prendre en compte. Dans ce contexte, l'évaluation de leur impact constitue un véritable enjeu.

Le présent rapport rappelle, dans sa première partie, les éléments de diagnostic du réchauffement climatique. Il précise la contribution spécifique du secteur aérien au réchauffement climatique et ses perspectives d'évolution à moyen et long termes.

Puis, dans une deuxième partie, il décrit les améliorations envisagées afin de limiter l'impact de l'aviation sur les changements climatiques.

La troisième partie sera consacrée à l'analyse des moyens d'action publique permettant de réduire la contribution de l'aviation au réchauffement global.

Dans sa dernière partie, enfin, le rapport sélectionne les actions qui pourraient être retenues et met en évidence le rôle de la DGAC en tant qu'acteur pour renforcer l'expertise, la capacité de proposition et la participation de la France aux débats européens et internationaux sur le thème de la maîtrise des effets de l'aviation sur le climat.

1. Aviation et effet de serre

1.1. Description du phénomène de l'effet de serre

1.1.1. L'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel qui maintient sur la Terre une température moyenne de 15°C. En son absence, on estime que cette température serait de -18°C… La figure ci-dessous illustre le mécanisme de l'effet de serre :

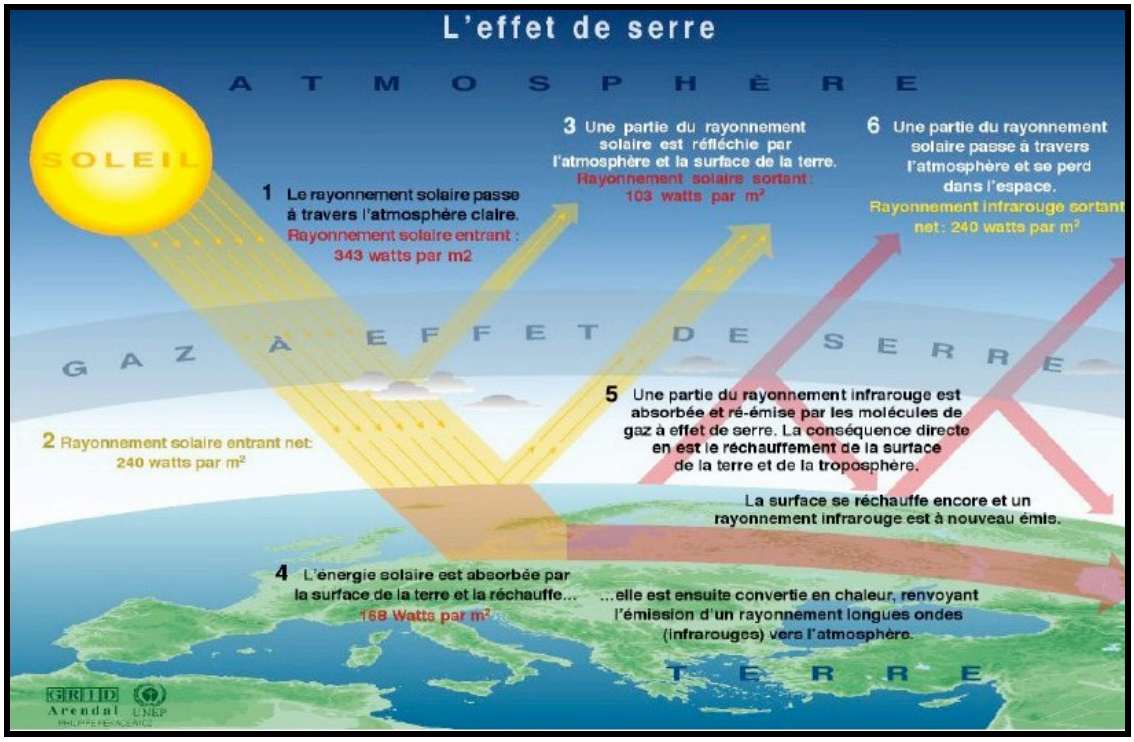


Figure 1-Phénomène de l'effet de serre (Okanagan University College (Ca), Oxford University (GB), EPA (USA), 1996)

Sur le long terme, l'énergie radiative reçue du soleil par la Terre et l'atmosphère s'équilibre avec l'énergie réémise par la Terre et l'atmosphère par rayonnement infrarouge.

A peu près la moitié de l'énergie reçue du soleil est absorbée par la surface de la Terre. Cette énergie est à son tour transmise à l'atmosphère : par conduction au contact du sol, par évapotranspiration et par rayonnement. Le rayonnement infrarouge réémis par la surface de la Terre est absorbé par les nuages et les GES présents dans l'atmosphère. L'énergie ainsi absorbée est à nouveau rayonnée en partie vers l'espace et en partie vers la surface de la Terre, ce qui contribue à l'effet de serre.

1.1.2. Les changements climatiques

L'activité humaine produit des GES. L'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère augmente l'effet de serre et conduit par conséquent à une élévation des températures moyennes.

Le réchauffement global induit des changements climatiques plus ou moins localisés dont les conséquences sont multiples.

Selon le GIEC, des élévations de températures récentes mesurées localement ont eu un impact sur le régime hydrologique et/ou la biodiversité terrestre ou marine dans plusieurs régions du monde (GIEC - Rapport de synthèse, 2001).

Selon le 4ème rapport d'évaluation du GIEC, l'impact du changement climatique et donc ses coûts économiques et humains augmentera avec l'élévation des températures, en particulier en raison de l'aggravation de certains phénomènes climatiques (canicules, inondations, sécheresses), ce qui conduira très probablement au bouleversement de nombreux écosystèmes, engendrera des crises sanitaires ou des crises liées à des difficultés d'accès aux ressources alimentaires dans certaines régions. D'importants déplacements de populations sont ainsi à craindre.

1.2. Les gaz à effet de serre

1.2.1. Les principaux GES et leurs sources

Les gaz à effet de serre (GES) sont les composants gazeux naturels et anthropiques de l'atmosphère qui absorbent ou émettent des radiations à des longueurs d'ondes spécifiques dans le spectre du rayonnement infrarouge émis par la terre, l'atmosphère et les nuages. Cette propriété cause l'effet de serre (cf. 1.1.1).

La vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), leprotoxyde d'azote (N_2O), le méthane (CH_4), l'ozone (O_3) sont les principaux GES dans l'atmosphère de la terre. Il existe également des GES résultant uniquement de l'activité humaine, tels que les halocarbures et autres substances contenant du chlore et du bromure dont les émissions sont réglementées par le Protocole de Montréal. Outre les CO_2,, N_2O et CH_4 le Protocole de Kyoto réglemente l'hexafluorure de soufre (SF_6), les hydrofluorocarbures (HFC) et les perfluorocarbures (PFC) qui sont eux aussi des GES (Glossaire GIEC – Troisième Rapport Annexe B, 2001)).

Les GES sont très peu abondants, les plus répandus à l'état naturel étant la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et l'ozone.

La composition chimique de l'atmosphère sec est en effet la suivante :

Nom	Symbole	GES	Présence en volume[2]
Azote	N	Non	78%
Dioxygène	O_2	Non	21%
Argon	Ar	Non	0,93%
Dioxyde de carbone	CO_2	Oui	365 ppmv
Ozone	O_3	Oui	1ppbv – 10ppmv
Méthane	CH_4	Oui	1,8 ppmv

Tableau 1-Composition chimique de l'atmosphère (Bruno Sportisse - Pollution Atmosphérique, 2007).

Les principaux GES :

La vapeur d'eau (H_2O)

C'est de très loin le principal GES, puisqu'il représente environ 70% des émissions naturelles et anthropiques de GES. L'essentiel de la vapeur d'eau émise provient du cycle naturel de l'eau. La vapeur d'eau a une durée de vie atmosphérique très courte (de l'ordre de quelques jours). De ce fait l'impact sur le climat de la seule vapeur d'eau anthropique est très faible et demeure très localisé.

Le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO_2)

Le CO_2 est naturellement présent dans l'atmosphère. Les émissions naturelles proviennent de la destruction de végétaux (dans des incendies naturels par exemple), de la respiration ou de la putréfaction d'êtres vivants.

La production de CO_2 d'origine anthropique est le résultat de la combustion d'énergies fossiles, de la déforestation, et de certaines activités industrielles.

Le méthane (CH_4)

Le méthane est lui aussi naturellement présent dans l'atmosphère. Sa production naturelle provient de la fermentation ou de la putréfaction de composés organiques, notamment dans les zones humides. Mais plus de la moitié des émissions est liée à l'activité humaine : l'agriculture, l'élevage ainsi que l'extraction du gaz naturel sont les principaux producteurs de méthane d'origine anthropique.

[2] ppmv : « partie par million en volume » - ppbv : « partie par milliard en volume »

Le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N_2O)

Les principales sources humaines d'émissions de N_2O sont l'agriculture (engrais azotés) et la combustion de matières organiques. Peu présent naturellement dans l'atmosphère, le N_2O n'est pas absorbé naturellement, que ce soit par les océans ou par les plantes, au contraire du CO_2.

Les halocarbures et autres gaz artificiels fluorés

HFC, PFC, SF_6 n'existent pas à l'état naturel. Ils représentent moins de 1% des GES d'origine humaine. Ils présentent une très longue durée de vie dans l'atmosphère (jusqu'à 50.000 ans). Ces gaz se retrouvent dans les appareils de réfrigération, ou de climatisation, dans les bombes aérosols, dans la fabrication d'appareils électriques ou électroniques.

L'ozone (O_3)

Il est naturellement présent dans l'atmosphère. Dans la stratosphère (couche d'ozone) il protège les êtres vivants des rayons ultraviolets. C'est un oxydant puissant considéré comme polluant dans les basses couches de l'atmosphère (irritation des muqueuses, agression des voies respiratoires).

Comparaison des pouvoirs et durée de vie des GES

La température de notre planète dépend de l'équilibre entre le rayonnement solaire absorbé et le rayonnement infrarouge émis. Cet équilibre entre ces deux rayonnements permet de conserver une température globalement constante (à rayonnement solaire constant) sur notre planète. Si on rajoute dans l'atmosphère des gaz absorbant le rayonnement infrarouge, il en résulte par simple équilibre énergétique, un réchauffement de l'atmosphère. C'est ce que l'on appelle le forçage radiatif.

Le forçage radiatif associé à un phénomène est défini comme le changement, dû à ce phénomène, de l'exposition énergétique verticale nette à la tropopause (exprimée en $W.m^{-2}$)[3]. (Glossaire GIEC – Troisième Rapport Annexe B, 2001). Il s'agit d'une grandeur instantanée.

Des mesures atmosphériques directes et l'analyse des bulles d'air enfermées dans les glaces de l'Antarctique et du Groenland permettent de reconstituer les concentrations et de calculer les forçages radiatifs dus au CO_2, au CH_4 et au N_2O au cours des 20.000 dernières années.

[3] L'exposition énergétique, ou irradiance ou éclairement énergétique, exprimée en $W.m^{-2}$ est une grandeur qui permet de quantifier la puissance d'un rayonnement électromagnétique par unité de surface.

On peut observer sur la figure 2 ci-dessous, l'augmentation des concentrations de CO_2, de CH_4 et de N_2O depuis -10.000 ans jusqu'à aujourd'hui. Le phénomène s'est accéléré avec le début de l'ère industrielle.

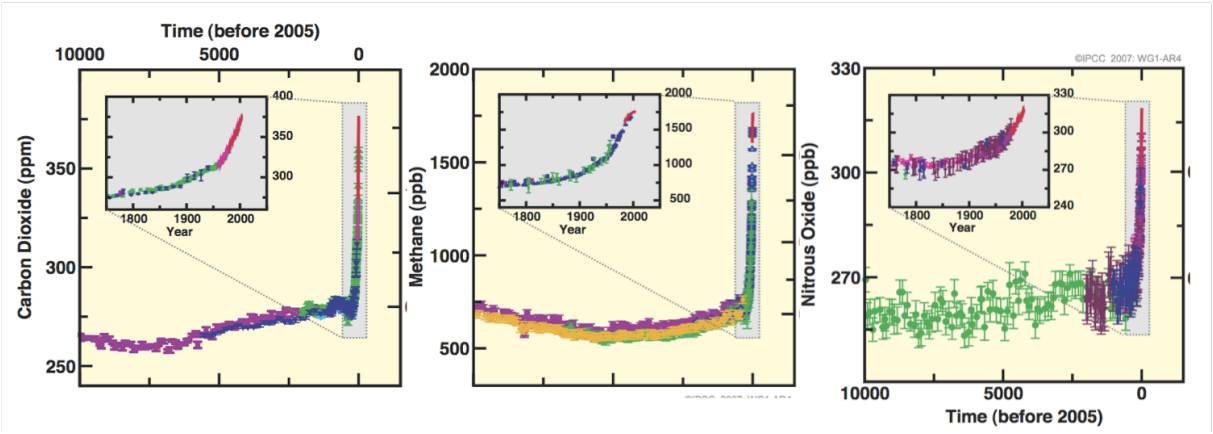


Figure 2-Variation de concentration des 3 principaux GES. Observations issues de carottes glacières. (GIEC - Résumé Technique - Groupe de Travail 1, 2007)[4]

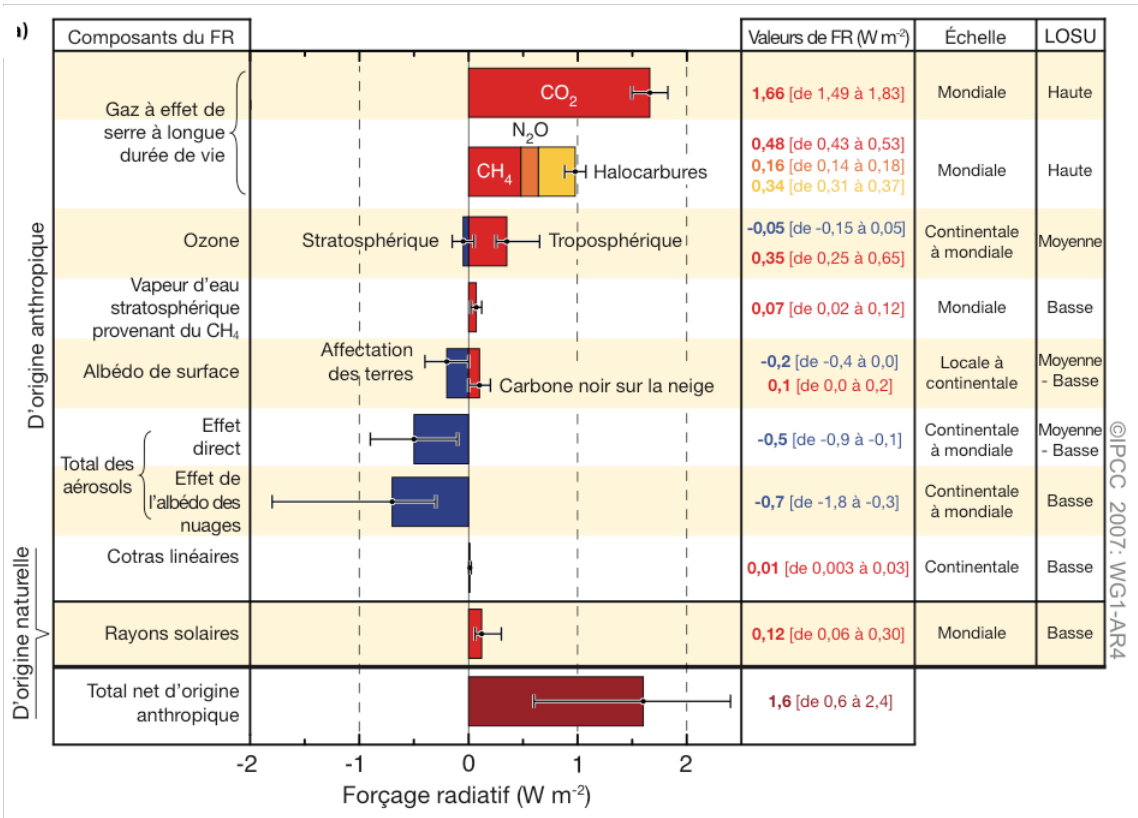


Figure 3-Forçages radiatifs globaux de 1750 à 2005. (GIEC - Résumé Technique - Groupe de Travail 1, 2007)[5]

[4] Les barres grisées représentent la variabilité naturelle au cours des 650 000 dernières années.

[5] Forçages radiatifs (FR) moyens à l'échelle mondiale et leurs intervalles de confiance de 90% en 2005 pour divers agents et mécanismes. Dans les colonnes de droite sont indiquées les meilleures estimations et les intervalles de confiance (valeurs FR) ; mesure géographique typique du forçage (échelle spatiale) ; et niveau de compréhension scientifique (LOSU).

La part prise par les GES dans le forçage radiatif global dépend des propriétés radiatives des molécules qui les composent et de l'augmentation de leur concentration. L'impact sur le réchauffement dépend aussi de leur durée de vie dans l'atmosphère.

Pour comparer l'impact potentiel de différents GES sur le réchauffement climatique, une métrique spécifique a été définie : le Potentiel de Réchauffement Global (PRG ou GWP pour *Global Warming Potential*). Le PRG est le rapport, pendant une période temporelle fixée T, entre le forçage radiatif induit par l'introduction dans l'atmosphère au début de la période d'une quantité donnée d'un GES à t=0 et le forçage radiatif induit par l'émission au même instant de la même quantité d'un GES de référence. Le GES de référence est souvent le CO_2. Le PRG est un indice construit à partir de l'intégration dans le temps du forçage radiatif d'une source ponctuelle d'un GES.

La notion de durée de séjour dans l'atmosphère du CO_2 est complexe. De nombreux articles font référence à une durée de séjour dans l'atmosphère égale à 100 ans. Cette information étant attribuée au troisième rapport du GIEC publié en 2001. En pratique, ni en 2001, ni en 2007 (publication de son 4ème rapport), le GIEC n'indique que la durée de vie atmosphérique du CO_2 est de 100 ans. Il s'agit d'une convention. Sous cette hypothèse peuvent être établies des comparaisons entre les PRG de différents GES.

Gaz	**Formule**	**PRG relatif / CO_2 (à 100 ans)**
Gaz carbonique	CO_2	1
Méthane	CH_4	25
Protoxyde d'azote	N_2O	298
Hydrofluorocarbures (HFC)	$C_nH_mF_p$	124 à 14 800
Perfluorocarbures (PFC)	C_nF2_{n+2}	7 390 à 12 200
Trifluorue d'azote	NF_3	17 200
Hexafluorure de soufre	SF_6	22 800

Tableau 2-Pouvoir radiatif global des principaux GES (GIEC - Résumé Technique - Groupe de Travail 1, 2007)

Le CO_2 présent dans l'atmosphère est le résultat d'un équilibre entre plusieurs réservoirs de CO_2, comme les océans profonds et superficiels (moins de 100m de profondeur) rassemblés sous le vocable hydrosphère, la biosphère, la lithosphère et l'atmosphère elle-même. Les échanges (ou « recyclage ») de CO_2 entre ces différents réservoirs se déroulent sur des échelles de temps très variées : de quelques décennies à l'interface entre l'atmosphère et la biosphère (photosynthèse des végétaux), plusieurs siècles dans l'hydrosphère superficielle,

jusqu'à plusieurs millions d'années dans la lithosphère (formation des roches sédimentaires ou des hydrocarbures).

La durée de 100 ans est conventionnelle et permet les comparaisons avec les autres gaz.

1.3. Les contributions spécifiques de l'aviation à l'effet de serre

Parmi les GES cités précédemment, les moteurs d'avions émettent principalement du CO_2[6] et de la vapeur d'eau. Mais d'autres gaz, bien que n'étant pas à effet de serre, sont également émis et interviennent de manière indirecte sur le changement climatique.

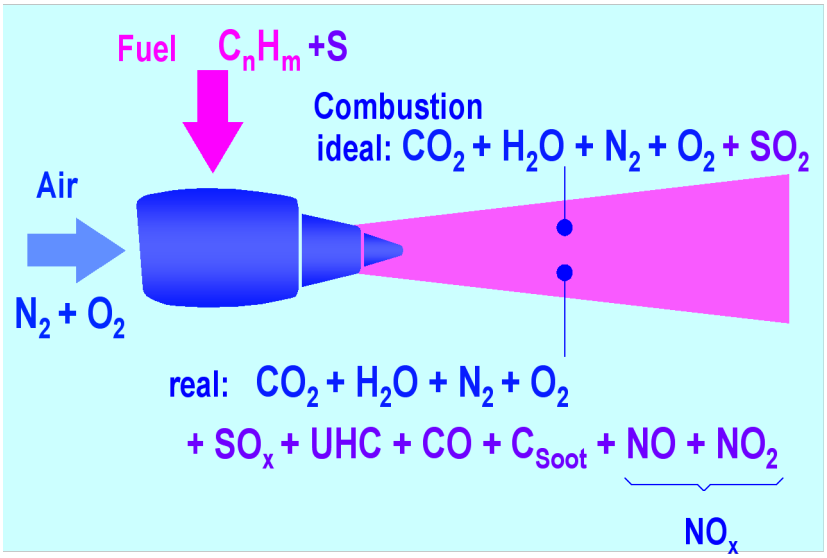


Figure 4-Schéma de combustion d'un carburant au sein d'un moteur d'avion. (SNECMA, 2005).

- CO_2 et H_2O sont des produits de combustion : il y a quasi-proportionnalité entre la consommation et la production de CO_2 et H_2O (aux imbrûlés près),
- CO et UHC sont des polluants qui résultent d'une combustion incomplète à bas régime (imbrûlés).
- Les NO*x* résultent de la réaction directe entre N_2 et O_2. Cette réaction est favorisée par la température et la pression,
- Les particules ou fumées sont des particules solides de quelques dizaines de nanomètres composées en majorité de carbone. Elles se forment, à haute température / haute pression dans les zones riches du foyer,
- Les SO*x* sont des polluants qui résultent de la présence de soufre dans le carburant.

1.3.1. Les NO*x*

Les oxydes d'azote (NO*x*), participent à des réactions chimiques qui ont pour effet de créer de l'ozone (O_3) s'ils sont émis dans la haute troposphère ou la basse stratosphère. Ce qui

[6] La combustion d'1 kg de kérosène provoque 3,15 kg d'émission de CO_2

correspond effectivement aux altitudes de croisières des aéronefs. Les oxydes d'azote ont aussi pour effet de détruire le méthane (CH_4).

Les effets de ces deux gaz sont opposés du point de vue du réchauffement climatique. La destruction du méthane, qui est un GES, induit un forçage radiatif négatif. Alors qu'au contraire la création d'ozone troposphérique contribuerait en moyenne au réchauffement, mais ce phénomène est très difficilement quantifiable dans la mesure où la concentration en ozone présente une très grande variabilité naturelle dans ces régions de l'atmosphère. Le bilan radiatif de ces effets antagonistes n'est pas connu avec certitude, même si des travaux récents confirment la prépondérance de la création d'ozone sur la destruction du méthane (Sausen - DLR - Aviation Radiative Forcing in 2000 , 2005).

1.3.2. Les trainées de condensation et les particules

Les oxydes de soufre SO*x* sont partiellement absorbées par les particules et les rendent hydrophiles, ce qui contribue à la formation de traînées de condensation, également appelées cotras (ou « *contrails* » en anglais), pouvant augmenter la nébulosité en cirrus. Ces nuages fins et translucides, situés à environ 5 kilomètres d'altitude, absorbent et diffusent les infrarouges, ce qui contribue à réchauffer encore davantage l'atmosphère.

Bien qu'actuellement les études relatives à ces phénomènes complexes ne permettent pas d'évaluer précisément l'impact sur le climat des NO*x* et des SO*x* émis par l'aviation, le GIEC constate une augmentation de l'effet de serre dans les zones de trafic dense.

Une difficulté consiste à rattacher ce phénomène à la métrique utilisée pour les GES. Les cotras sont très localisés. La dégénérescence des cotras en cirrus est un phénomène complexe, qui dépend de nombreux paramètres atmosphériques.

La métrique proposée par le GIEC permet des comparaisons aisées et facilite la mise en place d'instruments destinés à limiter les émissions (marchés de permis, taxes) de GES. Il est néanmoins fondamental d'en connaître les limites. L'évaluation du PRG repose en particulier sur une opération consistant à cumuler sur un temps T[7] le forçage radiatif d'une quantité donnée d'un gaz émis à l'instant t. Elle ne tient pas compte de la permanence de la source. Autrement dit, un forçage attribué à un GES avec une durée de vie courte, pourrait avoir un PRG à 100 ans relativement faible. Mais si le phénomène considéré se renouvelle sans cesse,

[7] Le GIEC prend en général des valeurs de T égales à 20 ans, 100 ans et 500 ans. Le PRG le plus souvent évoqué est le PRG à 100 ans.

l'effet réel sur le réchauffement peut ne plus être marginal. C'est pourquoi les cotras, sur certaines routes aériennes très fréquentées contribuent localement directement au réchauffement (GIEC - Rapport spécial aviation et atmosphère planétaire, 1999). La seule différence réside dans la vitesse avec laquelle une mesure de réduction du phénomène se traduit par une réduction du forçage. Par exemple, si les émissions anthropiques de CO_2 dans l'atmosphère cessaient aujourd'hui, ce qui a été émis jusque-là continuerait d'influencer le climat pendant environ un siècle. A contrario, en arrêtant la production de trainées dans l'atmosphère, le forçage radiatif induit ne durerait au plus que quelques jours.

Selon Daniel Cariolle, du CERFACS, qui étudie les phénomènes de dégénérescence des trainées en cirrus, ce phénomène dépend de très nombreux facteurs, dont l'altitude, l'hygrométrie, la température atmosphérique, le type de carburant et le rendement des moteurs (température des gaz d'échappement) de sorte qu'il n'est pas possible d'établir un lien « mécanique » entre les trainées de condensation à durée de vie courte, les cirrus « artificiels » qui pourraient en découler et le réchauffement climatique qui pourrait y être lié.

Les travaux menés actuellement ne permettent pas de distinguer lorsque une trainée de condensation dégénère en cirrus, si, compte tenu des conditions atmosphériques rencontrées et de la seule présence de noyaux glaçogènes dans cette région de l'atmosphère à ce moment là, un cirrus ne se serait pas formé sans la perturbation engendrée par le passage d'un aéronef.

Les aérosols présents dans l'atmosphère sont, en effet, des précurseurs des formations nébuleuses.

A ce titre, les particules, ou suies émises par l'aviation, qui sont le résultat de la combustion du kérosène peuvent contribuer à l'augmentation de la nébulosité, et donc contribuer au forçage radiatif, tout particulièrement la nuit. Ces particules de carbone-suie se recouvrent d'acide sulfurique, qui est également présent dans le sillage de l'avion (le kérosène aéronautique est un carburant à forte teneur en soufre) et deviennent des noyaux glaçogènes pouvant favoriser l'apparition de cirrus longtemps après le passage de l'avion.

La connaissance de l'impact sur le réchauffement climatique des trainées de condensation et cirrus induits par l'aviation ne fait pas l'objet du même niveau de compréhension scientifique que celui d'autres GES (GIEC - Résumé Technique - Groupe de Travail 1, 2007), en particulier parce que les effets des cirrus sont localisés et dépendent très directement des conditions atmosphériques rencontrées. Le pouvoir radiatif et le temps de présence dans

l'atmosphère des cotras dépendent de leur localisation, de leur géométrie et des caractéristiques de l'atmosphère ambiant. C'est ce qui explique la très grande variabilité des valeurs de forçage radiatif que l'on peut associer aux cotras et qu'il est très difficile d'y associer un indice comme le PRG.

1.4. Etat des lieux

1.4.1. Les émissions de GES dans le monde

Par type de gaz :

Depuis 1996, les pays signataires de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC ou UNFCCC en anglais) visés à l'Annexe I sont tenus d'établir un inventaire de leurs émissions de 6 gaz à effet de serre inventoriés par l'annexe A du Protocole de Kyoto.

D'après le 4ème rapport du 1er groupe de travail du GIEC publié en 2007, les émissions de ces 6 gaz ont augmenté de 70% depuis 1970 et de 24% depuis 1990 pour atteindre 49 Gt $CO_{2éq}$[8] en 2004. Les émissions de CO_2, qui représentent en masse plus des trois-quarts des émissions mondiales de GES ont augmenté de 80% depuis 1970 et de 28% depuis 1990.

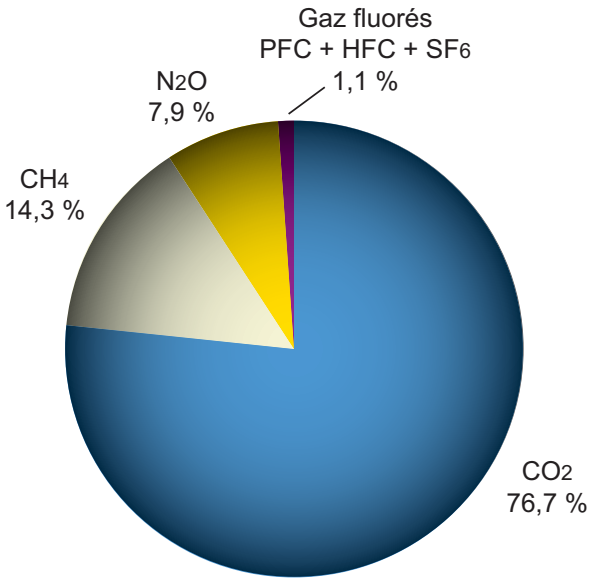


Figure 5-Répartition par GES en 2004 (GIEC - Rapport du groupe de travail I, 2007)

Par secteur :

[8] $CO_{2éq}$ = concentration de CO2 qui entrainerait un forçage radiatif de même importance qu'un mélange donné de dioxyde de carbone et d'autres GES Glossaire GIEC – Troisième Rapport Annexe B. (2001).

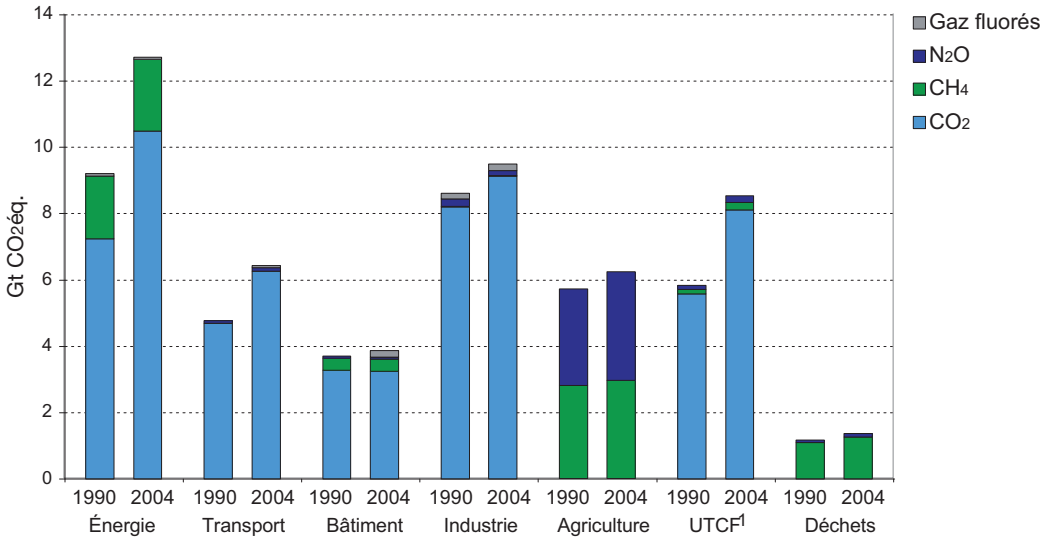


Figure 6-Evolution des émissions globales de GES par secteur entre 1990 et 2004 (GIEC - Rapport du groupe de travail I, 2007)

Depuis 1990 on observe que la hausse la plus importante est imputable à UTCF[9] (+48%), suivie de l'énergie (+37%) et des transports (+32%). Sur la même période, l'agriculture et l'industrie voient leurs émissions augmenter de 9%. Le secteur du bâtiment et celui des déchets présentent une relative stabilité de leurs émissions (+3%).

Répartition régionale des émissions de GES :

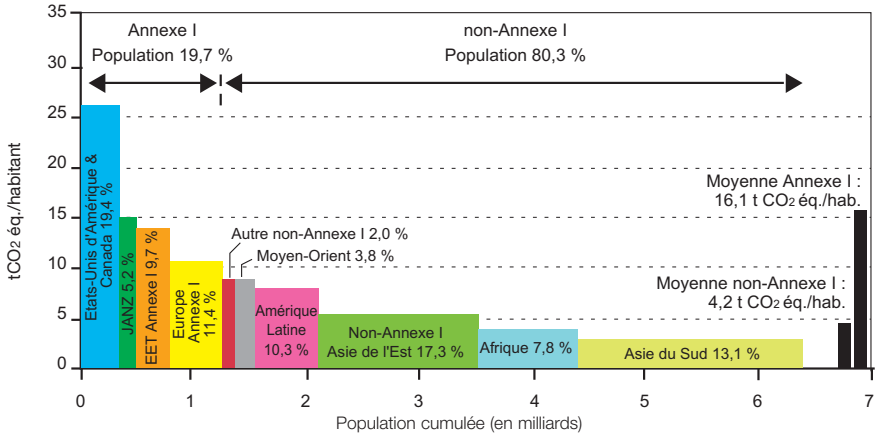


Figure 7-Répartition régionale des émissions de GES par habitant[10] (GIEC - Changements Climatiques - Rapport de synthèse, 2007)

En 2004, les pays de l'Annexe I[11] de la CCNUCC représentaient 20% de la population mondiale, 57 % du PIB mondial et émettaient 46 % de l'ensemble des GES. Dans les pays de

[9] UTCF : l'utilisation et changement d'affectation des terres et des forêts
[10] Le pourcentage indiqué correspond à la part des régions dans les émissions globales de GES.
EET : Économies en transition, JANZ : Japon, Australie, Nouvelle-Zélande.
[11] Ce sont les pays développés et les pays de l'Europe de l'Est.

l'Annexe I, la moyenne des émissions des GES par habitant était de 16,1 $tCO_{2éq}$, soit environ quatre fois celle des pays non-Annexe I.

1.4.2. Contribution du transport aérien aux émissions mondiales et perspectives

Situation actuelle :

Le transport aérien contribue, en 2004, pour environ 2% des émissions mondiales de CO_2 (GIEC - Résumé technique - Groupe de travail III, 2007). Il compte pour 13% des émissions liées au secteur des transports.

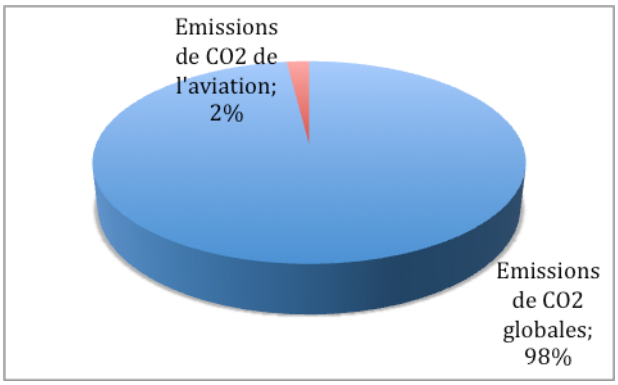


Figure 8-Part des émissions de CO_2 de l'aviation dans le total des émissions globales (GIEC - Résumé technique - Groupe de travail III, 2007)

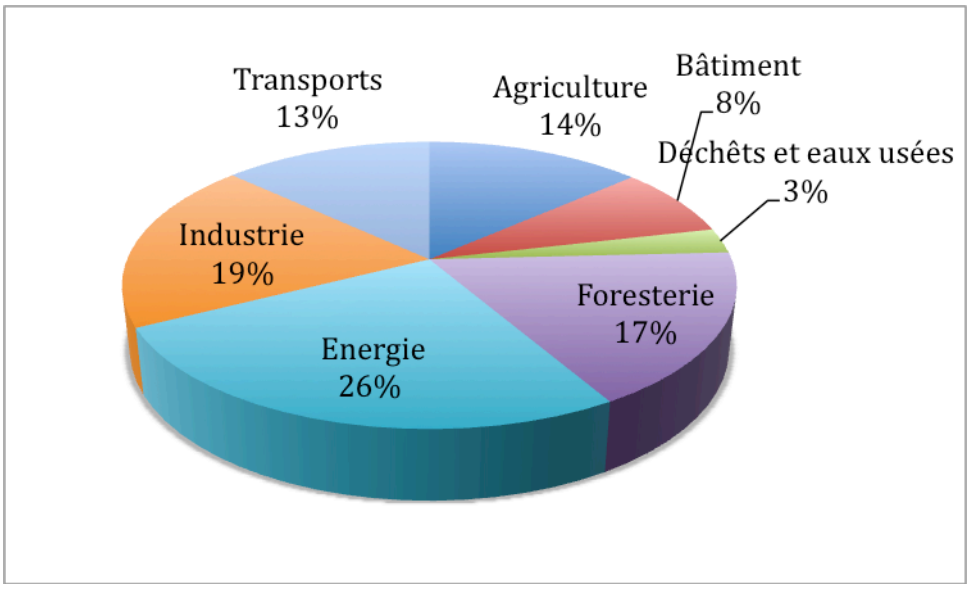


Figure 9-Emissions globales de $CO_{2éq}$ par secteurs en 2004 (GIEC - Résumé technique - Groupe de travail III, 2007)

Projections à long terme :

Sous l'effet de la croissance du trafic et malgré l'amélioration de l'efficacité énergétique du secteur, les estimations actuelles tablent sur une progression des émissions de l'ordre de 2% à 3% par an en tendance sur les moyen et long termes.

Ainsi, comme le pointait le rapport Giblin en 2005, même si les prévisions de croissance des émissions sont inférieures aux prévisions de croissance du trafic et sans action particulière, les émissions du secteur pourraient tripler sur la période 1990 – 2050.

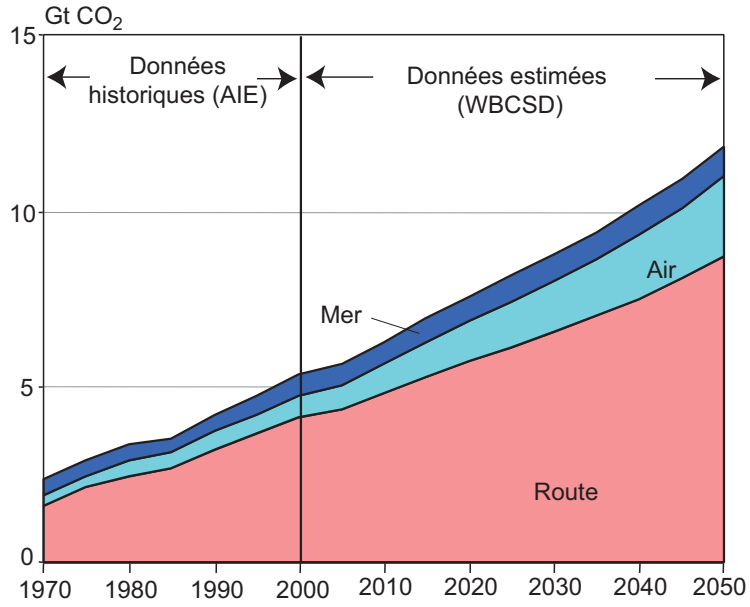


Figure 10-Emissions de CO_2 des transports historiques et estimées de 1970 à 2050 (GIEC - Résumé technique - Groupe de travail III, 2007)

S'agissant du trafic, si un net ralentissement a, en effet, été observé sur la période 2000 – 2004, de même que la crise qui frappe l'économie mondiale depuis le second semestre 2008 engendre une baisse du trafic aérien à court terme (Eurocontrol - Short Term Forecast, 2009), la croissance à long terme répond à une tendance lourde : hors conjoncture particulière, les prévisions de croissance du trafic aérien sont de l'ordre de 5% par an en moyenne (OACI - Circular 313, 2007). Cela concerne aussi bien le transport de passagers que le fret.

Scheduled services	Actual 1985	Actual 2005	Forecast 2025	Average annual growth rate (per cent) 1985–2005	2005–2025
TOTAL					
Passenger-kilometres (billions)	1 366	3 720	9 180	5.1	4.6
Freight tonne-kilometres (millions)	39 813	142 579	510 000	6.6	6.6
Passengers carried (millions)	896	2 022	4 500	4.2	4.1
Freight tonnes carried (thousands)	13 742	37 660	110 000	5.2	5.5
Aircraft-kilometres (millions)[1]	n.a.	30 845	69 040	n.a.	4.1
Aircraft departures (thousands)[1]	n.a.	24 904	50 450	n.a.	3.6
INTERNATIONAL					
Passenger-kilometres (billions)	589	2 197	6 225	6.8	5.3
Freight tonne-kilometres (millions)	29 384	118 482	452 120	7.2	6.9
Passengers carried (millions)	194	704	1 950	6.7	5.2
Freight tonnes carried (thousands)	5 884	22 630	80 000	7.0	6.5

[1]. Data on operations of airlines registered in the former USSR not available for 1985.
Source: ICAO

Tableau 3-Prévisions de trafic de l'OACI pour la période 1985-2025 (OACI - Rapport environnemental, 2007)

Parallèlement, le secteur voit son efficacité énergétique s'améliorer. C'est ainsi que de 1990 à 2004, les émissions de CO_2 du transport aérien international ont progressé (+36%) trois fois moins rapidement que le trafic lui-même (+128% exprimé en TKT, Tonne Kilomètre Transportée), comme le mentionne la DGAC dans sa note thématique du mois de mai 2008, sur la base de chiffres émanant de l'IEA et de l'OACI.

Ces gains d'efficacité énergétique sont ainsi estimés à 2% à 3% par an.

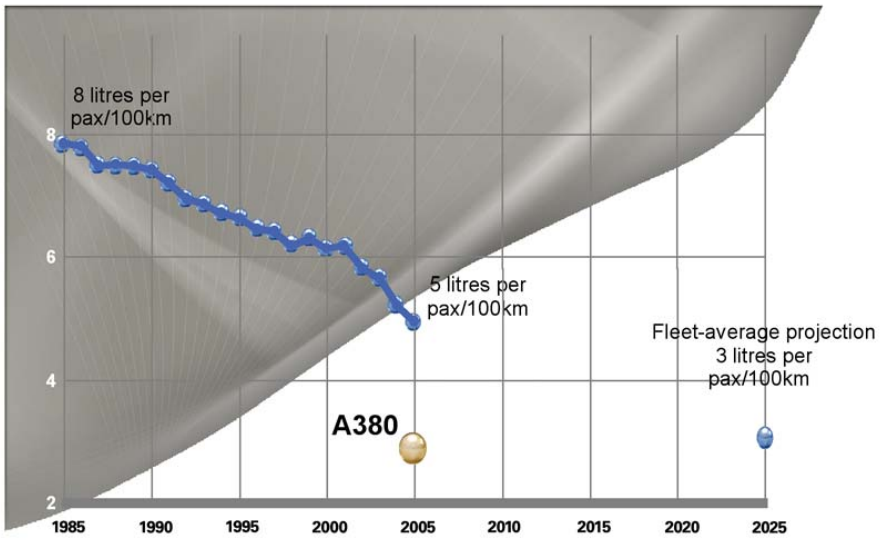


Figure 11-Evolution de la consommation moyenne au 100km par passager (Airbus - Document commercial, 2008)

1.4.3. Contribution du transport aérien européen

Les vols domestiques

La part des émissions de CO_2 attribuées en 2006 au transport aérien en Europe s'élève à 3% du total des émissions de GES imputables aux transports (EEA - Annual European Community GHG Report, 2008).

Selon l'AEE (Agence Européenne pour l'Environnement) chargée notamment d'établir l'inventaire annuel des émissions de GES des états membres, les émissions du trafic aérien européen ont crû de 56% entre 1990 et 2006.

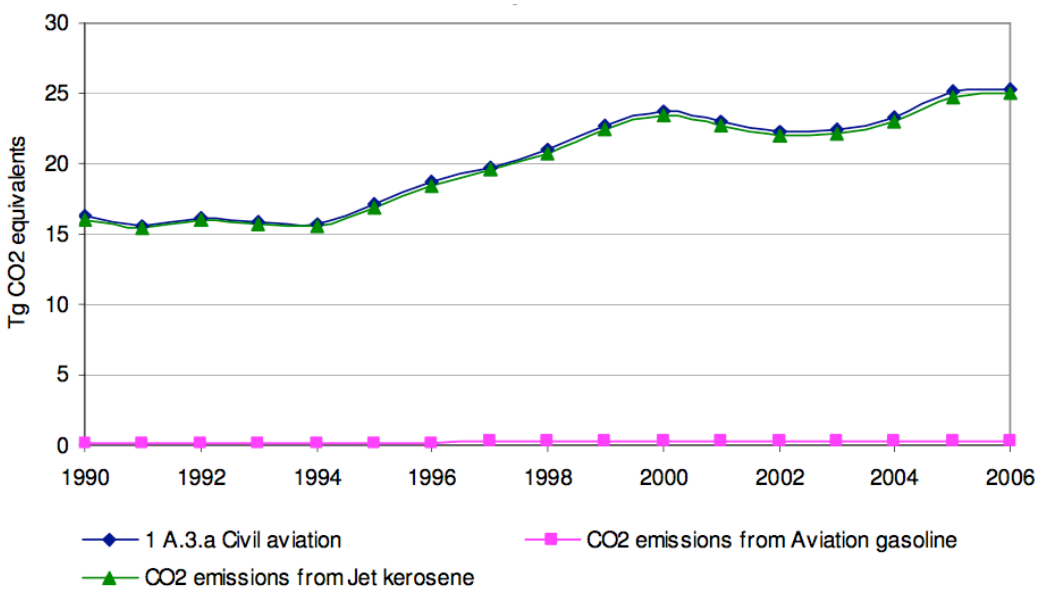


Figure 12-Evolution des émissions de CO_2 de l'aviation dans l'UE 15 (EEA - Annual European Community GHG Report, 2008)

Les pays qui contribuent le plus aux émissions européennes attribuées à l'aviation sont l'Allemagne, l'Espagne, la France et le Royaume-Uni (88% du total).

Sur la période 1990 – 2006, l'évolution des émissions par Etat membre est très contrastée.

Member State	CO_2 emissions in Gg			Share in EU15 emissions in 2006	Change 2005-2006		Change 1990-2006		Method applied	Activity data	Emission factor
	1990	2005	2006		(Gg CO_2 equivalents)	(%)	(Gg CO_2 equivalents)	(%)			
Austria	24	209	218	0.9%	10	5%	194	803%	T1	0.0	D
Belgium	5	0	0	-	-	-	-5	-100%	CS	RS	C
Denmark	234	126	134	0.5%	8	6%	-100	-43%	C	NS	C
Finland	377	326	321	1.3%	-5	-1%	-56	-15%	T2b	NS	CS
France	4,241	4,952	4,691	18.7%	-261	-5%	450	11%	M	NS	M
Germany	2,869	5,072	5,290	21.1%	218	4%	2,421	84%	T1	NS	CS
Greece	578	1,194	1,065	4.3%	-129	-11%	487	84%	T2	NS	D
Ireland	59	108	113	0.5%	6	5%	54	92%	T2	NS	CS
Italy	1,563	2,608	2,722	10.9%	114	4%	1,159	74%	T1, T2a	NS	CS
Luxembourg	NO	NO	NO	0.0%	-	-	-	-	NA	NO	NA
Netherlands	16	16	16	0.1%	0	0%	0	0%	T2	NS	CS
Portugal	164	412	432	1.7%	20	5%	268	164%	T2	NS,AS	D
Spain	4,130	6,854	7,204	28.8%	350	5%	3,074	74%	T2	NS	D
Sweden	668	660	621	2.5%	-39	-6%	-47	-7%	T1	NS	CS
United Kingdom	1,128	2,240	2,192	8.8%	-48	-2%	1,064	94%	T3	NS,AS	CS
EU-15	**16,056**	**24,778**	**25,020**	100.0%	242	1%	8,964	56%			

Tableau 4-Evolution des émissions de CO_2 de l'aviation par Etat membre de l'UE 15 (EEA - Annual European Community GHG Report, 2008)

Les vols internationaux

L'AEE réalise un inventaire des émissions liées aux soutes internationales des secteurs de l'aviation et du transport maritime. Dans ce cadre, entre 1990 et 2006, l'AEE relève une augmentation des émissions imputables aux soutes internationales de 76%. 45% de ces émissions sont imputables au secteur aérien.

Les émissions de CO_2 des soutes internationales de l'aviation représentent en 2006, 3% du total des émissions de l'UE-15, mais ne sont pas comptabilisées dans l'inventaire annuel. Entre 1990 et 2006, les émissions de CO_2 de l'aviation internationale de l'Europe à 15 ont augmenté de 102%.

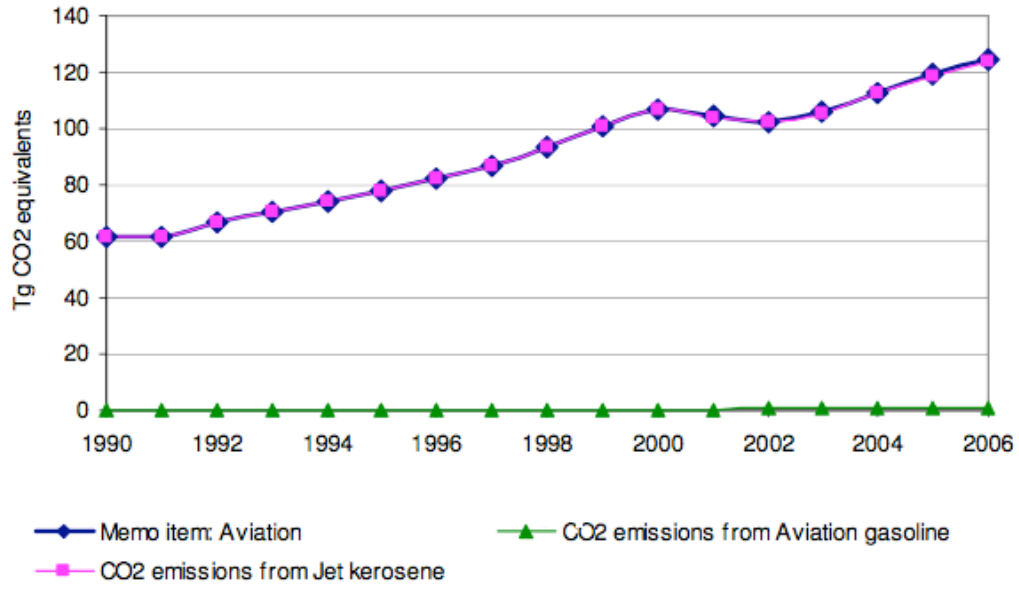


Figure 13-Evolution des émissions de CO_2 des soutes internationale de l'UE 15 (EEA - Annual European Community GHG Report, 2008)

L'Allemagne, la France, les Pays-Bas et le Royaume-Uni sont les pays membres qui contribuent le plus aux émissions imputées aux soutes internationales. L'AEE note toutefois que, sur la période étudiée, tous les Etats de l'UE ont vu croître leurs émissions imputables aux soutes internationales.

Member State	CO2 emissions in Gg			Share in EU15 emissions in 2006	Change 1990-2006		Change 2005-2006	
	1990	2005	2006		(Gg CO_2 equivalents)	(%)	(Gg CO_2 equivalents)	(%)
Austria	886	1,731	1,810	1.5%	924	104%	79	4%
Belgium	3,096	3,538	3,701	3.0%	606	20%	163	4%
Denmark	1,736	2,575	2,583	2.1%	847	49%	8	0%
Finland	1,008	1,290	1,435	1.2%	427	42%	144	10%
France	8,549	15,532	16,419	13.2%	7,871	92%	887	5%
Germany	11,474	20,286	21,159	17.0%	9,685	84%	873	4%
Greece	2,448	2,387	2,863	2.3%	415	17%	476	17%
Ireland	1,061	2,458	2,843	2.3%	1,782	168%	385	14%
Italy	4,116	8,543	9,224	7.4%	5,107	124%	680	7%
Luxembourg	400	1,326	1,241	1.0%	841	210%	-85	-7%
Netherlands	4,540	10,876	10,975	8.8%	6,434	142%	99	1%
Portugal	1,486	2,159	2,262	1.8%	776	52%	103	5%
Spain	3,432	9,519	10,012	8.1%	6,581	192%	493	5%
Sweden	1,335	1,936	2,006	1.6%	671	50%	71	4%
United	15,737	35,070	35,602	28.7%	19,865	126%	532	1%
EU-15	**61,303**	**119,226**	**124,135**	**100.0%**	**62,832**	**102%**	**4,909**	**4%**

Tableau 5-Evolution des émissions de CO_2 des soutes internationales de l'aviation par Etat membre de l'UE 15 (EEA - Annual European Community GHG Report, 2008)

1.4.4. Les émissions de CO_2 du transport aérien de la France

Les émissions du transport aérien français en 2006 sont estimées par le CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique) à 3,6 Mt CO_2. Ces émissions correspondent au trafic intérieur. Elles sont en augmentation de 6% par rapport aux émissions de 1990 (CITEPA / CORALIE / format SECTEN / màj fev 2008, 2008).

D'après l'inventaire de l'AEE, les émissions attribuables à la France dans l'inventaire de l'UE sont de 4,6 Mt CO_2.

Les chiffres figurant sur le site de la DGAC diffèrent légèrement, puisque le total des émissions attribuées au secteur aérien français, s'élève à 4,8 Gt CO_2 en 2006 (DGAC - Aviation et CO_2 : les chiffres clés, 2009).

Ces écarts s'expliquent par des méthodologies de décompte différentes. L'inventaire de l'AEE retient les vols intérieurs à la métropole et les vols entre les DOM/TOM et la

métropole. L'inventaire de la DGAC comptabilise, en plus, les vols entre DOM/TOM (0,2 Mt CO_2). L'inventaire du CITEPA est conforme à la méthodologie préconisée par la CCNUCC, et n'intègre que pour moitié les vols entre la métropole et les DOM/TOM.

Selon la DGAC, le secteur des transports est, en 2006, à l'origine de 26,4% des émissions de gaz à effet de serre de la France (DGAC - Aviation et CO2 : les chiffres clés, 2009).

Les émissions totales de CO_2 du transport aérien de France s'élèvent à 21,6 Mt. Le transport aérien intérieur émet 4,8 Mt de CO_2 dont une part importante (49%) est liée à la desserte de l'Outre-mer. Il représente 0,9% des émissions totales de la France et 3,4% du secteur des transports. En incluant le trafic international, la part du transport aérien atteint 3,8% des émissions de gaz à effet de serre.

Le trafic international comprend le vol entre Etats membres de l'UE, y compris dans les décomptes réalisés dans les inventaires européens. Les vols relevant des soutes internationales comprennent donc de manière indifférenciée les vols entre Etats membres et les vols vers ou en provenance de pays hors UE.

Les inventaires du CITEPA montrent un recul des émissions intérieures depuis 2001. Cette baisse s'explique notamment par le développement des lignes ferroviaires à grande vitesse sur les liaisons radiales au détriment des liaisons aériennes (mise en service du TGV Méditerranée en juin 2001).

Le CITEPA prévoit une stagnation du trafic intérieur pour les prochaines années, qui sous l'effet de l'amélioration de l'efficacité énergétique, devrait permettre aux émissions imputables au transport aérien intérieur de retrouver leur niveau de 1990.

Millions de tonnes	1990	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Transport aérien intérieur	4,5	6,2	5,7	5,5	5,0	5,0	4,9	4,8
Transport aérien international	8,6	14,3	14,6	14,6	14,7	15,8	16,0	16,8
Total aérien	13,2	20,5	20,3	20,1	19,8	20,8	20,9	21,6

Tableau 6-Émissions de CO_2 du transport aérien de la France (CITEPA / CORALIE / format SECTEN / màj fev 2008, 2008)

Le développement du trafic aérien s'est effectivement accompagné d'une amélioration continue de l'efficacité énergétique : ainsi depuis 1990, la progression des émissions (+64%) a été deux fois plus faible que celle du trafic (+123%).

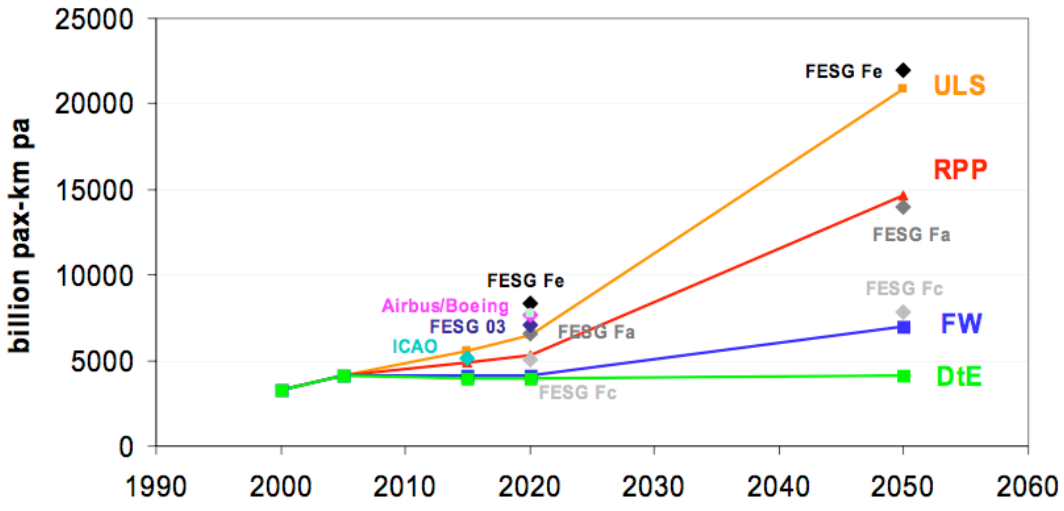
Croissance 1990-2006	Émissions de CO_2	Trafic aérien
Transport aérien intérieur	+ 11 %	+50 %
Transport aérien international	+ 89 %	+167 %
Total aérien	+ 64 %	+123 %

Tableau 7-Croissance des émissions et du trafic aérien commercial de la France entre 1990 et 2006 (CITEPA / CORALIE / format SECTEN / màj fev 2008, 2008) (DGAC - Aviation et CO2 : les chiffres clés, 2009)

1.5. Perspectives d'évolution au niveau mondial

Les principaux déterminants de la demande de trafic aérien sont la croissance du PIB et la croissance de la population, alors que, du fait d'une élasticité prix négative, l'augmentation du prix de l'énergie limite la demande de transport aérien (CONSAVE 2050 - European Commission, 2005). Plusieurs modèles de prévisions de trafic à moyen et long termes se basent sur ces facteurs clés de la demande de transport aérien.

Selon l'OACI, le trafic aérien mondial de passagers devrait ainsi progresser en moyenne de 4,6 % par an d'ici à 2025 (OACI - Perspectives du transport aérien d'ici à l'an 2025, 2007), ce qui conduit à une multiplication par deux du trafic à cet horizon et par un facteur compris entre trois et quatre à l'horizon 2050. Ce taux est à peine plus élevé que celui retenu dans l'hypothèse médiane[12] (scénario « Regulatory Push and Pull ») de l'étude CONSAVE 2050, qui conduit à une augmentation de 70% du trafic entre 2000 et 2020. Les scénarios extrêmes[13] retenus dans l'étude CONSAVE 2050 oscillent, pour cette période entre une augmentation de 20% (scénario « Down to Earth ») et 100% (scénario « Unlimited Skies »)[14].



[12] Le scénario RPP, Régulatory Pusch & Pull constitue le scénario médian. Il est bâti sur l'hypothèse d'actions volontaristes des régulateurs pour limiter l'impact de l'aviation sur l'environnement.
[13] Il se situe, entre le scénario « laisser faire » dénommé "Unlimited Skies" (ULS) et le scénario "Down to Earth" (DtE), caractérisé par une prise de conscience globale dans la société, qui limiterait drastiquement l'impact des activités polluantes.
[14] A ces trois scénarios, s'ajoute un quatrième : « Fractured World » - FW. Il se caractérise par l'émergence d'une logique de blocs, et beaucoup moins d'échanges au plan international.

Figure 14-Comparaison de différents scénarios de croissance de demande de transport aérien de passagers (CONSAVE 2050 - European Commission, 2005)

Quel que soit le scénario retenu, ce sont les compagnies des régions Moyen-Orient et Asie-Pacifique qui devraient connaître la plus forte croissance, comme le montre la figure ci-dessous.

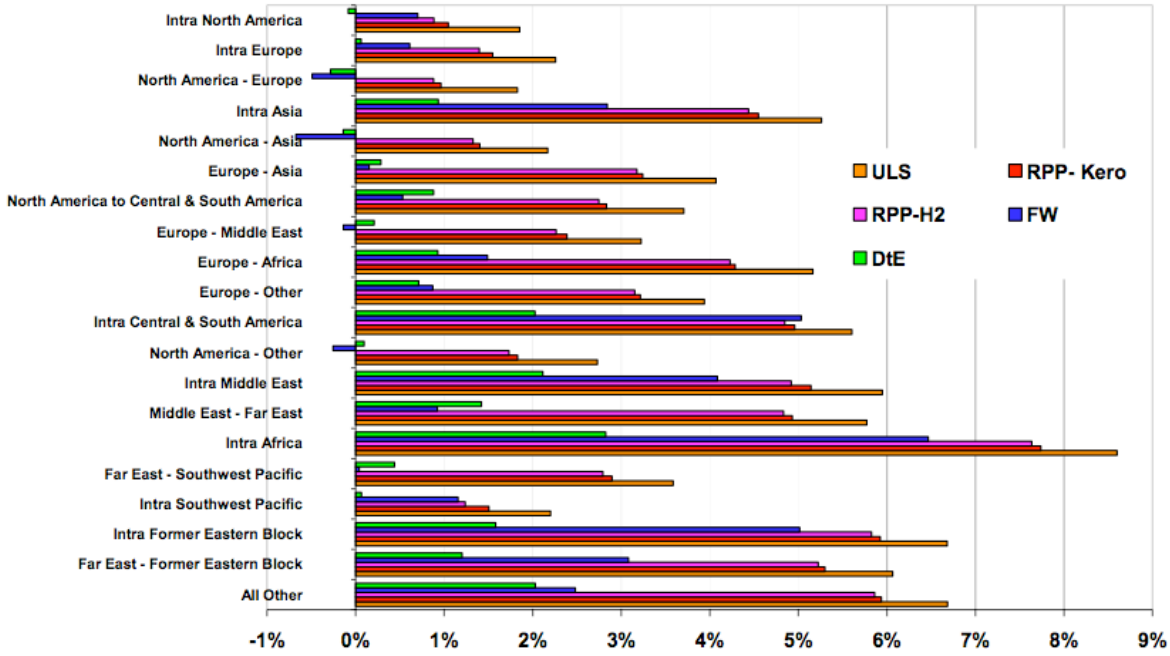


Figure 15-Croissance annuelle des principaux flux de trafic par couple provenance/destination entre 2000 et 2050 (CONSAVE 2050 - European Commission, 2005)

En Europe, Eurocontrol prévoit, selon différents scénarios à long terme, une croissance comprise entre 70% et 120% entre 2007 et 2030, avec de grandes disparités entre les pays membres.

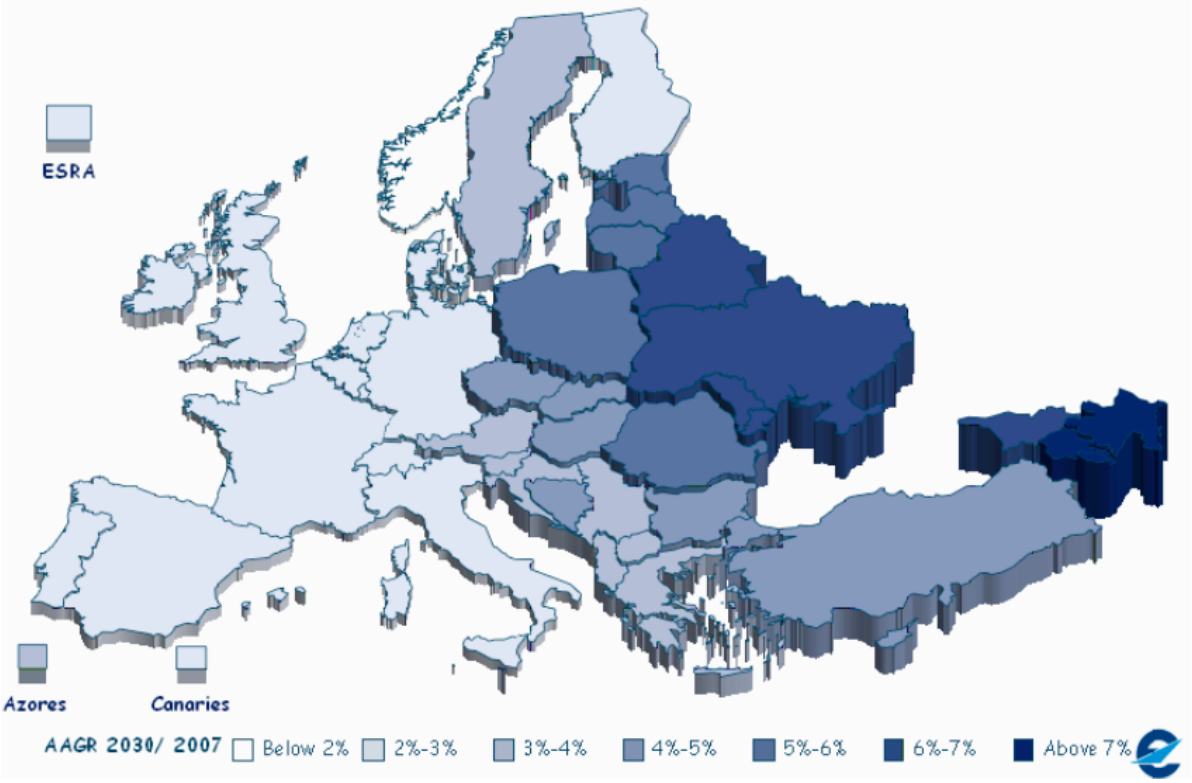


Figure 16-Prévisions de croissance moyenne annuelle sur la période 2007-2030 (Eurocontrol - Long Term Forecast Flight Movements 2008-2030, 2008)

Les prévisions de baisse du trafic à court terme ne remettent pas en cause ces prévisions à moyen ou long terme (Eurocontrol Medium Term Forecast Flight Movements 2009–2015, 2009).

Au regard de ces prévisions, il faut donc s'attendre à un doublement du trafic européen à l'horizon 2030 – 2050.

Cet accroissement programmé du trafic conduit à prévoir une augmentation significative des émissions de l'aviation, que les progrès technologiques attendus ne pourront compenser totalement. Dans le scénario médian de l'étude CONSAVE 205, il est prévu une augmentation des émissions de CO_2 comprise entre 2 et 4 % par an entre 2000 et 2050, soit une multiplication des émissions par 3 en 50 ans.

1.6. Le transport aérien dans les accords internationaux de réduction des GES

1.6.1. Le transport aérien de Kyoto à Copenhague

Le Protocole de Kyoto a été signé en 1997. Pour qu'il entre en vigueur il fallait que les pays l'ayant ratifié représentent plus de 55% des émissions globales de CO_2. Ce seuil a été atteint après que la Russie l'a ratifié fin 2004. Il est effectivement entré en vigueur en février 2005

Son objectif est de réduire d'ici à 2012 de 5,2% les émissions de GES au plan mondial par rapport à leur niveau de 1990.

L'un des principes du Protocole est d'établir une différenciation des efforts à réaliser selon le développement des pays signataires. Au titre du Protocole de Kyoto, seuls les pays dits « de l'annexe I » sont tenus de réduire leurs émissions. Ce sont les pays développés et les pays de l'Europe de l'Est[15]. Les pays en voie de développement sont exonérés des objectifs de réduction de GES.

Le Protocole de Kyoto vise à introduire des droits de propriété échangeables d'émissions de GES (et le marché d'échange afférent) pour que les acteurs responsables de ces émissions intègrent dans leurs comportements économiques leurs effets sur l'environnement. Ils ont ainsi la possibilité de poursuivre leurs activités sans changer leur comportement mais en devant acquérir les droits d'émissions complémentaires, ou de modifier leur comportement de manière à pouvoir vendre sur le marché les droits d'émissions non utilisés.

Aux termes du Protocole de Kyoto, les Etats n'inventorient que les émissions de leurs vols intérieurs. Les émissions des vols internationaux sont exclues des engagements chiffrés des Etats. Elles font l'objet d'un objectif général de limitation ou de réduction à l'article 2.2 du Protocole : « *Les Parties visées à l'Annexe I cherchent à limiter ou réduire les émissions de gaz à effet de serre non réglementées par le Protocole de Montréal provenant des combustibles de soute utilisés dans les transports aériens et maritimes, en passant par l'intermédiaire de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale et de l'Organisation Maritime Internationale respectivement* ».

Le traitement des émissions des soutes internationales de l'aviation civile (et du secteur maritime) ne répond donc à aucun objectif contraignant ou chiffré et le Protocole laisse explicitement cette question à la charge de l'OACI.

Si des axes de progrès ont été recensés et encouragés par l'OACI (ICAO - Voluntary Activities against global warming in aviation sector, 2009), à ce jour, l'organisation n'est pas parvenue à élaborer un consensus autour de la mise en œuvre de mesures de limitation des émissions de GES de l'aviation internationale. Cette absence d'engagement concret de la part

[15] Pays de l'Annexe I : Allemagne, Australie, Autriche, Belgique, Bulgarie, Canada, Danemark, Espagne, Estonie, États- Unis, Fédération Russe, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Japon, Lettonie, Lichtenstein, Lituanie, Luxembourg, Monaco, Norvège, Nouvelle Zélande, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Suède, Suisse

du secteur aérien sera certainement examinée lors des négociations de Copenhague qui se tiendront en décembre 2009 et qui doivent aboutir à un nouveau cadre pour succéder au Protocole de Kyoto qui arrivera à échéance en 2012.

L'absence de cadre international partagé pour le traitement des émissions de GES de l'aviation internationale fait craindre une multiplication de mesures plus ou moins contraignantes et plus ou moins localisées. Outre les difficultés de gestion que cela générerait pour les opérateurs du transport aérien, cela pourrait même se révéler contre-productif en termes d'émissions si des stratégies de contournement des zones réglementées se multipliaient. Cela conduirait, en effet, à un allongement de certaines routes.

1.6.2. La politique européenne vis-à-vis du transport aérien

L'Europe n'a pas attendu l'OACI pour réduire les nuisances environnementales de l'aviation.

La politique environnementale européenne vis à vis du transport aérien comporte trois axes majeurs :

Le soutien à la recherche :

En 2007 a été lancé, à l'initiative de la Commission Européenne, dans le cadre du 7ème Programme-Cadre de Recherche et Développement technologique (PCRD), un ambitieux programme de recherche et technologie dénommé Clean Sky, associant universités, industriels, et centres de recherche. Ce programme doté de plus de 1,6 Mds € sur 7 ans vise à rendre le transport aérien plus acceptable en termes de nuisances environnementales.

Son objectif est d'accompagner le développement de nouvelles technologies qui permettront de rendre les prochaines générations d'aéronefs plus respectueuses de l'environnement.

Le programme Clean Sky est le programme de recherche qui doit permettre d'atteindre les objectifs fixés par le conseil consultatif pour la recherche aéronautique en Europe (ACARE) qui vise, à l'horizon 2020, une réduction de 80% des émissions de NO_x et de 50% des émissions de CO_2.

Dans ce cadre, une réduction de 50% du bruit est aussi visée.

Parallèlement différents programmes de recherche sont soutenus dans le domaine des énergies renouvelables et tout particulièrement celui des biocarburants aéronautiques, au travers des programmes ALFA-BIRD et SWAFEA.

L'optimisation de la gestion du trafic aérien :

La commission a lancé une réforme complète de la législation régissant le contrôle du trafic aérien.

La législation Ciel Unique Européen fait de la gestion du trafic aérien une compétence communautaire et se traduit notamment par la création d'espaces aériens transfrontaliers qui intègrent les espaces nationaux, ou blocs fonctionnels FAB.

Ce changement institutionnel doit s'accompagner d'une modernisation des systèmes de gestion du trafic aérien, qui dans leur état actuel ne seraient pas en mesure de répondre aux exigences opérationnelles de la réglementation Ciel Unique, et notamment de gérer l'accroissement programmé du trafic aérien (SESAR Definition Phase Report, 2007).

L'entreprise commune SESAR est la composante technologique de la réglementation Ciel Unique. Elle a vocation à assurer cette modernisation en coordonnant et en concentrant les travaux de recherche et développement conduits au sein de l'Union.

Une meilleure gestion du trafic aérien européen doit permettre à terme de diminuer de 10% les émissions de CO_2.

L'inclusion de l'aviation dans le système d'échange de permis d'émission européenne.

L'Union Européenne a adopté une directive visant à inclure l'aviation dans son schéma de marché de permis d'émission (directive ETS). L'objectif est, à partir de 2012, de revenir au niveau d'émission des années 2004/2006. La directive est aujourd'hui en cours de transposition par les Etats membres. Le système devrait couvrir l'ensemble des vols au départ et à l'arrivée d'un aéroport européen.

Bien que conforme aux préconisations de l'OACI (résolution A35-5), la démarche européenne a été rejetée pour son unilatéralisme lors de son assemblée de septembre 2007 (OACI - Résolutions adoptées par l'Assemblée - 36ème session, 2007).

1.6.3. La politique de l'OACI pour réduire les émissions du transport aérien

L'Organisation Internationale de l'Aviation Civile a été créée en 1944 sous l'égide de l'ONU pour promouvoir un « développement ordonné et sûr de l'aviation civile mondiale » (OACI - Convention relative à l'aviation internationale, Ed. 2006).

L'OACI comprend plus de 180 Etats membres.

Dès les années 60, l'OACI a été amenée à élaborer des recommandations et des règlements visant à encadrer le bruit et les émissions des aéronefs.

L'article 2.2 du Protocole de Kyoto confie à l'OACI le rôle d'organiser la limitation des émissions de GES du secteur de l'aviation internationale.

En s'appuyant sur les travaux du CAEP (Comité pour la Protection de l'Environnement en Aviation), le conseil de l'OACI a émis des recommandations technologiques et opérationnelles visant à limiter les émissions de GES de l'aviation internationale.

En 2007, l'OACI a pris position en faveur des mécanismes d'échange de permis d'émission (résolution A35-5) jugés préférables aux mécanismes de taxation, car plus souples et plus en conformité avec la démarche de la CCNUCC. Cette résolution a toutefois du mal à se traduire en engagements chiffrés de la part des Etats membres de l'OACI. Les Etats qui n'ont pas ratifié le Protocole de Kyoto refusaient en effet d'engager leur aviation dans une voie qu'ils réfutent par ailleurs. Certains pays « non annexe I » s'opposaient à une démarche visant à limiter les émissions de leur aviation internationale alors même que l'ensemble de leurs activités est exonéré de tout objectif de réduction par le Protocole de Kyoto.

L'OACI travaille avec d'autres organisations internationales pour tout ce qui peut avoir un rapport avec l'aviation. C'est sous l'égide de l'OACI que le GIEC a produit en 1999 un document spécifique faisant le bilan des connaissances de l'impact de l'aviation sur le changement climatique : *Aviation et Atmosphère Planétaire – Rapport spécial du GIEC*.

L'OACI réalise régulièrement des études, rapports ou analyses sur le thème de l'aviation et de l'environnement.

2. Les voies de progrès

Notre analyse fera, ici, régulièrement référence aux recommandations du rapport interministériel « Les Emissions de Gaz à Effet de Serre de l'Aviation » remis en 2005 par Jean-Pierre Giblin et qui a notamment servi de base à la rédaction d'un mémorandum adressé par les autorités Française à la Commission Européenne. Les propositions d'actions ont été présentées dans ce mémorandum afin d'alimenter la réflexion lancée par la Commission pour « vaincre le changement climatique planétaire » et participer à l'élaboration des stratégies qui devaient être mises en œuvre dans ce but (source mémorandum DGAC).

L'aviation a depuis connu un baril de pétrole qui est monté à plus de 100$ à l'été 2008 et est aujourd'hui en train de subir les effets de la crise économique ; le GIEC a remis son quatrième rapport d'évaluation sur les changements climatiques et a reçu le prix Nobel de la Paix ; en France, la politique environnementale a été marquée par le Grenelle et la création du MEEDDAT.

Ces éléments de contexte essentiels nous invitent à une relecture des recommandations interministérielles.

Le transport aérien est une activité qui s'organise autour de trois secteurs structurants, l'exploitation, la gestion du trafic et les activités aéronautiques.

L'analyse des voies de progrès pour limiter l'impact de l'aviation civile sur le réchauffement climatique nous conduira à étudier au sein de chacun de ces secteurs les pistes qui paraissent les plus réalistes et/ou les plus prometteuses. Mais, comme la limitation de l'impact du transport aérien sur le climat passe aussi par la possibilité de lui préférer un autre mode de transport, nous consacrerons une partie de cette étude à l'analyse de la substitution modale. En outre, il nous est apparu utile de consacrer une petite partie, en préambule, de ce chapitre à décrire quelques-unes des principales caractéristiques de l'économie du transport aérien. Cette première section mettra en lumière l'existence ou l'absence de forces de marché qui peuvent expliquer pourquoi certaines voies de progrès auront plus de chance d'aboutir que d'autres.

2.1. Spécificités de l'économie du transport aérien

Pour les compagnies, le poste carburant pèse lourdement sur l'exploitation des aéronefs. Elles ont toujours cherché à le limiter, c'est sans doute ce qui explique que les constructeurs n'ont eu de cesse depuis plus de 40 ans d'améliorer l'efficacité énergétique de leurs appareils.

La montée des prix du carburant jusqu'à l'été 2008 n'a fait qu'accentuer cette caractéristique, au point de faire de l'exploitation d'un aéronef une activité majoritairement à frais variables, alors que jusque-là, elle était une activité majoritairement à frais fixe (amortissement ou location des appareils, personnels etc…) (ENAC/TSE - Air Transport Market, 2009).

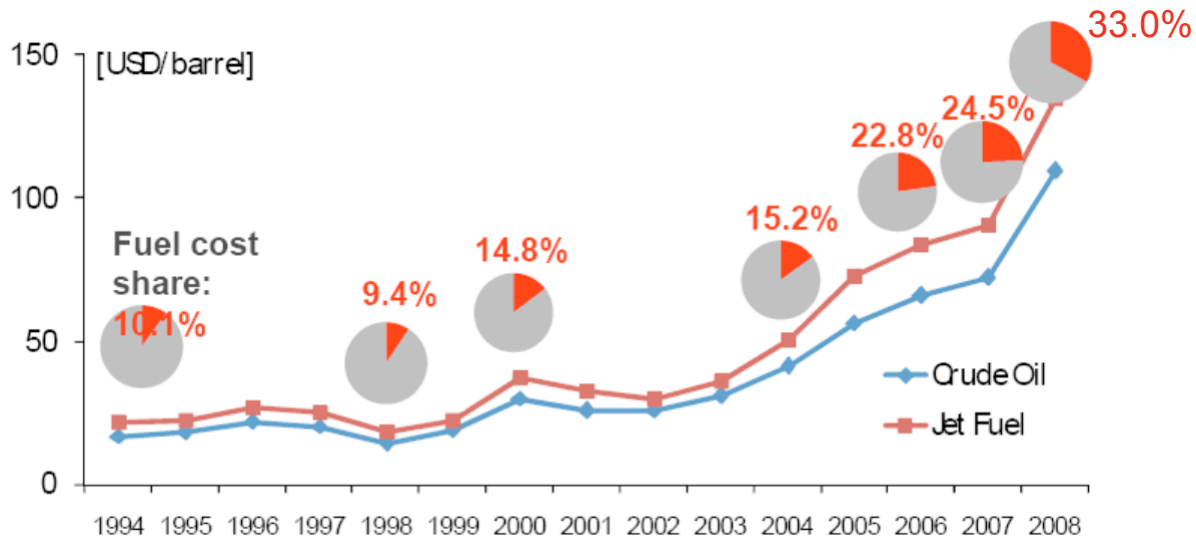


Figure 17-Evolution de la part du poste carburant dans les coûts des compagnies (50% moyens courriers / 50% longs courriers) de 1994 à 2008, en fonction du prix du baril – Données EIA/AEA (ENAC/TSE - Air Transport Market, 2009)

La réduction des dépenses en carburant est devenue vitale[16] pour les compagnies.

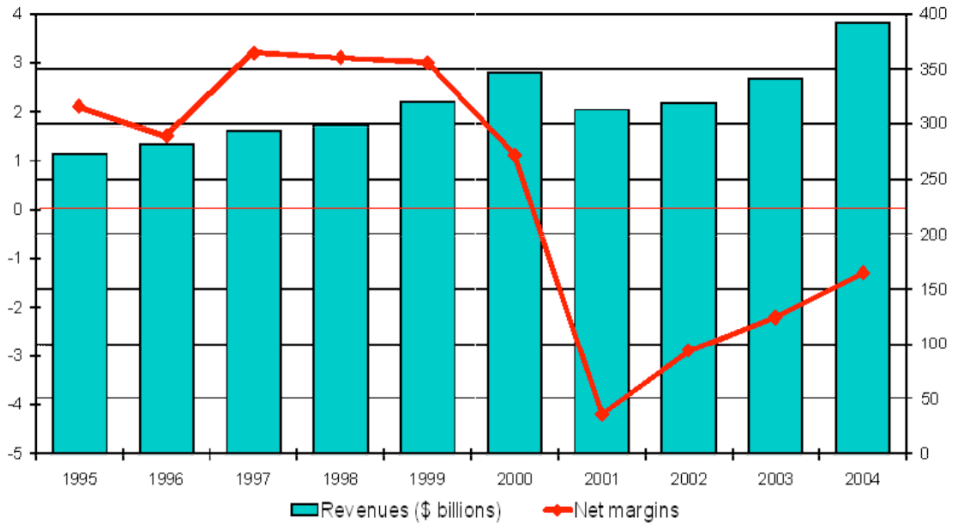


Figure 18-Evolution des profits et des recettes des 150 compagnies les plus rentables, sur la base des estimations réalisées par l'Association internationale des Compagnies Aériennes (ENAC/TSE - Air Transport Market, 2009)

[16] Source : Cours d'économie du transport aérien. Estelle Malavolti – Thibault Verger, ENPC-ENAC, Mastère d'Action Publique 2008-2009.

Globalement cette situation pèse sur l'ensemble du secteur et tout particulièrement sur les avionneurs pour qui l'amélioration des performances énergétiques des appareils doit représenter un avantage concurrentiel décisif. Depuis l'automne 2008, les cours du pétrole ont chuté, mais le souvenir de l'envolée précédente ne devrait pas les détourner de cet objectif. Cela va clairement dans le sens d'une limitation des émissions de CO_2.

2.2. Réduire l'impact climatique par une exploitation optimisée des aéronefs

Pour limiter leurs émissions, les compagnies peuvent optimiser les consommations de carburant et renouveler leur flotte pour des avions plus efficaces, comme le mentionnait le rapport Giblin.

2.2.1. En optimisant les consommations de carburant

Plusieurs voies sont mises en œuvre pour optimiser les consommations de carburant :

Par une limitation de la masse

En ajustant les quantités embarquées aux stricts besoins du vol et par un ravitaillement aux escales. Cela concerne le kérosène, l'eau potable, le service à bord (catering). L'allègement passe aussi par l'utilisation de containers plus légers ou la suppression d'équipements de confort non strictement nécessaires à l'agrément des passagers, comme le système de réfrigération de l'eau potable. La limitation de la masse engage un cercle vertueux dans la mesure où moins il y a de masse à transporter, moins il faut de kérosène, ce qui allège d'autant la masse au décollage et limite la quantité de carburant qui sera nécessaire au voyage.

Par une optimisation de la vitesse de croisière

Pour un type d'avion et des conditions de vol (température, pression, vent) donnés, la consommation de carburant dépend de plusieurs facteurs, au premier rang desquels l'altitude et la vitesse de vol. L'altitude de vol influe sur la densité de l'air dans lequel se déplace l'avion, et donc sur le couple portance / résistance à l'avancement qui s'exerce sur l'appareil. La vitesse d'un avion dépend de la poussée des moteurs, qui elle-même dépend de la densité de l'air.

En adaptant horaires et altitudes, les compagnies peuvent chercher à profiter sur certains vols du Jet Stream[17], pour réduire les temps de trajet et leur consommation de carburant.

[17] Le jetstream est un courant de vent violent circulant juste en dessous de la tropopause

En règle générale les altitudes et les vitesses auxquelles évoluent les avions en croisière (entre 25.000 ft et 40.000 ft et entre 830 km/h et 960 km/h) correspondent à des optimums. Mais ces paramètres de vols doivent avant tout répondre à des impératifs de sécurité ou de capacité imposés par les conditions météorologiques et le contrôle aérien, ainsi qu'à des impératifs opérationnels ou commerciaux de respect des horaires qui ne dépendent pas seulement des compagnies aériennes. Il arrive donc que pour combler un retard ou pour « attendre » l'ouverture des pistes à l'atterrissage (vols de nuit), les pilotes quittent ces optimums pour accélérer ou ralentir le vol, ce qui peut avoir une influence négative sur les consommations de carburant.

Les principaux progrès sont plutôt à attendre dans le domaine de la gestion du trafic aérien, en vol et sur les aéroports (cf. section 2.3).

Par un nettoyage régulier des moteurs et des cellules

Entre deux visites d'entretiens, fixées par les exigences de certification, les appareils se salissent et les chambres de combustion s'encrassent. La poussière qui s'accumule sur la cellule peut dégrader les performances aérodynamiques. Elle constitue en outre une charge inutile à transporter. L'encrassement des moteurs détériore leurs performances. Un nettoyage régulier permet de restaurer dans une certaine mesure les performances de l'appareil notamment en termes de consommation et donc d'émission. Selon Henry Hurlin, responsable de la flotte moyen-courrier d'Air France, l'intérêt économique de ces opérations n'est pas immédiat, surtout en période de pétrole peu coûteux, mais globalement elles permettent, sur la durée, un meilleur vieillissement de l'appareil. Cette démarche peut donc être bénéfique pour la durée de vie des pièces d'usure et pour la valeur patrimoniale de l'appareil lui-même. Elle participe en outre à la démarche environnementale globale de la compagnie. Un kérosène cher, rappelons que son prix a plus que doublé entre mai 2004 et l'été 2008, constitue une incitation supplémentaire à la réalisation de ces opérations de maintenance. Le nettoyage de la cellule des appareils ne répond pas à des exigences d'ordre administratif.

2.2.2. En renouvelant les flottes

Les constructeurs mettent l'accent sur les progrès des performances de leurs appareils en termes environnementaux en indiquant les gains très importants réalisés sur la consommation de kérosène par passager – kilomètre transporté (PKT). Ainsi, selon airbus (cf. figure 10) de 1985 à 2005 la consommation moyenne est passée d'environ 8L/100Km par passager à

environ 5L/100Km par passager en 2005. Les prévisions à long terme d'Airbus font état d'une consommation moyenne d'environ 3L/100Km par passager à l'horizon 2025.

Pour une compagnie, la composition de sa flotte selon qu'elle est récente ou ancienne influence donc fortement ses besoins de kérosène et donc ses émissions.

A trafic constant, le renouvellement des flottes constitue une des principales voies de progrès pour limiter les émissions de GES du secteur.

Si l'âge moyen de retrait d'un avion est de l'ordre de 30 ans[18], le prix du carburant constitue une incitation forte au renouvellement des appareils par des avions plus efficaces. En 2008, les compagnies qui ont le mieux résisté à l'envolée du prix du kérosène sont celles qui bénéficiaient des flottes les plus modernes (et des couvertures sur les prix du pétrole les plus pertinentes).

Mais le renouvellement d'une flotte est une opération lourde qui ne dépend pas seulement du prix du baril à un instant t. La situation financière et le niveau d'activité entrent aussi en ligne de compte. L'effondrement des prix du baril depuis l'été 2008, le tarissement du crédit et le ralentissement généralisé de l'économie auquel est très sensible la demande de transport aérien pèseront sans doute très lourdement sur les stratégies des compagnies en matière de renouvellement de leurs appareils à court terme.

L'offre elle-même a une influence considérable sur le renouvellement des flottes. Ces vingt dernières années, les progrès les plus importants auraient été réalisés sur les longs courriers et les gros porteurs selon Air France.

Il est vrai que la structure du marché des avions de ligne a focalisé l'attention des constructeurs et des motoristes sur ce segment. Comme nous l'avons vu précédemment l'essentiel de la croissance à venir proviendra du développement du trafic international (cf. 47hap.. 1, section 1.5), en particulier à destination et entre pays nouvellement développés. L'économie des vols long-courriers fait apparaître une prépondérance des coûts du carburant (« Les Entretiens de Toulouse » - Air France, 7 et 8 avril 2009) : ils représentent 24% des coûts d'exploitation à égalité avec l'équipage lorsque le baril est à 40$ (49% lorsque le baril est à 120$). Sur les moyens courriers le carburant ne représente plus que 12% des frais d'exploitation dans les mêmes conditions (29% avec un baril à 120$).

[18] Le rapport Giblin cite l'OACI : 27 ans

Ces éléments expliquent que l'efficacité des moyens courriers n'ait pas progressé de manière aussi significative que celle des longs courriers. Ceci peut constituer un frein au renouvellement de ces flottes. Compte tenu des temps de développement d'une nouvelle génération d'avions, l'impact du prix du kérosène sur l'équilibre économique des courts et moyens courriers ne pourra être pris en compte avant plusieurs années. Pour répondre à cette nouvelle demande, deux stratégies industrielles peuvent être envisagées : l'une consistant à développer plus rapidement un avion un peu plus efficace que la génération actuelle, l'autre consistant à allonger le temps de développement pour pouvoir proposer un avion de rupture technologique, beaucoup plus efficace. La première option a très certainement la faveur des compagnies, la seconde celle des avionneurs.

La crise économique mondiale rend la résolution de ce dilemme plus délicate encore.

2.3. La gestion du trafic aérien et des aéroports

Les contraintes et limitations des opérations de contrôle aérien peuvent avoir une influence négative sur la durée des vols ou la longueur des routes et donc sur les émissions de GES. Au sol, outre le roulage qui peut prendre des proportions importantes, les avions utilisent du kérosène pour assurer le maintien d'un certain nombre de fonctionnalités (climatisation de la cabine par exemple). Il y a là aussi matière à progrès.

2.3.1. Optimisation des routes et des capacités

Les trajectoires aériennes sont rarement les plus courtes. Les routes doivent en effet contourner les espaces militaires et dans l'état actuel du contrôle aérien il est plus facile et plus sûr d'imposer aux avions des routes prédéfinies, qui permettent aux contrôleurs de mieux anticiper les conflits de trajectoires.

Les limitations de capacité peuvent aussi avoir une influence négative sur les temps d'attente au sol ou en vol, ce qui génère une consommation de carburant inutile.

Une optimisation est possible mais elle exige à la fois une refonte de l'organisation et des outils du contrôle aérien. C'est l'objectif du projet Ciel Unique Européen et de son programme de recherche SESAR[19].

Les gains attendus à terme, en Europe, varient dans une fourchette de 5% à 10% d'émissions de GES. Mais ces gains ne sont pas transposables à l'ensemble du trafic mondial dans la

[19] Un projet équivalent existe aux Etats-Unis : NextGen

mesure où ils ne concernent que les zones où le fort trafic conduit à une utilisation non optimale des capacités.

L'enjeu consiste à élaborer des systèmes capables d'assurer la séparation des avions en temps réel et en 3D de manière à pouvoir en optimiser les trajectoires.

Les objectifs dépassent le seul domaine environnemental puisqu'ils doivent aussi permettre une augmentation des capacités, une amélioration de la régularité et de la sécurité.

En termes opérationnels, le développement des descentes continues (CDA) constitue l'un des principaux axes de travail. Le principe consiste à déterminer, en fonction du trafic, des caractéristiques de l'appareil et de sa trajectoire, un point où le pilote peut débuter une descente en suivant une pente continue, en lieu et place de la descente par palier qui prévaut aujourd'hui. Le contrôle aérien devant garantir l'espacement règlementaire entre les aéronefs tout au long de cette phase, cela peut conduire à augmenter l'espacement en amont, ce qui n'est pas sans conséquence sur les capacités.

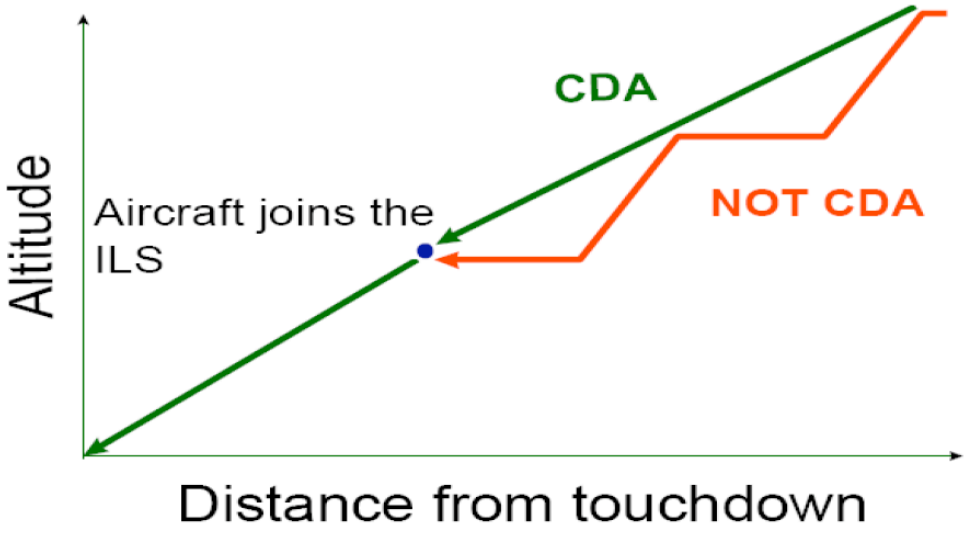


Figure 19-Comparaison profil de CDA et profil de descente classique (STAC - Bilan environnemental de la phase III de l'expérimentation Green Tracks, 2009)

Les premières études ont montré une réduction significative du bruit sur les zones survolées, mais une étude réalisée par le STAC[20] montre qu'il n'est pas facile d'évaluer ex-post le gain réel sur les émissions, notamment parce que les données nécessaires à ce type d'évaluation ne

[20] L'évaluation Green Tracks a été élaborée dans l'optique d'étudier la conduite spécifique de vol visant à optimiser le profil de vol, au départ et à l'arrivée. Cette évaluation s'effectue dans le cadre de l'initiative AIRE (Atlantic Interoperability Initiative to Reduce Emissions), qui définit un plan d'action transatlantique entre la Commission Européenne et la FAA (Federal Aviation Administration) afin de réduire les émissions polluantes.

sont pas toujours disponibles. Pourtant au niveau de l'OACI, le CAEP avance une réduction de la consommation pouvant aller de 50 kg à 100kg, soit entre 160kg et 315kg de CO_2 pour chaque vol.

Les discussions relatives à l'implémentation de nouvelles procédures se faisant à l'échelon européen et à l'échelon international, il semble fondamental de pouvoir s'appuyer sur des évaluations indépendantes basées sur des méthodologies et des données de référence.

2.3.2. Aéroports : conception, postes au contact, exploitation, accès

En matière environnementale les sociétés gestionnaires des aéroports ont historiquement surtout été sensibilisées aux questions de pollutions locales. La diminution des nuisances locales revêt en effet une importance capitale pour limiter le phénomène « nimby »[21] et contribuer à une meilleure acceptation des activités aéroportuaires par les riverains. Au delà de la pollution locale, les exploitants de plateformes aéroportuaires disposent aussi de plusieurs leviers pour limiter l'impact global du secteur de l'aviation sur le réchauffement climatique :

- Sur leurs propres activités par les choix et investissements qui peuvent être faits en matière de bâtiments (isolation, chauffage, climatisation) et de production d'énergie (cogénération, recours à l'énergie solaire…) et le type de véhicules utilisés dans le périmètre de l'aéroport. Le plus souvent ces derniers sont, en effet, des véhicules diesel, alors qu'ils constituent une flotte captive. Ils pourraient être facilement remplacés par des véhicules électriques, ou au gaz naturel.
- Sur les activités liées à l'exploitation des aéronefs au sol : par les choix d'aménagement qui peuvent influencer les temps de roulage, par le nombre de postes au contact qui limite le recours à des bus pour l'acheminement des passagers entre l'aérogare et l'avion et plus généralement par le développement des moyens de « green taxi » de sorte que les aéronefs n'aient plus besoin d'utiliser leurs moteurs ou leur APU pour les manœuvres au sol : cela passe notamment par le développement des postes d'alimentation électrique aux emplacements de parking ou par un usage plus fréquent des tracteurs (idéalement électriques) pour le déplacement des avions entre les pistes et les postes de stationnement.

Les solutions possibles sont très variées. Certaines peuvent être mise en place relativement facilement, d'autres nécessitent une révision dans la conception des aéronefs. Mais distinguer le gain théorique à attendre de ce qui sera réalisé dans la pratique, n'est pas évident.

Pour un vol moyen courrier le roulage représente en moyenne 5% de la consommation de carburant, précise Henri Hurlin. L'ensemble des compagnies cherche à contenir ce poste de

[21] L'acronyme **nimby** provient de l'anglais ***Not In My Back Yard*** qui signifie *pas dans mon arrière-cour*. Nimby désigne une position éthique et politique, qui veille à ne pas tolérer de problèmes dans son environnement proche. Wikipédia - Nimby. (s.d.). *Nimby*. Consulté en mai 2009, sur Wikipédia: http://fr.wikipedia.org/wiki/

dépenses. Air France a développé de nouvelles procédures sur ses bi-moteurs : le roulage est effectué avec un seul des deux moteurs en fonctionnement. Mais les procédures de vérification avant le décollage obligent à allumer les moteurs quelques minutes auparavant, ce qui limite les gains possibles. Virgin Atlantic communiquait en 2007 (Challenges, 2007) sur l'utilisation systématique de tracteurs pour placer ses appareils sur l'aire de décollage. Mais cette organisation n'a semble-t-il plus cours aujourd'hui[22]. Ces manœuvres provoqueraient une usure prématurée des trains d'atterrissage.

Ceci souligne la nécessité d'intégration de l'ensemble des solutions possibles le plus en amont possible lors de la conception des aéronefs et des plateformes aéroportuaires.

2.4. Substitution et complémentarité modale

Le développement des lignes à grande vitesse en France a largement contribué à la limitation de l'accroissement des émissions de GES attribuables au trafic intérieur de l'aviation, comme le montrent les inventaires de l'AEE (tableau 7) ou du CITEPA (tableau 6).

Néanmoins, si ces résultats sont à souligner, leur généralisation paraît difficile.

La France est l'un des rares pays à avoir autant misé sur l'énergie nucléaire, ce qui permet au mode ferroviaire français d'être effectivement « pauvre en carbone ». Ce n'est pas nécessairement le cas dans d'autres pays où l'électricité provient dans une large mesure de centrales thermiques.

Au plan socio-économique, les investissements nécessaires au déploiement de lignes à grande vitesse cantonnent leur développement à des liaisons entre centres fortement peuplés, pour que le trafic y soit suffisant pour en assurer la rentabilité.

Les lignes à grande vitesse présentent un attrait maximal par rapport aux lignes aériennes, pour les trajets dont la durée est inférieure à 3h30 (Giblin, 2005). Or, l'essentiel des déplacements en avion se fait sur des moyens ou longs courriers, pour lesquels il n'existe pas de substitut modal.

C'est sans doute plus dans le domaine de la complémentarité que les voies de progrès sont à rechercher et notamment dans la desserte des hubs par les modes les plus efficaces du point de vue des émissions.

[22] Elle ne figure pas dans la page du site de Virgin Atlantic consacrée à la démarche environnementale de la compagnie

Les stratégies de hub déployées par les grandes compagnies ont largement contribué au développement du trafic ces dernières années. Du point de vue environnemental il y aurait sans aucun doute un avantage à favoriser l'acheminement vers les hubs des passagers moyens et longs courriers en train plutôt qu'en avion ou en voiture.

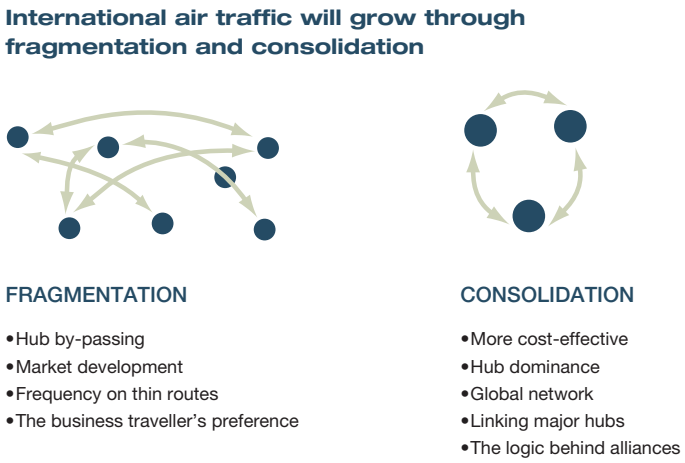


Figure 20-Illustration des perspectives de développement des stratégies de hub (Airbus - Global Market Forecast 2004-2023, 2004)

Cela nécessite en premier lieu la construction de gares ferroviaires à l'intérieur des aérogares, comme à Roissy-Charles de Gaulle ou à Lyon-Saint Exupéry. Mais cela n'est pas une condition suffisante. Le développement de la complémentarité modale se heurte à des questions de praticité et de confort. Un passager au départ de Marseille et à destination de New-York aurait la possibilité aujourd'hui de se rendre à CDG en TGV puis d'embarquer pour New-York. En pratique, cette option l'obligerait à acquérir deux billets bien distincts et à se charger du transfert de ses bagages à la gare de Marseille, dans le train et à CDG. A contrario les compagnies aériennes sont aujourd'hui en mesure de lui proposer sur un billet unique, un vol Marseille – New York via CDG. Dans ce cas le passager n'a pas besoin de se préoccuper de ses bagages entre son départ et son arrivée.

Outre les investissements à réaliser dans les infrastructures ferroviaires, le développement de la complémentarité modale nécessite la prise en compte du confort du voyageur, aussi bien lors de la préparation que lors du déroulement de son voyage.

2.5. La conception et la construction des aéronefs

Le marché des aéronefs est mondial. De ce fait les progrès techniques réalisés dans la conception et la construction des aéronefs ont une diffusion elle aussi mondiale. Comme l'a souligné le rapport Giblin en 2005, cela vaut tant pour les avions que pour les moteurs ou le

carburant. Dans la perspective d'une limitation de l'impact de l'aviation sur le réchauffement climatique, qui est lui aussi un phénomène global, l'amélioration des performances environnementales des aéronefs est donc un levier essentiel.

2.5.1. Les avions et les moteurs

Amélioration de l'efficacité des moteurs :

Les progrès réalisés depuis 40 ans :

Depuis 40 ans, l'efficacité du transport aérien rapportée au passager-kilomètre transporté n'a fait que s'améliorer.

Selon IATA (www.iata.org, 2009), les avions de nouvelle génération sont 70% plus efficaces qu'il y a 40 ans. IATA précise par ailleurs que sur les 10 dernières années, le gain en efficacité s'élèverait à 20%. Airbus avance aussi des chiffres du même ordre (cf. figure 10), qui, il est vrai servent à la promotion des très gros porteurs. L'unité de mesure choisie place le nombre de passagers au dénominateur. A ce titre la comparaison avec une voiture compacte qui est régulièrement mise en avant, site de IATA notamment, est quelque peu faussée dans la mesure ou la consommation des véhicules automobiles n'est jamais indiquée rapportée au nombre de passagers…[23]

Dans le monde des motoristes l'efficacité se mesure par la consommation spécifique[24]. Gilles Rollin, chef de la division Chambre de Combustion à la SNECMA, confirme que sur ces 40 dernières années la consommation spécifique a diminué de 40%.

Les possibilités d'amélioration des moteurs actuels :

L'amélioration des moteurs actuels (turbo réacteurs carénés) passe par une action sur les taux de dilution, les taux de compression et la technologie des composants.

Les progrès enregistrés ces dernières années sont liés notamment à l'apparition des moteurs à double flux. Dans ces moteurs une partie du flux d'air aspiré, le flux froid, est accéléré et participe à la poussée tout en ne participant pas à la combustion. Il est donc non polluant. Une augmentation du taux de dilution (masse d'air flux froid / masse d'air flux chaud) améliore la consommation spécifique.

[23] Le site de IATA indique « The A380 and B787 are aiming for 3 litres per 100 passenger km – better than a compact car! ». Une telle consommation pour un véhicule de 4 ou 5 places reviendrait à 12L à 15L/100Km. Ce qui correspond a un très gros véhicule et n'est pas représentatif du marché automobile actuel. Selon l'ADEME la consommation moyenne des véhicules en France (cycle MVEG) était de 6,4 l/100 km pour les motorisations essence et de 5,6 l/100 km pour les diesel (source : ADEME. (2008). Les Véhicules Particuliers en France).

[24] La consommation spécifique est la masse de kérosène consommée rapportée à la poussée développée par le moteur

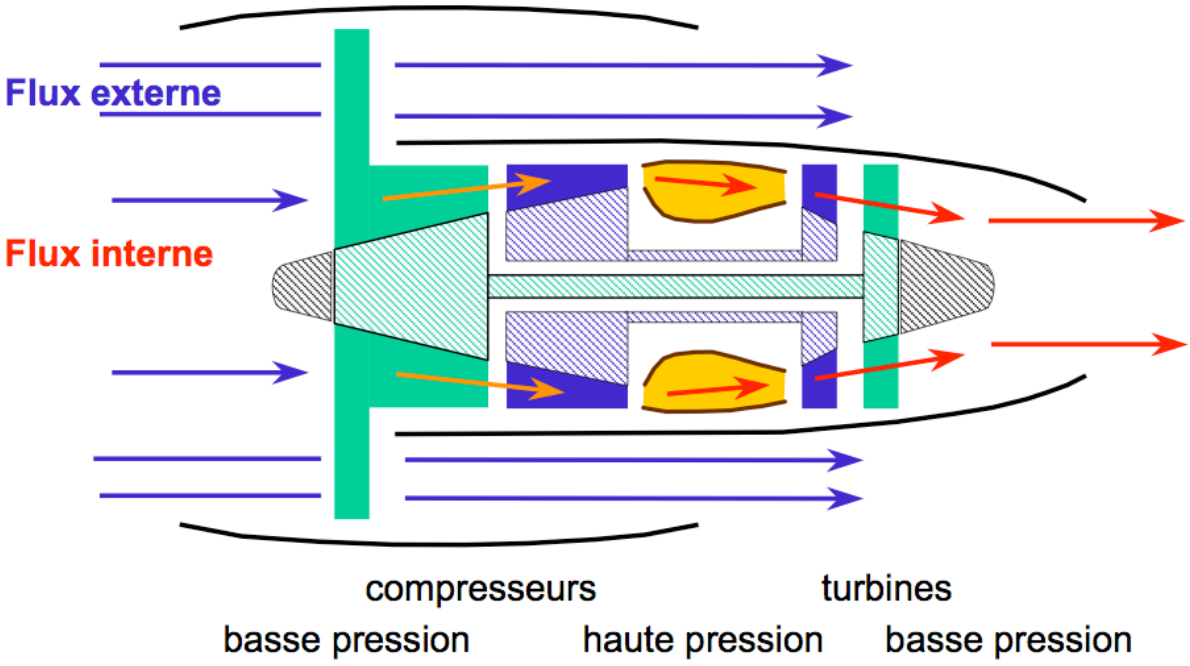


Figure 21-Schéma, en coupe longitudinale, d'un turboréacteur à double flux. (ENAC-Yves Bienvenu, 2009)

L'augmentation du taux de compression, permise par la mise en œuvre de nouveaux matériaux, a et aura aussi une influence positive sur l'efficacité des moteurs. Mais cette augmentation favorise la production de NO*x*. Pour les motoristes l'amélioration de cet équilibre CO_2 / NO*x* revêt une importance capitale. Il passe par une amélioration du dessin des chambres de combustion et de la composition du carburant. Gilles Rollin indique que le volume de la chambre est le fruit d'un compromis sur lequel pèsent assez lourdement les exigences du roulage au sol (besoin d'un minimum de poussée, moteur au ralenti). Cette déclaration ne fait qu'accentuer les besoins de développement des solutions de « green taxi » (cf. 2.3.2).

Les améliorations attendues sur les futurs moteurs, sans rupture technologique, sont dans la lignée de celles déjà obtenues. Les futurs moteurs verront leur taux de dilution et leur taux de compression augmenter, tout en présentant des niveaux d'émissions et de bruits inférieurs grâce à l'apport décisif de nouvelles méthodes de calcul et de nouveaux matériaux. Mais les compromis à réaliser entre la réduction des émissions de CO_2, la réduction des NO*x*, au sol et en croisière, et la réduction du bruit, confinent les progrès dans certaines limites.

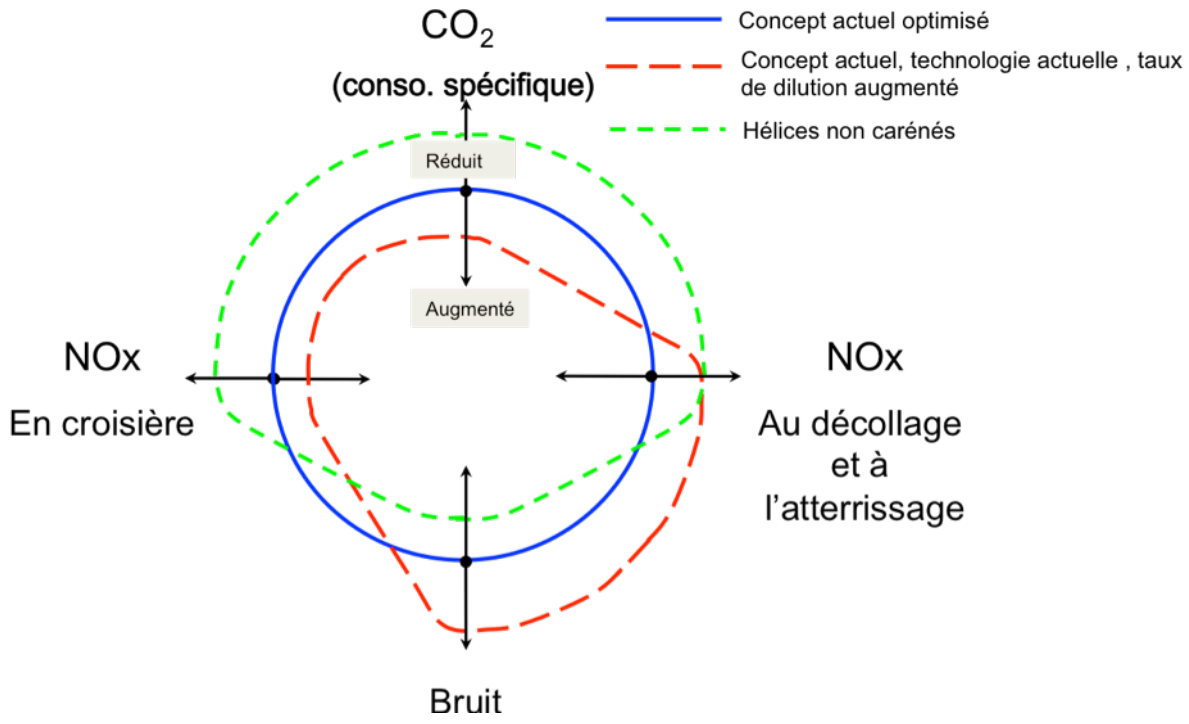


Figure 22-Illustration des équilibres entre différentes contraintes environnementales qui s'appliquent à la conception d'un turboréacteur (SNECMA, 2005)

Pour aller au-delà, des ruptures conceptuelles seront nécessaires.

Les concepts nouveaux :

Les concepts nouveaux ne se concrétiseront qu'au-delà de l'horizon 2020. Leur développement exige notamment de repenser entièrement leur intégration au niveau de la cellule. Ce qui explique les délais nécessaires à leur déploiement. Les architectures contrarotatives et les hélices non carénées sont aujourd'hui les deux voies les plus prometteuses pour les motoristes avec des gains attendus de l'ordre de 20% en terme de consommation et donc d'émissions de CO_2, avec toutefois, dans le cas des hélices, la question du bruit à traiter. Si l'absence de carénage favorise l'allègement et un taux de dilution élevé, elle ne permet plus en effet le confinement du bruit des aubes de la turbine.

En raison d'un bilan masse très défavorable, il semble acquis que la technologie des piles à combustible ne sera pas utilisée pour la fourniture de puissance primaire (celle qui sert à faire volé l'avion). Cette technologie pourrait en revanche avoir des débouchés pour la fourniture de puissance secondaire (fourniture d'énergie électrique, hydraulique, climatisation etc.) et le remplacement des APU.

De nombreuses études ont été réalisées dans les années 80 et 90 à propos du remplacement du kérosène par du L-H_2 ou du L-CH_4 dans les avions de ligne. Les défis sont nombreux et selon Patrice Desvallées, de la sous-direction de la construction à la DGAC, les ruptures technologiques ne sont pas envisageables avant plusieurs décennies. Les « cryoplanes » continuent d'être un sujet de veille, mais pour le moment, le bilan carbone d'une filière hydrogène ou méthane liquide ne serait sans doute pas très favorable, compte tenu de l'énergie nécessaire à produire, stocker et distribuer le carburant cryogénique.

Amélioration des cellules

L'objectif est de limiter le besoin en motorisation. Cela passe par une amélioration de l'aérodynamique et une réduction de la masse.

C'est ici un cercle vertueux qui peut s'engager, car lorsque la cellule permet à performances égales une motorisation plus faible, la masse des moteurs est réduite de même que leur consommation. Cela permet d'emporter moins de carburant pour parcourir la même distance. Une moindre masse de carburant embarquée améliore aussi la consommation et donc les émissions.

Les voies de progrès résident dans l'utilisation de nouveaux matériaux et dans le développement de meilleurs modèles de calculs permettant une connaissance plus fine des phénomènes aérodynamiques.

Le conseil consultatif pour la recherche aéronautique en Europe (ACARE) a fixé un objectif de réduction de 50% des émissions de CO_2 d'ici à 2020. Si les progrès qui seront réalisés sur les moteurs contribueront à hauteur de 20% à l'atteinte de cet objectif, l'amélioration des cellules devraient y contribuer pour 25%.

Le projet Clean Sky[25], fondé sur un partenariat public-privé entre l'UE et les industriels du secteur aéronautique européen vise, en fédérant les savoir-faire, à atteindre les objectifs ACARE.

Quatre des six projets de recherche créés par Clean Sky ont pour objectif l'amélioration des cellules : Smart Fixed Wing Aircraft, Green Regional Aircraft, Systems for Green Operation

[25] Ce projet a été adopté par le conseil de l'Union européenne le 20 décembre 2007 et mis en place officiellement le 5 février 2008 à Bruxelles. Clean Sky, bénéficie d'un budget d'environ 1,6 Mds€ sur la période 2008-2014, financé pour moitié par l'Union européenne, les 50 % restants demeurant à la charge des industriels.

et Eco-Design[26]. A noter que l'impact effectif de la réduction des émissions aux termes du projet Clean Sky dépendra directement de la rapidité avec laquelle les flottes seront renouvelées à cet horizon (cf. 2.2.2).

2.5.2. Les carburants

La composition du kérosène a une influence significative sur la nature des émissions de l'aviation. Comparativement aux carburants automobiles distribués en Europe, le carburant aéronautique, qui répond à des normes mondiales, a très peu évolué au fil des ans.

Amélioration de la formulation du kérosène

Comme nous l'avons vu (chap. I, section 1.3), le CO_2 n'est pas la seule contribution de l'aviation au réchauffement climatique. D'autres produits de combustion issus des moteurs d'avions sont susceptibles d'en augmenter le pouvoir radiatif. La production de ces autres produits est directement liée à la composition du carburant et à la qualité de la combustion.

La production de SO*x* est directement imputable à la présence de soufre dans le carburant aéronautique. Ces oxydes de soufre sont des polluants locaux et ils favorisent la formation de noyaux glaçogènes propices à l'apparition de cirrus (chap. I, section 1.3).

Une des pistes de progrès envisagées dans le rapport Giblin est la réduction de la teneur en soufre du carburant aéronautique. Comme cela était souligné en 2005, le kérosène JET A1 répond à des spécifications internationales dont l'objectif est « d'assurer le bon fonctionnement et la sécurité des turbomachines d'aviation ».

Ces spécifications n'intègrent pas d'objectifs environnementaux.

« Désoufrer » le kérosène nécessiterait des opérations de raffinage complémentaires qui en augmenteraient le prix, ce à quoi les compagnies sont très sensibles.

[26] Afin d'éviter la dispersion des projets de recherche, 6 groupes ont été créés dans Clean Sky, ayant les thématiques suivantes :

- Amélioration de l'efficacité et réduction du bruit des hélicoptères (Green Rotorcraft)
- Amélioration de l'aérodynamique des ailes d'avion (Smart Fixed Wing Aircraft)
- Amélioration de l'efficacité des avions régionaux, nouveaux matériaux (Green Regional Aircraft)
- Développement de nouveaux moteurs (Sustainable and Green Engine)
- Développement de l'avionique et des systèmes (à bord et au sol) permettant une exploitation des aéronefs plus propre (Systems for Green Operation)
- Développement de l'éco-conception des aéronefs, en partant des matières premières nécessaires à la fabrication, en passant par la maintenance et jusqu'au démantèlement des aéronefs (Eco-Design)

Par ailleurs, diminuer la concentration en soufre pourrait avoir des répercussions sur le bon fonctionnement des moteurs et plus généralement sur le bon fonctionnement de l'ensemble des éléments pour lesquels le kérosène assure une fonction ou une autre. Les industriels, motoristes et avionneurs, n'ont pas d'intérêt immédiat à voir la concentration de soufre diminuer dans le kérosène.

L'OACI, dont l'un des objectifs est d'œuvrer au développement de l'aviation, s'est jusqu'à récemment essentiellement concentré sur la réduction du bruit des aéronefs. Les nuisances sonores sont en effet l'un des principaux facteurs qui conditionnent l'acceptation du développement de l'aviation par les populations locales. La question de la promotion d'un carburant aéronautique « désoufré » ne s'est jamais réellement posée à son niveau, selon Philippe Langumier, chargé de mission environnement à la Direction du Transport Aérien de la DGAC et représentant de la France au CAEP.

Au plan global, les émissions de GES concentrent l'essentiel des préoccupations. L'incertitude qui entoure les effets sur le climat des trainées de condensation ne permet pas, dans ce cadre, de mettre la question de la limitation de la teneur en soufre du kérosène en bonne place dans l'agenda des décideurs.

Par ailleurs, le kérosène ayant de nombreuses fonctions annexes dans un avion (lubrification, refroidissement, transmission de puissance hydraulique), des modifications de sa composition imposeraient d'étudier l'impact d'une nouvelle formulation sur de nombreux matériaux. C'est pourquoi les industriels et les exploitants ne souhaitent pas spontanément voir sa composition évoluer.

Les carburants alternatifs

Le trafic aérien présente sur les moyen et long termes des perspectives de croissances de l'ordre de +5% par an (cf. chap. I, section 1.5) ; une extrapolation conduit à un doublement du trafic d'ici à 2030. Le progrès technologique des avions ne permettra pas de stabiliser ou de diminuer la consommation globale du transport aérien et donc sa production de CO_2. L'utilisation de biocarburants constitue une des voies de progrès majeur pour limiter l'impact de la croissance du trafic.

Les biocarburants présentent en effet théoriquement un double avantage : être renouvelables et séquestrer le CO_2.

L'une des questions centrales est donc de savoir ce qu'il en est en pratique ? Quel est le bilan de la production de CO_2 lors du cycle complet fabrication-utilisation, ou du « puit à l'aile » ? Mais ni la question des émissions polluantes secondaires (NO*x*, HC, particules…), ni celle de l'impact environnemental (autre que GES) de la production d'un biokérosène ne doivent être éludées.

Au-delà de la détermination du bilan carbone réel, le développement de biocarburants aéronautiques doit répondre à des spécifications physico-chimiques très exigeantes propres à l'aviation (exploitation en altitude, amplitude des températures) et dont la certification doit garantir une exploitation extrêmement sûre.

Dans l'aviation, le kérosène ne sert pas qu'à produire de l'énergie. Il refroidit l'huile des turboréacteurs et sert d'hydraulique pour certains systèmes. Sa densité énergétique élevée et son pouvoir calorifique sont particulièrement adaptés aux usages aéronautiques. D'autres propriétés sont en outre exigées : être stable à haute température (+ 150°C) et être fluide jusqu'à -50°C. Ces exigences se traduisent par des normes quantitatives très strictes sur les carburants aéronautiques (ASTM, UK DefStan, AFQRJOS[27]), tant en termes de composition chimique que de qualités physico-chimiques, ainsi que des exigences opérationnelles très strictes (corrosion, compatibilité matériaux…).

Selon P. Kuentzman, haut conseiller scientifique à l'ONERA, un biocarburant aéronautique, susceptible de présenter une véritable alternative au JET-A, devrait donc présenter :

- Un contenu énergétique comparable à celui du kérosène conventionnel (35 MJ/l et 43 MJ/kg)
- Un point de congélation inférieur à – 47 °C
- Une viscosité voisine de celle du kérosène
- Une stabilité thermique supérieure à 150 °C
- Un point éclair supérieur à 38°C
- Des qualités de lubrification
- Une bonne compatibilité avec les matériaux du moteur
- Une capacité de réduction des émissions polluantes minoritaires (NO*x*, particules)
- Une utilisation possible en mélange avec le kérosène conventionnel

[27] « Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated Systems » – accord entre enterprises pétrolières qui reprend les normes ASTM D 1655 et Def Stan 91-91

- Une possible fabrication en grande quantité à un coût compétitif avec le kérosène conventionnel
- Une faible toxicité
- Une certification internationale

La question de la certification est fondamentale pour un carburant aéronautique. Un avion de ligne faisant le plein de carburant dans un état peut atterrir dans un autre état et en survoler plusieurs. C'est pourquoi la certification du carburant doit aujourd'hui répondre à des normes partagées au plan international.

Le développement de nouveaux carburants aéronautiques se heurtera à cette difficulté supplémentaire.

Le processus de certification est en effet complexe et très coûteux, puisque c'est un processus qui peut prendre plusieurs années et coûter plusieurs millions d'euros selon François Guay de la direction marketing d'Air Total.

Dans le cadre de l'initiative Futur Carburant Aéronautique[28], l'IFP a évalué à plus de 700.000 litres la quantité de carburant nécessaire aux différents tests de certification pratiqués actuellement (SDC - Feuille de route FCA, 2009).

Les filières envisagées sont multiples (cf. Annexe 3) et les volumes de production seront dans un premier temps faibles. Les exigences de la certification imposent un lourd investissement, en plus de celui nécessaire à la mise en place d'un outil de production. Ce qui risque de compromettre la rentabilité à court terme de solutions qui par ailleurs pourraient être prometteuses.

Pour la production de carburant alternatif, deux voies sont étudiées. Les voies thermochimique et biochimique. Dans les deux cas, la ressource peut être non renouvelable. C'est ainsi que, par le procédé Fischer-Tropsch (thermochimique), il est possible de produire du kérosène à partir de charbon (CTL) ou à partir de gaz (GTL). Ce sont des voies dans lesquelles s'est notamment engagée la compagnie sud-africaine SASOL (CTL) et plusieurs compagnies pétrolières (GTL). Le procédé Fischer-Tropsch a été découvert en 1923 et permet

[28] La sous-direction de la construction aéronautique de la DGAC (SDC) est à l'origine d'une initiative sur les futurs carburants aéronautiques (initiative FCA) qui a pour but d'évaluer le potentiel stratégique, environnemental et économique des différentes filières susceptibles de proposer une alternative au kérosène et d'identifier les freins, notamment en termes de certification, qui pourraient exister.

de synthétiser du carburant liquide à partir d'un mélange gazeux. Le mélange gazeux peut être obtenu à partir de différents composés carbonés d'origine fossile ou renouvelable. La SASOL a fait certifier au niveau international un carburant aéronautique qui incorpore du CTL. Cette compagnie est engagée dans la certification d'un carburant 100% CTL.

Le rapport Giblin excluait en 2005 les filières non renouvelables à base de charbon ou de gaz car leur bilan CO_2 par rapport au kérosène conventionnel est négatif. Ces carburants de synthèse ne contiennent cependant ni composé aromatique, ni soufre, ni impureté qui peuvent être à l'origine d'une augmentation du forçage radiatif des aéronefs en dehors du CO_2 émis.

Il y a peut-être lieu de ne pas exclure certaines filières qui bien que non-renouvelables peuvent avoir un intérêt particulier pour l'aviation. Le carburant de synthèse pourrait en effet conduire à une diminution du bilan radiatif des avions à court terme du fait de la disponibilité immédiate des ressources et de la maturité très avancée des processus industriels utilisés.

Dans une perspective de développement durable, il est en revanche évident que les filières renouvelables doivent être privilégiées. Ce pourrait être les filières de production de carburant à partir de la biomasse (BTL) qui n'entrent pas en concurrence avec la production alimentaire et dont la production ne perturbe pas les écosystèmes ou plus généralement n'entrent pas en concurrence avec d'autres besoins fondamentaux.

Les biomasses à fort rendement ainsi que les résidus et déchets[29], qui ne sont en concurrence ni avec l'alimentation ni avec l'agriculture, retiennent en particulier l'attention des recherches.

Les ressources et résidus issus de la sylviculture et de l'agriculture semblent des candidats prometteurs en France et en Europe. Les microalgues pourraient constituer une autre voie à plus long terme qu'il faut explorer (SDC - Feuille de route FCA, 2009).

[29] Par exemple :

- Ressouces lignocellulosiques,
- Résidus agricoles,
- Résidus de l'industrie agroalimentaire (ex : industrie de jus d'agrumes, noyaux, volailles, etc),
- Résidus de la sylviculture,
- Déchets industriels, municipaux et autres résidus organiques,
- Cultures dédiées et taillis à croissance rapide (Short rotation coppice),
- Plantes robustes non comestibles, à fort rendement et capables de pousser en zone semi-désertique sur des terres non arables (ex. familles botaniques des Euphorbiaceae, Poaceae et Fabaceae : Jatropha Curcas, Miscanthus Sinensis, Panicum Virgatum, Pongamia-Millettia, etc.)
- Certaines variétés d'algues et microalgues à croissance rapide, gourmandes en gaz carbonique
- Micro-organismes, etc

L‘utilisation des jachères évoquées dans le rapport de 2005 n’est plus d’actualité aujourd’hui. Ces terres ont été remises en culture notamment pour répondre aux besoins d’incorporation de carburant d’origine agricole dans les carburants automobiles en Europe.

Le rapport Giblin soulignait en 2005 que les coûts de productions de ces carburants alternatifs par rapport au kérosène conventionnel constituaient les principaux freins à leur développement.

La viabilité économique est effectivement un élément déterminant qui conditionne le potentiel de développement de toute nouvelle filière. L’envolée des prix du pétrole sur la période 2004-2008 (record à 145$ durant été 2008) a démontré qu’un baril se négociant durablement au-delà des 50$ n’était pas qu’une hypothèse d’école. Dans ces conditions plusieurs filières de carburants alternatifs deviennent économiquement viables. Le nombre de projets de recherche en cours sur les carburants alternatifs (cf. Annexe 3) démontre l’intérêt du secteur aérien pour cette solution d’avenir. Les personnes rencontrées estiment que la crise que traverse actuellement l’économie mondiale ne devrait pas remettre en question ces axes de recherche.
L’inclusion de l’aviation dans le système européen d’échange de permis d’émission (cf. chap. III, section 3.4.3) constitue en outre une incitation supplémentaire au développement de carburants alternatifs d’origine renouvelables.

Certains biocarburants ont un potentiel extrêmement intéressant (cf. Annexe 3) en termes de réduction des émissions, en particulier de GES en raison de leur bilan a priori intéressant sur l’ensemble de la filière, mais la définition de critères environnementaux et sociétaux permettant d’évaluer et de comparer les différentes filières reste à faire.

3. Quels moyens d'action publique pour réduire l'impact environnemental de l'aviation ?

Plusieurs mesures peuvent être envisagées pour engager une action publique en faveur de l'environnement.

Le champ de l'action publique recouvre un spectre plus large que celui de la seule action des pouvoirs publics et s'étend aux interactions entre des groupes qui peuvent représenter des intérêts très variés. La prise en compte de la multiplicité des acteurs et des intérêts pose en premier lieu la question de la construction d'un socle commun de connaissance et celle de la création d'une dynamique commune.

Dans ce cadre, l'action publique pour recourir à deux types d'instruments pour limiter l'impact de l'aviation sur le réchauffement sont de deux types : les instruments normatifs et les instruments économiques.

3.1. La construction d'un socle commun de connaissance

3.1.1. L'appui du GIEC

Malgré une démarche basée sur le consensus et une approche globale dans le cadre des Nations Unies, les conclusions du GIEC sur l'influence des activités humaines sur le réchauffement climatique peuvent continuer à faire débat.

Dans le secteur de l'aviation, le scepticisme par rapport aux conclusions du GIEC trouve d'autant plus d'écho que les activités aériennes représentent en valeur absolue une faible contribution aux émissions de GES globales.

Les autres effets de l'aviation sur le réchauffement sont, en outre, difficilement modélisables et la métrique proposée par le GIEC pour qualifier l'influence sur le réchauffement global des activités humaines terrestres n'est pas forcément adaptée aux activités aériennes (cf. chap. I, section 1.3).

Enfin, le secteur aérien présente une économie fragile, très dépendante des coûts du pétrole. Cette dépendance a constitué une incitation forte à limiter la consommation de kérosène et à améliorer l'efficacité énergétique des déplacements. Les efforts déjà consentis par le secteur ont effectivement contribué à limiter les émissions de CO_2de l'aviation. Dans cette situation toute démarche qui viendrait à limiter les effets de l'aviation sur l'environnement peut être

vécue par certains acteurs comme une nouvelle contrainte et peut avoir du mal à trouver une légitimité.

C'est pourquoi, il n'existe pas aujourd'hui d'action globale qui vise à limiter les effets de l'aviation sur le réchauffement planétaire, en dehors des émissions de CO_2.

Il s'agit donc d'un véritable sujet d'action publique dans la mesure où aucun des acteurs n'a aujourd'hui d'intérêt direct à limiter ces effets, qui pourtant ne sont sans doute pas négligeables (cf. supra. Chap. I).

Les gouvernements ne se sont engagés que vis à vis de la réduction des émissions des seuls GES, au travers du Protocole de Kyoto. Les professionnels du secteur sont, pour des raisons économiques, particulièrement concernés par l'amélioration de l'efficacité énergétique du transport aérien. La société civile se focalise essentiellement sur la pollution locale et sur les la diminution des GES à laquelle l'aviation, dans le cadre du Protocole de Kyoto, n'a pas à se soumettre.

Le consensus qui a permis l'adoption du Protocole de Kyoto est basé sur le socle commun de connaissance développé par le GIEC sous l'égide de la CCNUCC.

Pour limiter l'impact effectif de l'aviation sur les changements climatiques il apparaît impératif de mettre fin à l'apparente incertitude entourant les effets, hors CO_2, des émissions de l'aviation. Le rapport spécial du GIEC, commandé par l'OACI en 1999 a permis le lancement d'une réflexion. Cette réflexion a lancé de nombreux travaux, mais 10 ans après sa publication, l'essentiel des actions a porté sur la réduction des émissions de CO_2 de l'aviation, car le rapport du GIEC reconnaissait le fort degré d'incertitude existant à l'époque au sujet de la mesure du forçage radiatif de l'aviation.

Même si des travaux ont été publiés récemment (DLR, étude du CE Delft[30]), le fait qu'ils ne soient pas repris par un groupe d'experts à la légitimité et à la visibilité globale, ne permet que difficilement la mise en œuvre de mesures nouvelles. L'incertitude qui semble entourer les effets de l'aviation sur le climat (hors CO_2) ne permet pas une mobilisation de l'ensemble du secteur.

[30] Le CE Delft est un cabinet de recherche et de consulting à but non-lucratif, spécialisé dans les questions environnementales et leurs implications socio-économiques

Le bilan qui pourrait être fait des actions menées, dans le cadre de l'OACI, depuis le Protocole de Kyoto pourrait être jugé très insuffisant. Dans la perspective des négociations de l'après Kyoto, qui s'ouvriront à Copenhague en décembre 2009, l'hypothèse d'une « reprise en main » par la CCNUCC n'est pas à exclure. L'aviation pourrait se voir imposer des limitations qui pourraient se révéler très pénalisantes sur un plan socio-économique.

Dans une logique de développement durable il importe pourtant de pouvoir concilier protection de l'environnement et développement. La multiplication des échanges entre les peuples, les pays et les continents est un apport décisif du transport aérien, qu'il convient de ne pas remettre en cause.

3.1.2. Une base de données et de modèles de référence

Dans cette logique, il apparaît tout aussi fondamental de développer des modèles de calcul et de données de référence. La multitude des modèles de trafic, des modèles de calcul des émissions des avions ainsi que la diversité des sources de données rendent très difficile la mesure des impacts du transport aérien ce qui limite également la détermination du potentiel des technologies qui visent à limiter les nuisances de l'aviation et l'évaluation des politiques publiques associées.

De nombreux chiffres sur l'impact environnemental du transport aérien sont publiés par divers organismes. Ces chiffres sont parfois contradictoires ou contestés. Une base de référence fiable est nécessaire pour parvenir à un diagnostic qui puisse être partagé par un maximum d'acteurs et qui puissent venir à l'appui des décisions publiques.

Une telle base pourrait contribuer à l'orientation des recherches du secteur, à l'élaboration des futures réglementations. Elle pourrait permettre d'encadrer et de légitimer la communication des acteurs sur les performances atteintes et les axes de progrès envisagés.

3.1.3. Préservation d'une formation des hommes et femmes au meilleur niveau

Une politique de formation qui est du ressort principalement des Etats est le complément indispensable pour assurer le renouvellement et/ou le renforcement des compétences techniques nécessaires au développement d'un socle commun de connaissance.

3.2. L'élaboration d'une dynamique commune

La prise de conscience récente de la nécessité d'œuvrer pour limiter l'impact des activités humaines sur le climat n'aurait pas été possible sans la construction d'une dynamique globale

par la CCNUCC depuis la conférence de Rio en 1992, autour d'une connaissance partagée des déterminants du changement climatique.

Au plan national, le Grenelle de l'environnement a initié une réflexion collective au travers d'un nouveau mode de gouvernance associant l'Etat, les collectivités territoriales, les entreprises, les syndicats et les associations (aussi appelée « gouvernance à cinq ») basée sur le débat public et participatif, qui a indéniablement contribué à l'émergence d'une conscience partagée pour des modes de production et de consommation durables.

Cette approche consistant à mettre en réseau les savoirs, à partager les points de vue, à créer les conditions d'un dialogue entre des acteurs, qui à l'origine peuvent avoir des intérêts divergents, crée les conditions nécessaires à l'émergence de solutions adaptées et à l'acceptation des mesures qui doivent être mises en œuvre. C'est pourquoi, en matière environnementale, les moyens d'action publique, comme la négociation d'accords volontaires ou l'animation de réseaux, qui permettent la construction d'une dynamique commune doivent faire l'objet d'une mise en œuvre prioritaire.

3.2.1. Les accords volontaires

Les accords volontaires peuvent être de plusieurs types :

- Des engagements unilatéraux, au sein d'une entreprise qui se fixe une ligne de conduite pour sa démarche environnementale et en communique les résultats.
- Des accords privés entre un acteur économique et des agents qui subissent une pollution
- Des accords négociés entre agents économiques et pouvoirs publics

Les engagements unilatéraux, sous douter de leur sincérité, sont pour les entreprises l'occasion de faire la promotion de leur « exemplarité environnementale ». La recherche d'une image « éco-responsable » revêt aujourd'hui une importance capitale dans le jeu concurrentiel. Il est dès lors très difficile pour le public de faire la part des choses entre ce qui relève d'un réel effort environnemental et ce qui relève d'un simple habillage. Il est aussi très difficile d'établir des comparaisons d'efficacité entre entreprises, puisqu'il s'agit de démarches individuelles.

Les accords privés peuvent comporter de réels effets pervers lorsque l'ensemble des victimes de la pollution n'est pas représenté dans l'accord. Ils peuvent conduire à entériner un niveau de pollution jugé acceptable par les agents qui ont le pouvoir de négociation le plus fort vis à

vis de l'entreprise, quand bien même il serait objectivement inacceptable pour des agents plus « faibles ».

Les accords négociés entre agents économiques et pouvoirs publics le sont le plus souvent sous la menace brandie par ces derniers du déploiement de mesures coercitives. Comme précisé dans le rapport Giblin, le plus souvent cette approche conduit à un accord qui ne va pas au-delà de ce qu'aurait été l'évolution naturelle en l'absence d'accord. L'exemple cité dans le rapport de 2005 des compagnies japonaises s'engageant à réduire leur consommation par PKT de 1% par an en est une parfaite illustration. Cet accord correspond ni plus ni moins à la tendance observée ces dernières années qui a vu l'efficacité du transport aérien progresser de 10% tous les 10 ans (« Les Entretiens de Toulouse » - Air France, 7 et 8 avril 2009).

Ces accords offrent peu de garanties en terme d'efficacité environnementale et peuvent être un prétexte à un ajournement de mesures plus contraignantes. Cette approche est de plus très sensible au contexte socio-économique, où en période de crise, la priorité peut aller préférentiellement à la préservation de l'emploi ou au développement économique plutôt qu'à la protection de l'environnement.

Ces accords sont le résultat d'un rapport de force entre les différents acteurs et tout particulièrement entre les pouvoirs publics et les professionnels. C'est pourquoi, comme le démontrait le rapport Giblin, ils ne peuvent, seuls, constituer un instrument efficace de réduction de la pollution.

Ils sont cependant un point de passage obligé pour créer une dynamique commune en matière environnementale.

C'est pourquoi, le transport aérien français a été sous l'impulsion du MEEDDAT et de la DGAC l'un des premiers secteurs, à prendre des engagements environnementaux dans le cadre du Grenelle de l'environnement en janvier 2008.

La signature de cette convention constitue la première étape de la recommandation n°1[31] du rapport interministériel de 2005.

[31] Fédérer les opérateurs (aéroports, contrôle aérien) au niveau français puis européen dans un engagement volontaire sur un ensemble d'actions à mener dans les 10 ans à venir, pour améliorer l'efficacité énergétique globale et les performances environnementales du transport aérien en Europe, complémentaire de l'action des compagnies. S'appuyer sur l'AEA et l'AIA en utilisant les travaux déjà entrepris dans ces deux associations. Harmoniser notamment les mesures locales prises au niveau des grandes plates-formes aéroportuaires. »

3.2.2. L'animation de réseau

L'animation de réseaux constitue un autre moyen pour créer et surtout pour entretenir une dynamique commune et des connaissances partagées entre les différents acteurs.

Diminuer l'impact sur le climat de l'aviation représente un enjeu d'une très grande complexité : la problématique est globale, le secteur est très concurrentiel, les investissements sont lourds, les exigences de sécurité sont très élevées. Un progrès dans un domaine peut avoir des effets pervers dans un autre domaine. La question des carburants illustre parfaitement cette complexité. Le développement d'un biokérosène exige de faire appel à des compétences dans de très nombreux domaines techniques, environnementaux et socio-économiques. La mise en réseau de ces compétences est un moyen de l'action publique pour faciliter l'émergence de solutions durables.

A la suite de la signature de la convention du secteur aérien en janvier 2008, a été installé le conseil stratégique pour la recherche aéronautique civile française (CORAC), sur le modèle du conseil ACARE.

Le CORAC a vocation à faciliter l'orientation des recherches du secteur, à permettre l'élaboration de réglementations pertinentes et à autoriser une communication large et « objective » sur les performances atteintes par le transport aérien et les axes de progrès poursuivis (source DGAC/SDC).

L'installation de ce conseil, l'initiative future carburant aéronautique en son sein et les budgets alloués au soutien à la recherche aéronautique civile répondent directement aux recommandations n°2[32] et n°3[33] du rapport Giblin.

La création du CORAC est ouvertement portée par une nouvelle façon d'envisager, d'orienter et de conduire la recherche française dans le secteur aéronautique, grâce à une approche plus

[32] Réorienter les programmes de R et D sur des objectifs environnementaux et plus particulièrement sur la lutte contre le changement climatique :
- mieux connaître les aspects spécifiques de l'effet radiatif du transport aérien (CT/MT)
- améliorer la composition du kérosène (soufre et aromatiques) (CT)
- identifier les mesures prioritaires dans le programme ACARE en ce qui concerne notamment les moteurs, l'aérodynamisme, les matériaux composites (CT/MT)
- développer une filière industrielle de kérosène de synthèse à partir de la biomasse (MT/LT)
- conduire parallèlement un programme de recherches avancées faisant suite notamment au projet cryoplane (LT)

[33] Financer ce programme au niveau national et européen :
- par un redéploiement des moyens budgétaires et un accroissement éventuel à justifier dans le cadre du PCRD accompagnant l'effort propre des industries aéronautiques et pétrolières.
- par un abondement financé par le produit des outils économiques visés au point 5 via une « fondation européenne » pour la recherche aéronautique.

collaborative et plus consensuelle entre les différents acteurs, qui répond à la nécessité d'établir une dynamique commune.

3.2.3. Exercice d'une stratégie d'influence

Comme cela a été souligné à plusieurs reprises, aucune mesure ou évolution technologique dans le domaine aéronautique ne saurait se concevoir sans une dimension internationale, à cause de la portée globale des réglementations, de la mondialisation des acteurs industriels et des opérateurs, et de la portée mondiale des standards appliqués dans le domaine. Par ailleurs l'efficacité des mesures et la facilité de leur mise en œuvre résulteront des coopérations ou échanges qui auront pu être tissés préalablement.

La mise en place de relais dans les différentes instances supranationales parties prenantes de l'activité aéronautique doit s'appuyer sur une stratégie d'influence définie au niveau national.

3.3. Les instruments normatifs de réduction des émissions

3.3.1. Les critères de comparaison des instruments de réduction des pollutions

Afin de comparer différentes mesures aux mécanismes et aux champs d'application variés, il convient de définir des critères selon lesquels ils peuvent être évalués. Dans le cadre de cette étude les critères d'évaluation suivants sont retenus :

Critères Politiques

La mise en place de mesures de nature à modifier le comportement des acteurs de manière limiter une pollution nécessite la prise en compte de critères politiques :

Gouvernance :

La gouvernance comprend les phases de conception du dispositif, la détermination des niveaux de décision, de gestion et d'évaluation.

Communication :

Parmi les critères politiques figure aussi la communication nécessaire aux différents stades de la mise en œuvre d'un dispositif. La communication conditionne la bonne gouvernance et l'acceptabilité de la mesure et dépend de l'agenda politique du moment.

S'agissant de questions environnementales, la communication peut aussi s'analyser dans le temps. C'est pourquoi nous distinguerons à chaque fois que nécessaire, la communication continue qui permet de préparer un public à la nécessité d'une action et la communication évènementielle.

Acceptabilité :
L'acceptabilité est l'adhésion des différents acteurs socio-économiques à l'instrument d'action publique mis en œuvre. Elle dépend du contexte socio-économique, du mécanisme lui même, de la manière dont il a été conçu (concertation) et de son efficacité estimée.

Critères socio-économiques
Les critères socio-économiques relèvent de deux préoccupations : l'équité vis à vis des mesures prises et la redistribution lorsqu'il s'agit d'instruments économiques. L'équité est évaluée par rapport à l'exposition à la pollution, aux ressources financières et par rapport aux alternatives de comportement qui s'offrent aux acteurs. La redistribution est évaluée sous l'angle du double-dividende.

Critères technico-économiques
Les critères technico-économiques sont ceux qui permettent de qualifier l'efficacité et l'efficience d'une mesure. En matière environnementale, l'évaluation de l'efficacité d'un instrument suppose de pouvoir étudier les gains environnementaux apportés par la mesure ce qui représente en règle générale de réelles difficultés méthodologiques.

L'évaluation de l'efficience d'une mesure environnementale relève de la même démarche que pour toute mesure d'action publique et porte avant tout sur l'évaluation de sa mise en œuvre pratique :

- évaluation des coûts de définition du périmètre de la mesure et de son application.
- Pour les mesures économiques, évaluation de la facilité à définir l'assiette et du coût de recouvrement des sommes en jeu.

Critères politiques

Gouvernance du dispositif	Phase de conception du dispositif Décision Mise en œuvre
Echelle géographique	Niveau de décision Niveau d'application
Communication	Agenda de l'actualité Acteurs de la communication (association, gouvernement, élus…)
Acceptabilité de la mission, des objectifs, de l'instrument	Contexte socio-économique Mécanisme Elaboration de la mesure

Critères socio-économiques

Equité sociale	Equité face à la pollution Equité face aux revenus Equité face aux alternatives de comportement possibles
Affectation des ressources éventuelles	Double-dividende

Critères technico-économiques

Efficacité	Efficacité environnementale estimée Recettes générées
Efficience	Coûts administratifs Coûts de déploiement Déformation du comportement économique des acteurs

Tableau 8-Tableau des critères d'évaluation d'une mesure d'action publique

3.3.2. Les normes, règlements et interdictions

Ces instruments fixent des niveaux d'utilisation et des règles de restriction assortis de sanctions pour limiter les dégâts environnementaux que peuvent occasionner certaines activités.

Les normes ne constituent pas d'un point de vue socio-économique le moyen le plus efficace pour réduire l'impact d'une activité sur l'environnement. Par nature les instruments normatifs sont d'application peu différenciée ce qui ne permet pas aux différents acteurs « d'égaliser leurs coûts marginaux de dépollution ». En d'autres termes, l'application uniforme de normes coûte plus cher à ceux des acteurs dont la situation socio-économique ne permet pas facilement de recourir à des techniques de dépollution, soit parce qu'elles sont inexistantes soit parce qu'elles sont trop coûteuses ce qui peut induire une distorsion du jeu concurrentiel parmi les acteurs économiques ou des problèmes d'équités sociales parmi les individus.

Avec les normes ou règlements l'équité face à la pollution et l'équité socio-économique peuvent être contradictoires.

Les instruments normatifs présentent néanmoins le grand intérêt, du point de vue de l'action publique, d'être de mise en œuvre facile et peu coûteuse ce qui ne signifie pas que les questions de l'administration et du contrôle des normes peuvent être négligées, bien au contraire. Déterminer quels acteurs sont chargés de l'administration ou du contrôle d'une mesure normative constitue un véritable enjeu d'action publique.

Les instruments normatifs présentent, par ailleurs, une réelle efficacité du point de vue environnementale, tout particulièrement vis à vis des polluants locaux.

Dans le secteur de l'aviation, sous l'égide de l'OACI, l'adoption de normes de plus en plus sévères a ainsi permis une réelle amélioration du niveau de bruit et des émissions polluantes dans les phases d'approche et de décollage (cycle LTO, landing / take off) des aéronefs.

Pour limiter l'impact de l'aviation sur les changements climatiques trois types de normes peuvent être envisagés : les normes sur la performance énergétique des appareils, les normes sur les émissions (autres que CO_2) et les normes sur le carburant (cf. chap. 4, section 4.3).

L'analyse multicritère des normes comme instrument de réduction de la pollution de l'aviation figure dans les tableaux en annexe 4.

Norme sur l'efficacité énergétique des appareils :

Le groupe de travail interministériel indiquait en 2005 que les normes sur l'efficacité énergétique n'étaient sans doute pas très efficaces. Selon les critères de notre analyse, nous pouvons en effet penser que l'impact environnemental de normes portant sur la consommation par siège kilomètre, pour chaque type d'appareil, serait minime. La mesure ne prend pas en compte la réalité de l'exploitation et n'est pas indexée sur le niveau de pollution effectif, qui dépend du nombre de kilomètres réellement effectués. La mesure rapportée au nombre de sièges pourrait, en outre, conduire à favoriser les très gros porteurs voire les aménagements de cabines de « circonstance » qui conduiraient à une multiplication du nombre de sièges mais pas nécessairement du nombre de voyageurs.

La définition de l'indicateur d'efficacité est donc cruciale. La consommation par passager-kilomètre ne permet pas de fixer des normes d'efficacité satisfaisantes.

L'étude des performances opérationnelles des aéronefs permet néanmoins d'avancer sur une autre voie. Elle montre en effet que les appareils présentent des limitations de capacité liées à l'emport de carburant.

La charge transportable par un avion est avant tout limitée par sa structure. La charge maximale de structure est la charge à ne pas dépasser pour que l'appareil puisse décoller de manière suffisamment performante (limitation par la longueur des pistes) et atterrir sans s'endommager (limitation par la résistance des trains). Les vols longs et très longs courriers imposent d'embarquer une grande quantité de carburant pour augmenter la distance franchissable sans escale. Ceci peut limiter la charge commerciale de l'appareil, pour rester dans les limites de la masse maxi de structure ou de la masse maxi au décollage.

Les tableaux ci-dessous illustrent les limitations de la charge transportable pour deux appareils de catégories équivalentes :

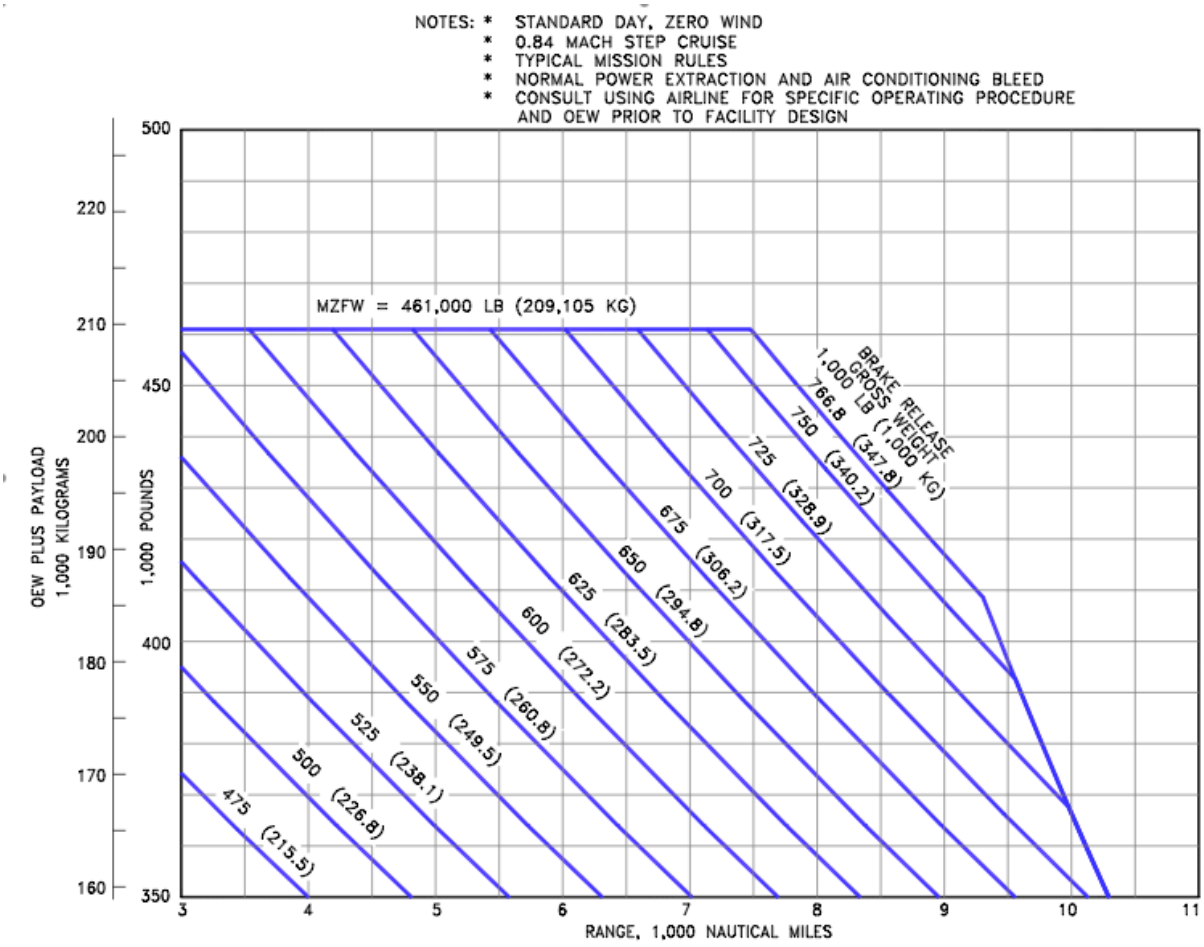


Figure 23-Diagramme Payload/Range Boeing 777 (BOEING, 2004), (ENAC-Yves Bienvenu, 2009)

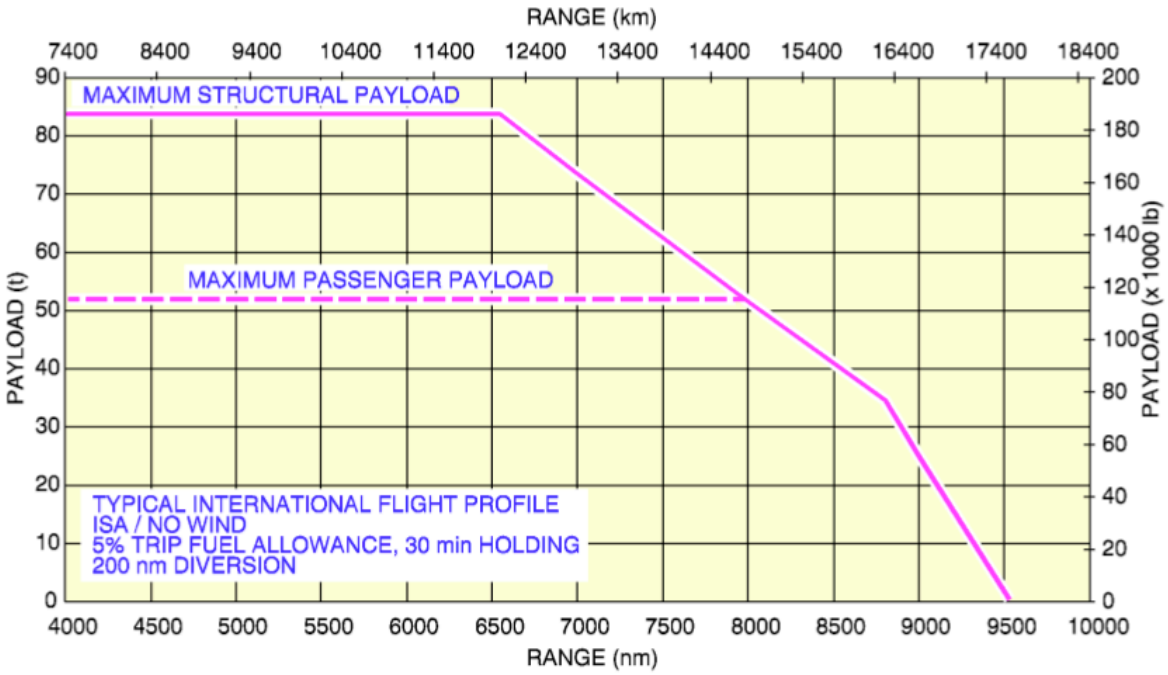


Figure 24-Diagramme Payload/Range Airbus A380 (Airbus, 2003), (ENAC-Yves Bienvenu, 2009)

Les documents de Airbus et de Boeing indiquent qu'au-delà de respectivement 12.000 km et de 14.000 km la charge transportable diminue en fonction de la distance à atteindre pour pouvoir embarquer le carburant nécessaire au vol. Cette diminution peut limiter le nombre de passagers.

Certains vols très longs courriers sans escale s'apparentent donc dans une certaine mesure à du transport de carburant. Ces pratiques vont à l'encontre des gains d'efficacité revendiqués par chacun des acteurs. Sans aller jusqu'à limiter l'autonomie des appareils à 5.000km comme le suggère Georges Ville, ancien directeur financier d'Airbus[34], une norme limitant le rayon d'action des avions à leur « secteur utile » permettrait de mettre un frein à un cercle vicieux : la structure des appareils est alourdie pour pouvoir supporter une grande quantité de carburant. Ces grandes quantités de carburant limitent la capacité des appareils. En augmentant le temps de vol elles imposent de fournir au passager toujours plus de divertissements à bord, ce qui contribue à augmenter le poids des appareils (systèmes vidéo, catering etc…). Le vol sans escale correspond certes à une demande des passagers, mais au-

[34] M. Ville estime que malgré les pénalisations liées au décollage et à la montée d'un avion, sur très long-courrier, les escales pour ravitaillement auraient un impact positif sur la consommation globale. Selon lui l'optimum se situe entre 3.000 et 4.000 kilomètres. Les consommations augmentent de 20 %, pour les destinations au-delà de 10 000 kilomètres, de 40 % au-delà de 15 000 kilomètres et de 60 % au-delà de 20 000 kilomètres. Source : Académie de l'Air et de l'Espace – juin 2004.

delà d'une certaine distance, il implique une surconsommation de carburant et donc des émissions supplémentaires.

Elaborer une norme contraignant les compagnies à faire des escales de ravitaillement plutôt que d'emporter de trop grandes quantités de carburant serait un premier pas vers une optimisation de la conception des aéronefs en fonction de ce critère plutôt qu'en fonction de la recherche du plus grand rayon d'action.

Henri Hurlin, responsable de la flotte courts et moyens courriers d'Air France est convaincu de l'existence d'un marché pour des appareils optimisés pour de courtes distances. Il rappelle à ce propos que les vols courts et moyens courriers représentent une part considérable de l'activité de la compagnie française et de nombre de ses concurrentes européennes ce qui correspond à l'évaluation selon laquelle en 2005, 40% des 7,5 millions de vols annuels dans les 41 pays de la Conférence européenne de l'aviation civile (CEAC) ne dépassaient pas 500km (Forum Européen de l'Energie et des Transports, 2005). Selon les prévisions d'Airbus, le marché des petits appareils bi-couloir devrait effectivement plus que doubler à l'horizon 2023 (Airbus - Global Market Forecast 2004-2023, 2004).

Normes sur les émissions polluantes :

L'instauration de normes de plus en plus sévères en matière de bruit et d'émissions de NO*x* a été possible, car la majorité des acteurs du secteur a pris conscience que ces normes sur les nuisances locales sont utiles au développement de l'aviation. Le niveau de pollution locale engendrée par la circulation des aéronefs autour et sur les aéroports constitue en effet un frein majeur à l'acceptabilité des activités aériennes par les riverains. Cette vision est aujourd'hui assez bien partagée mais cela n'a pas toujours été le cas. Historiquement, les normes proposées par certains Etats ont pu être perçues comme des outils à visée protectionniste. L'aviation est une activité internationale par nature ce qui rend très difficile l'établissement de normes décidées localement. Les approches unilatérales sont en effet totalement exclues par la convention de Chicago.

Depuis 1998, dans le cadre du CAEP, les Etats sont invités à travailler à la réalisation d'analyses et de propositions consensuelles pour limiter les nuisances environnementales engendrées par l'aviation. Cette démarche basée sur le dialogue permet une approche équilibrée, dans la mesure où chacun peut exposer ses contraintes et objectifs.

Dans cette démarche, chacun des acteurs (industriels, exploitants, aéroports, pouvoirs publics) a une vision stable de l'évolution des exigences environnementales qui seront appliquées à l'aviation commerciale. La gouvernance multilatérale de l'OACI contribue à améliorer l'acceptabilité et donc l'efficacité des normes CAEP.

Le rapport Giblin indiquait en 2005 « qu'une action sur les normes de NO*x* semblait adaptée ». L'argument présenté par le groupe de travail interministériel reposait sur la correspondance entre les progrès environnementaux imposés par les normes du cycle LTO et les gains induits sur les rejets en croisière. Les NO*x* contribuant au forçage radiatif des aéronefs, un durcissement des normes du cycle LTO sur ces émissions devrait aller dans le sens d'une limitation des effets de l'aviation sur le changement climatique.

Le recours à la norme est justifié tout à la fois par la dualité de la pollution (locale et globale) et par la nécessité de garantir que les incitations à la réduction des émissions de CO_2 ne s'accompagnent pas d'une augmentation des émissions de NO*x* (cf. chap. 2, section 2.5.1).

La norme CAEP6, entrée en vigueur depuis le 1er janvier 2008, impose une réduction des émissions de NO*x* de 12% par rapport à la norme CAEP4. Les objectifs ACARE sont encore plus ambitieux. Tout ceci incite les motoristes et les avionneurs à développer de nouvelles technologies pour répondre au durcissement programmé des normes d'émissions. Parmi celles-ci figure le développement des injecteurs multipoints. Cette technologie autoriserait un meilleur contrôle de l'injection de carburant ce qui permettrait d'obtenir des mélanges air/carburant plus homogènes et un meilleur refroidissement des chambres de combustion. Le développement de technologies d'injection sophistiquées permettra un fonctionnement des moteurs optimisé en fonction des différentes contraintes auxquels ils devront répondre. Ces technologies permettront d'avoir des moteurs dont le fonctionnement pourra présenter plusieurs facettes selon les phases de vol.

On peut craindre qu'en l'absence de normes sur les émissions de NO*x* en croisière, les motoristes privilégient la diminution de la consommation durant cette phase de vol. Ce choix stratégique pourrait se faire au détriment des émissions de NO*x* (cf. Figure 22) pour lesquelles il n'existerait aucune limite.

En adoptant la même approche que pour l'établissement de normes pour les polluants locaux, il paraît utile de mettre à l'agenda du CAEP, une réflexion sur la définition de normes

relatives aux phases de croisières, qui auraient pour objectif de limiter les émissions de Nox et de particules.

Normes relatives à la composition des carburants :

Les taux de soufre autorisés par les diverses spécifications s'appliquant à la certification des carburants ne répondent pour l'essentiel à aucun objectif environnemental. Le contrôle des spécifications du carburant aéronautique est du ressort des pétroliers. Les acteurs publics n'ont eu jusqu'ici que très peu d'influence sur la composition des carburants aéronautiques. Pourtant, les normes sur les carburants ont fait leurs preuves dans le secteur automobile.

L'amélioration de la composition des carburants doit accompagner les progrès réalisés dans les autres domaines, motorisation, cellule et exploitation plutôt que d'en constituer un facteur limitant.

La mise en place de normes sur les émissions en croisière doit s'accompagner de normes sur la composition du kérosène visant à en réduire le taux de soufre et d'aromatiques.

Les normes sur la composition du kérosène peuvent être implémentées à des niveaux inférieurs au niveau international. A l'échelle européenne ou même française, cette approche pourrait être envisagée à la condition que cette démarche de normalisation s'accompagne de l'établissement d'un calendrier à long terme pour garantir à l'ensemble des acteurs une bonne visibilité et leur permettre de s'adapter. Cela ouvrirait de nouvelles perspectives aux progrès qui pourraient par ailleurs être réalisés sur les moteurs, les cellules et plus généralement tout ce qui touche à l'exploitation des aéronefs ; progrès pour lesquels la composition du kérosène constitue un facteur limitant.

Les normes sont, de toute évidence, des instruments d'action publique qui permettent d'encadrer l'impact de l'aviation sur l'environnement en s'assurant que les progrès qui sont attendus dans un domaine, comme celui de l'efficacité, ne se fasse pas au détriment d'un autre comme celui des émissions locales. Toutefois les normes en vigueur ne prennent pas en compte la croissance du trafic, de sorte que les nuisances ont pu croître malgré un durcissement des normes. Du point de vue des populations directement touchées par ces nuisances, l'efficacité des normes d'émission est donc relative. Elles offrent comme seule garantie, celle d'être assurée que les nouvelles générations d'avions seront moins polluantes que les précédentes. C'est pourquoi il paraît fondamental d'associer aux instruments

normatifs d'autres instruments qui ciblent plus directement l'exploitation des aéronefs, comme les instruments économiques.

3.4. Les instruments économiques

3.4.1. Les taxes et redevances

Principes

Si les instruments économiques sont d'usage moins courant que les instruments normatifs, ils sont pourtant étudiés depuis le début du 20ème siècle avec les travaux de Arthur C. Pigou. Le principe est de faire supporter aux agents économiques une taxe à hauteur des effets environnementaux négatifs générés par leurs activités afin de leur faire internaliser le traitement de la pollution. Cette approche présente plusieurs avantages. Elle permet d'orienter les choix des acteurs économiques par l'intermédiaire d'un signal-prix et d'engendrer, par une action déconcentrée, des comportements plus responsables vis-à-vis de l'environnement. Il s'agit d'une approche plus souple que celle des instruments normatifs.

Elle permet enfin de générer des recettes qui peuvent être redistribuées aux agents afin de les aider à réduire leurs émissions (par des actions de soutien à la recherche par exemple), ou bien qui peuvent se substituer à d'autres recettes fiscales (par une diminution de la taxation sur le travail par exemple). C'est ce qui est appelé double dividende : le premier dividende est la réduction de la pollution, le second est la redistribution. L'affectation des ressources est un élément clé de l'utilisation des instruments économiques.

Efficacité, perspectives

Les taxes et redevances peuvent être classées en deux catégories : celles dont l'assiette est directement liée au niveau de pollution réelle et celles dont l'assiette n'y est pas directement corrélée. Dans le secteur de l'aviation entrent dans la première catégorie les taxes sur le kérosène ou la modulation des redevances de route ou d'atterrissage. La taxation des billets d'avion entre dans la deuxième catégorie. Le rapport Giblin avait clairement conclu à l'inefficacité économique et environnementale des taxes sur les billets d'avion. Même si elles étaient assises sur le nombre de kilomètres parcourus, et à fortiori si elles prenaient la forme de taxes forfaitaires, les taxes sur les billets d'avion ne constitueraient pas pour les compagnies une incitation à minimiser leurs émissions. Les taxes ou redevances assises sur le niveau réel des émissions, dont une taxe sur le kérosène serait la traduction, constituent un instrument de réduction plus efficace. Mais dans le secteur du transport aérien, international par nature, l'instauration de taxes pose plusieurs problèmes. En termes de gouvernance, tout

d'abord se pose de manière cruciale la question de l'échelon de collecte de la taxe. La fiscalité relevant de la souveraineté des Etats, la perspective d'un accord international sur le niveau des taxes et sur les mécanismes de prélèvement semble très lointaine. Sous l'égide de l'OACI, le secteur aérien s'est développé en s'appuyant sur une absence de toute taxation du carburant. L'instauration d'une taxe sur le kérosène viendrait à l'encontre du texte fondateur de la Convention de Chicago. La situation économique et la faible profitabilité des compagnies aériennes les amènent à rejeter vigoureusement toute idée de taxation d'un carburant qui pèse déjà lourdement sur l'exploitation.

L'instauration d'une taxe sur le kérosène au plan international poserait de tels problèmes de gouvernance que le recours à cet instrument semble exclu, malgré sa simplicité et une efficacité environnementale réelle.

La mise en place d'une modulation des redevances de route tenant compte de l'efficacité des appareils n'est pas fondamentalement différente. Dans le cadre de l'OACI, une redevance ne peut être perçue qu'en échange d'un service rendu. Une redevance dont les recettes reviendraient aux Etats qui l'instaurent serait assimilée à une taxe. Une option consisterait à élaborer un système de redevance à revenu constant. La redevance serait plus élevée pour les avions les moins efficaces (et/ou les moins remplis) et serait plus basse pour les plus efficaces. Mais, même dans ce cas il serait difficile de justifier une modulation du tarif pour un service rendu équivalent. La modulation des redevances d'atterrissage en fonction du bruit des appareils est possible car les recettes générées abondent un fond qui sert notamment à aider à l'isolation phonique des logements les plus exposés au bruit. La création d'un fond de compensation des émissions (cf. section 3.4.2) pourrait contribuer à l'acceptabilité du mécanisme par les acteurs. La question qui se poserait alors serait celle de l'évaluation de l'efficacité des mécanismes de compensation (les mécanismes de compensation font l'objet d'une analyse spécifique au chapitre suivant). En outre, comme pour les taxes, les compagnies demeurent très sensibles aux charges qui pourraient leur être imposées, ce qui limite les possibilités de mise en place d'une redevance réellement incitative. La mise en œuvre d'un tel instrument à une échelle nationale ne serait pas exempte d'effets pervers : les compagnies pourraient être tentées de modifier leur route pour y échapper ce qui génèrerait des émissions supplémentaires. Une mise en œuvre coordonnée au niveau de l'OACI serait très fastidieuse et aboutirait à une redevance symbolique pour ne pas perturber l'équilibre déjà fragile des compagnies.

C'est pourquoi les perspectives de mise en œuvre coordonnée d'une modulation des redevances de route réellement incitative sont faibles.

L'analyse multicritère d'une taxe sur le kérosène et d'une modulation des redevances de route comme instrument de réduction de la pollution de l'aviation figure dans les tableaux en annexes 5 et 6.

3.4.2. Les programmes de compensation

Principes

Une autre façon d'améliorer l'incidence des transports aériens sur le climat consisterait à compenser les émissions de GES de l'aviation, en finançant des projets de réduction d'émissions dans d'autres secteurs ou des projets de puits de carbone via le reboisement ou une meilleure utilisation des sols, ou encore en finançant des projets de capture et de stockage de CO_2.

En 1999, la Commission estimait manquer de recul pour évaluer l'efficacité de ce type de mesures et aujourd'hui les actions de compensation ne semblent plus envisagées par les pouvoirs publics pour limiter l'impact de l'aviation sur le réchauffement climatique, même si des projets de recherches sur les techniques de piégeage et le stockage du CO_2, sont encouragés tant au niveau européen que national. Les perspectives peuvent apparaître en effet séduisantes (IPCC - Summary for Policymakers - Special Report Carbon Dioxide Capture and Storage, 2005), mais les risques environnementaux, l'efficacité énergétique et les coûts des techniques PCS font débat (Greenpeace - False Hope, 2008).

Sur la base du volontariat en revanche, il existe des programmes de compensation proposés aux passagers par certains voyagistes (Voyageurs Du Monde - compensation volontaire, 2008) ou certaines sociétés à des tarifs très variés et dont l'efficacité environnementale est laissée à l'appréciation du vendeur.

Afin que le développement de ces dispositifs ne nuise pas à l'objectif premier de réduction directe des émissions de GES et afin d'encadrer les prix proposés et la qualité des programmes de compensation, l'ADEME a créé en 2008 la charte de la compensation volontaire des émissions de gaz à effet de serre.

Efficacité

L'impact environnemental des mesures de compensation dépend tout d'abord de l'efficacité des programmes PSC pour lesquels la recherche est encore à un stade initial. Ensuite, dans la

perspective où la preuve serait faite de l'efficacité de ces programmes, tout dépendrait du niveau d'exigence demandé aux compagnies. Selon que l'on demande une compensation totale des effets de l'aviation sur le climat ou seulement un pourcentage, l'effet environnemental sera évidemment différent.

D'un point de vue économique, imposer aux compagnies la compensation totale ou partielle de leurs émissions aurait un effet comparable à une taxe sur les billets proportionnelle au nombre de kilomètres parcourus. La compensation totale ou partielle imposée aurait donc, en théorie, un effet équivalent à celui d'une taxe sur le kérosène mais avec des coûts de gestion et d'intermédiaires supplémentaires. L'efficacité d'une telle solution serait donc discutable.

Perspectives

Rendre obligatoire la compensation des effets de l'aviation sur le climat ne serait certainement pas une mesure efficace, ni d'un point de vue environnemental, ni d'un point de vue économique. La compensation volontaire est sans doute plus pertinente et répond certainement à un acte militant ou de charité. Néanmoins pour éviter les effets pervers que peut engendrer l'achat à bon compte d'une bonne conscience écologique, il était sans doute indispensable que les pouvoirs publics cherchent à encadrer les pratiques en ce domaine. En l'état, la charte de l'ADEME répond à ce besoin et l'extension ou la promotion de la compensation volontaire pour les voyageurs aériens ne sauraient constituer une voie d'action publique prioritaire.

3.4.3. Les marchés de permis d'émission

Principe

En théorie, marché de permis d'émission et taxe environnementale ont la même efficacité. Une taxe assise sur la pollution instaure une régulation par le prix alors qu'un marché instaure une régulation par la quantité. Toutefois, dans le cas particulier de l'aviation où les solutions pour diminuer la pollution sont peu nombreuses et/ou coûteuses (le secteur aérien présente des coûts marginaux de dépollution parmi les plus élevés) l'instrument marché de permis d'émission peut se révéler plus efficace qu'une taxe. L'inclusion du secteur aérien dans un marché ouvert à d'autres secteurs, permettrait en effet une plus grande réduction de la pollution à un coût pour les acteurs aériens équivalents à celui d'une taxe spécifique, comme une taxe sur le kérosène par exemple.

Efficacité, perspectives

C'est pourquoi de nombreuses analyses concluent à la pertinence de l'inclusion du transport aérien dans un mécanisme multisectoriel d'échange de permis d'émission. C'est le cas d'une étude commandée par la Commission Européenne au cabinet CE Delft en 2005 (CE-Delft - Final Report, 2005), et c'est une des principales conclusions du rapport Giblin à la même époque. En 2001, l'assemblée de l'OACI avait déjà validé le principe d'intégrer l'aviation dans un système d'échange de quotas d'émission.

C'est sur cette base théorique que l'Union Européenne a décidé d'intégrer les activités aériennes dans le système communautaire d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre en adoptant, le 13 janvier 2009, la directive 2008/101/EC.

L'analyse multicritère de l'inclusion du secteur aérien dans le mécanisme ETS comme instrument de réduction de la pollution de l'aviation figure dans les tableaux en annexe 7.

La démarche européenne est une action phare d'une politique de réduction des émissions de GES de l'aviation. Elle concrétise les recommandations qui avaient pu être émises à l'occasion de nombreuses études théoriques. Dans le cadre du présent rapport, il nous est apparu important de revenir en détail sur la mise en œuvre de cette mesure volontariste et de souligner les questions qui peuvent demeurer en suspens.

L'inclusion volontariste de l'aviation au sein du système communautaire d'échange de quotas d'émission de GES…

Le mécanisme

Il existe deux façons de limiter les émissions d'un polluant avec des permis d'émission. La méthode dite « Cap and Trade » et le système « Baseline and Credit ».

Le système « Cap and Trade » consiste à fixer un niveau d'émission à ne pas dépasser sur une période donnée, à créer des droits d'émissions (les permis) qui correspondent à une fraction du plafond fixé, et à les distribuer aux agents économiques responsables de ces émissions. Les détenteurs de permis s'échangent ces droits d'émissions sur le marché. L'offre est constituée par ceux des acteurs dont le niveau d'activité baisse ou dont les activités présentent des coûts de dépollution les plus faibles et qui de ce fait peuvent mettre en vente les permis d'émission dont ils n'ont pas besoin pour poursuivre leur activité. La demande est constituée par les acteurs dont l'activité croît ou dont les coûts de dépollution sont plus élevés et pour qui la dotation initiale en permis d'émission ne permet pas de couvrir les besoins.

Le système « Baseline and Credit » consiste à imposer sur la base d'une année de référence un objectif de réduction sur une période donnée. Un crédit d'émissions, qui peut être différencié, est attribué à chaque acteur. Dans ce cas les acteurs qui se sont engagés dans une démarche de dépollution leur permettant de présenter une réduction des émissions supérieure à l'objectif, peuvent revendre leurs crédits de réduction aux acteurs qui n'ont pas pu se conformer à l'objectif de réduction global.

L'allocation des crédits ou des permis peut se faire gratuitement ou aux enchères.

La question de l'allocation est essentielle et, de ce point de vue, les questions qui se posent ne diffèrent pas sensiblement de celles qui président à l'instauration d'une taxe dont il faut définir l'assiette. Une sur-évaluation de la quantité de permis peut conduire à un effondrement de leur valeur qui limite le caractère incitatif de l'instrument, comme pour une taxe dont le niveau serait trop faible. Une sous-évaluation pourrait à contrario se révéler particulièrement pénalisante pour les acteurs dont les possibilités d'abattement sont inexistantes.

Le mécanisme retenu par l'Union Européenne est de type « Cap and Trade ». La directive laisse la possibilité aux Etats de mettre aux enchères une partie des permis d'émission (15%), notamment pour couvrir les frais de mise en place et de suivi du dispositif, mais la majorité des permis seront alloués gratuitement aux compagnies dans un premier temps.

Le niveau d'allocation se fait sur la base de la consommation moyenne des années 2004, 2005 et 2006 estimée par Eurocontrol et consolidée, au niveau Français, par la DGAC. Les quotas seront alloués sur la base d'une moyenne des émissions de l'ensemble des transporteurs aériens soumis rapportées à la tonne-kilomètre-transportée ou au passager-kilomètre-transporté de manière à ne pas avantager les compagnies qui n'auraient pas accomplis des investissements pour renouveler leur flotte préalablement à l'entrée en vigueur de la directive.

Le mécanisme européen prévoit une réserve spéciale de 3% du total des quotas destinés à être alloués aux compagnies nouvelles ou à celles à très forte croissance qui n'auraient pas été identifiées au cours de la phase initiale d'allocation des quotas.

Le périmètre

La question du champ d'application est déterminante pour la faisabilité de l'inclusion du transport aérien.

Pour des raisons juridiques, le rapport Giblin préconisait d'inclure dans le mécanisme communautaire les seuls vols intérieurs à l'Union, qu'ils soient opérés ou non par une compagnie européenne. Cette inclusion partielle devait constituer une première étape alors que parallèlement le dossier de l'inclusion de l'aviation internationale devait progresser au niveau de l'OACI.

La lenteur de la progression du dossier à l'OACI a sans doute servi d'argument aux députés européens pour inclure dans le mécanisme l'ensemble des vols au départ ou à l'arrivée de l'Union. Mais cette inclusion n'est pas sans faire débat au sein de l'OACI puisque des vols à destination ou en provenance de pays non annexe I (et donc non soumis aux objectifs de réduction de leurs émissions de GES) seront soumis au mécanisme européen.

Cette situation induit un risque réel de recours juridique d'un pays tiers vis à vis de l'Union avec de possibles mesures de rétorsion à l'encontre de compagnies européennes, selon Jean-Michel Bour, sous-directeur des affaires internationales à la DGAC.

Au sein de l'Union la gestion et le suivi des déclarations d'une compagnie non européennes est confié au pays membre qui en accueille l'essentiel du trafic. Les quotas seront attribués directement aux exploitants pour l'ensemble de leurs vols opérés vers ou au départ de l'Union.

En accroissant le volume d'émissions couvert par le mécanisme, cette approche répond clairement à un objectif d'efficacité environnementale plus qu'à celui d'acceptabilité internationale.

L'exclusion des vols des compagnies non européennes aurait certes permis d'éviter le risque juridique d'une approche unilatérale, mais aurait à la fois induit une distorsion de concurrence entre compagnies communautaires et compagnies extra-communautaires et aurait limité l'efficacité environnementale.

L'allocation des quotas directement aux exploitants et non aux Etats répond elle aussi à un souci d'efficacité environnementale.

Attribuer les émissions des vols internationaux aux Etats, qui resteraient libres des mesures à entreprendre pour maîtriser les émissions du transport aérien pose plusieurs questions. Tout d'abord celle de l'appartenance ou non de l'Etat, à l'annexe I du Protocole de Kyoto. Ensuite, d'un point de vue pratique comment déterminer de quel Etat dépend un vol ? Plusieurs

solutions peuvent être étudiées[35], mais aucune ne vaut l'allocation des quotas directement aux compagnies qui sont responsables de l'exploitation des aéronefs.

La directive européenne prévoit toutefois que dans l'hypothèse où un système analogue serait mis en place dans une autre région du monde, les vols à destination ou en provenance de l'Europe, qui y seraient soumis, seraient en totalité ou en partie non comptabilisés dans le système communautaire. Mais dans cette perspective la question de la clé de répartition entre les deux systèmes restera entière.

Questions soulevées par l'inclusion de l'aviation dans l'ETS

Le secteur aérien accueille plutôt bien les permis d'émission. L'agenda politique, marqué par une nouvelle administration américaine plus sensible aux questions environnementales et les choix effectués dans la conception du dispositif réduisent le risque de recours juridiques contre l'un où l'autre des pays membres devant l'OACI, malgré le caractère unilatéral de la démarche européenne. L'inclusion du secteur dans un marché existant déjà pour d'autres secteurs d'activité, où les coûts de réduction des émissions sont sans doute plus faibles devrait permettre d'arriver à une limitation des émissions à un coût plus faible que ce qu'il aurait été si une taxe, comme une taxe sur le kérosène, avait été instaurée.

Cela ne doit pourtant pas occulter les questions que la mise en œuvre pratique de cette mesure suscite au regard des enjeux environnementaux et économiques.

La non prise en compte des autres effets de l'aviation sur le climat

La directive ETS pour l'aviation se base exclusivement sur les consommations de carburant des trajets aériens en provenance, ou à destination de l'Union. Cette mesure constitue donc une incitation supplémentaire pour les compagnies à limiter les consommations de carburant. Or le secteur aérien dans son ensemble est déjà très largement sensibilisé à l'impérieuse nécessité de consommer moins. On peut dès lors s'interroger sur l'efficacité réelle de la mesure du strict point de vue de l'influence qu'elle pourrait avoir sur le comportement des acteurs. Elle risque de perturber un peu plus les équilibres recherchés pour limiter les autres

[35] *Attribution des émissions à l'État où le kérosène est vendu*, mais la consommation de carburant attribuable au pays de départ n'est pas réellement représentée du fait des stratégies de « *tankering* »

Attribution des émissions aux États en fonction soit de la nationalité de la compagnie aérienne soit de l'État où l'avion est immatriculé , mais il peut être difficile de définir la nationalité d'une compagnie aérienne multinationale, et certains pays pourraient être pénalisés par la présence sur leur sol de compagnies opérant surtout à l'international

Attribution des émissions aux États en fonction du pays de destination finale du passager

ou de la marchandise mais la collecte d'information nécessaire serait très lourde et coûteuse

nuisances environnementales induites par l'aviation (bruit, émissions locales). Il apparaît donc fondamental d'inclure dans le décompte des émissions non seulement le CO_2, mais aussi les autres polluants qui peuvent avoir un effet sur le réchauffement comme nous l'avons vu en première partie.

Parallèlement, l'approfondissement des recherches en vue de l'établissement d'une connaissance commune doit être poursuivi pour prendre en compte le bilan global des effets radiatifs de l'aviation dans le marché des permis d'émission. A terme le facteur d'émission pourrait être modulé en fonction du type de carburant (faible teneur en soufre, BTL), du type d'aéronefs, ou en fonction des conditions atmosphériques rencontrées suivant les trajets.

La non différenciation du traitement selon les trajets

La directive ETS ne propose aucune différentiation dans la comptabilisation des trajets. Un vol entre l'UE et un pays qui ne figure pas dans l'annexe I du Protocole de Kyoto sera comptabilisé de la même manière qu'un vol entre deux pays de l'annexe I.

Cette absence de différentiation peut être perçue comme contraire à l'esprit du Protocole de Kyoto et pourrait servir de point de cristallisation pour les opposants à la démarche européenne dans les discussions internationales.

Selon Philippe Langumier, représentant de la France au CAEP, ces oppositions sont à relativiser. Des pays comme le Bangladesh, qui ne figurent pas dans l'annexe I, ont fait savoir qu'ils ne s'opposaient pas au principe de la directive européenne estimant que ceux de leur ressortissants qui se déplaçaient en avion pour se rendre en Europe faisaient partie d'une catégorie de population aisée. L'argument selon lequel il ne saurait y avoir de contraintes de réduction des émissions sur les plus pauvres pour ne pas compromettre leur développement ne semblant pas, dans ce cas, recevable.

Cette position ne fait, toutefois, certainement pas l'objet d'un consensus. C'est pourquoi il faudra probablement faire de nouvelles propositions pour s'assurer de l'acceptabilité internationale de la démarche européenne.

Des coûts induits sans doute non négligeables

La directive européenne prévoit l'inclusion des vols commerciaux ou privés dans le marché ETS dès lors que l'appareil appartient à la catégorie des plus de 5,7t au décollage. La directive va concerner un très grand nombre d'acteurs, puisqu'elle s'intéressera également à l'aviation d'affaires. La sous-direction du développement durable de la DGAC a dénombré plus de

quatre cents « compagnies » à suivre par l'administration française, ce qui représente un peu moins du tiers du total des installations fixes françaises[36].

Pour l'administration cet accroissement du nombre de dossiers devrait générer d'importants coûts de mise en place, puis de suivi.

Pour les acteurs du secteur aérien concernés, les règles sont les mêmes que pour un marché classique : les échanges se font de gré à gré *via* des intermédiaires financiers (brokers) pour les plus petits opérateurs ou directement sur des plates-formes boursières spécialisées. Dans tous les cas cette organisation passe par des acteurs privés que les transporteurs devront rémunérer.

Le dispositif suppose en outre une comptabilité précise des émissions « réelles » qui doivent faire l'objet d'une validation par des certificateurs agréés. Pour le secteur aérien, ces certificateurs n'ont pas encore été désignés. Pour les installations fixes, Pierre Guigon responsable produit chez Bluenext (plateforme boursière CO_2) indique que les bureaux environnement des grands cabinets d'audit (Deloitte, KPG, Ernst &Young…) ont obtenus l'agrément de la CCNUCC et devraient en toute logique proposer leurs services aux compagnies aériennes. La certification des déclarations est à la charge des compagnies. Ce qui, pour les plus petites d'entre elles, risque de représenter une charge non négligeable.

En France, la mise en œuvre de l'ETS, depuis janvier 2005, prévoit que la déclaration d'émission des installations fixes est vérifiée par un vérificateur agréé puis contrôlée par l'inspection des installations classées. En France, les vérificateurs reçoivent leur agrément du MEEDDAT. Le contrôle est en pratique assuré par les DRIRE.

Les spécificités du transport aérien plaident pour la mise en œuvre au niveau de la DGAC des opérations d'agrément des bureaux de certification d'une part et de contrôle des déclarations d'autre part (cf. infra. Recommandation IRN CT n°3)

La directive prévoit, en outre, un facteur d'émission égal à zéro pour la biomasse ce qui constitue une incitation bienvenue au développement de biokérosène de type BTL. L'analyse des perspectives d'intégration de BTL dans le carburant aéronautique montre pourtant que les voies seront multiples et les bilans CO_2 diffèreront sensiblement d'une filière à l'autre, ce qui

[36] Il y a environ 1400 installations fixes qui relèvent de l'ETS en France

compliquera et augmentera encore les coûts de gestion et de certification des déclarations d'émissions.

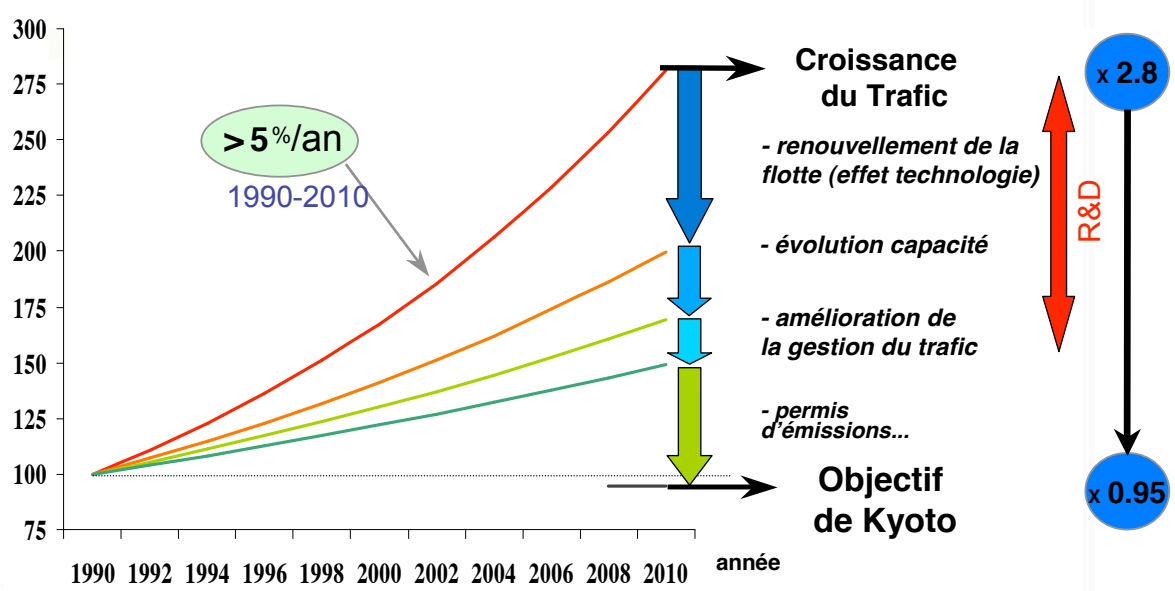
La prise en compte, souhaitable à terme, des autres facteurs de l'effet radiatif de l'aviation risque de compliquer encore un peu plus les mécanismes de déclaration, de certification et de contrôle. L'effet radiatif d'un aéronef n'est pas directement proportionnel à ses seules émissions de CO_2. De nombreux paramètres entrent en ligne de compte, comme la composition du carburant, le type de moteur, la poussée des réacteurs ou les caractéristiques de l'atmosphère traversée (cf. chap. 1, section 1.3.2).

Si au plan européen, l'inclusion de l'aviation dans l'ETS est devenue une réalité avec l'adoption de la Directive 2008/101/EC, au plan international sa mise en œuvre pose encore de nombreuses difficultés. En outre, en ne se focalisant que sur les émissions de CO_2 du secteur, la mesure ne fait qu'ajouter une incitation supplémentaire à une tendance déjà lourde : la réduction des consommations de carburant. L'extension du mécanisme aux autres effets de l'aviation sur le climat aurait permis d'en améliorer l'efficacité environnementale. Le processus de déclaration, certification et contrôle des émissions des compagnies peut paraître assez lourd aussi bien en termes financiers qu'organisationnels, pour les compagnies et pour l'Etat. L'articulation du mécanisme avec celui d'une autre région du monde et l'introduction de carburants alternatifs contribueront à rendre le processus plus complexe encore.

3.4.4. Le soutien à la recherche

Principe

Le progrès technologique est, selon le secteur aérien, un des moyens les plus efficaces de résoudre le problème de l'impact de l'aviation sur le climat, même s'il ne peut seul compenser totalement la croissance du trafic.



Perspectives de réduction des émissions de GES de l'aviation. (Patrick Monclar - Président du Comité Technique du Gifas, 2009)

Depuis plusieurs années, sous l'effet d'une véritable prise de conscience en Europe, les politiques publiques de soutien à la recherche aéronautique ont pour principal objectif l'amélioration des performances environnementales du secteur. Le programme Clean Sky, avec un budget total d'environ 1,7 milliard, représente le plus grand projet de recherche jamais lancé avec la Commission Européenne, qui en assure le financement à hauteur de 50% (cf. Chap. I, section 1.6.2). En France, la mise en place du CORAC et la politique de soutien à la recherche de la sous-direction de la construction de la DGAC s'inscrivent dans une démarche similaire.

Efficacité

L'amélioration des performances environnementales de l'aviation est bien évidemment un des leviers permettant de limiter l'impact de l'aviation sur le climat.

Il faut néanmoins distinguer l'amélioration de l'efficacité énergétique de la réduction des autres nuisances comme le bruit, les NO*x* ou les particules.

L'amélioration de l'efficacité énergétique peut avoir un impact direct sur le prix de l'offre de transport. Compte tenu de l'élasticité-prix du secteur, l'amélioration de l'efficacité peut en effet induire une augmentation de la demande. Or la croissance du trafic est l'un des principaux aspects du problème de la limitation de l'impact de l'aviation sur le climat. C'est pourquoi le progrès en ce domaine doit nécessairement s'accompagner de mesures de nature à

limiter cet effet pervers. Pour tout ce qui touche aux pollutions induites par l'aviation, le soutien au progrès technologique demeure un levier d'action publique essentiel.

D'un strict point de vue économique, les politiques de soutien se justifient par les externalités positives que l'on attribue au secteur aéronautique. Le secteur aéronautique est en effet jugé stratégique pour des raisons de souveraineté (proximité avec les questions de défense), d'emploi et plus généralement pour l'effet d'entrainement de ce secteur sur le reste de l'économie[37].

Perspectives

L'enjeu principal d'une politique de soutien à la recherche ambitieuse est d'être en mesure de mobiliser, sur la durée, les fonds publics y afférents. C'est pourquoi le rapport Giblin préconisait d'y affecter tout ou partie de la mise aux enchères des quotas d'émission qu'il appelait de ses vœux. Mais le périmètre choisi pour inclure l'avion dans l'ETS risque de rendre très délicate la mise en œuvre de cette solution.

Les Etats et la Commission devront donc continuer à financer ces programmes sur leur budget général. La négociation du 8ème PCRD qui interviendra à l'horizon 2012-2013 sera à ce titre déterminante, car certains projets, comme ceux relatifs aux carburants alternatifs exigent des temps de développement très longs.

[37] En France, le secteur aérien transporte plus de 15% en valeur des échanges français et il représente 400.000 emplois qualifiés, 2% PNB, et 10Md€ de balance commerciale positive (Patrick Monclar - Président du Comité Technique du Gifas. (2009). Les enjeux environnementaux pour l'industrie aéronautique et spatiale. *Conférence CORAC).*

4. Comment contribuer à faire d'avantage progresser les performances environnementales de l'aviation ?

L'échelon international est naturellement le plus pertinent. C'est pourquoi, promouvoir l'inclusion de l'aviation dans un système mondial d'échange de permis d'émission au plan global doit demeurer la priorité de l'Europe. La France de part la place particuliere qu'elle occupe dans le transport aérien européen a un rôle central à jouer dans cette démarche.

L'inertie des prises de décision au sein des instances internationales et les difficultés à définir une approche partagée au niveau mondial peuvent décourager d'approfondir plus avant les actions à accomplir pour limiter l'ensemble des effets de l'aviation sur l'environnement. Mais l'urgence climatique soulignée par le 4ème rapport du GIEC impose de traiter ces questions de front et non de manière séquentielle. Les questions des biocarburants, des émissions de NO*x* en croisière, des trainées de condensations doivent aussi être mises à l'ordre du jour de l'aviation internationale.

L'objet de ce chapitre est d'examiner les actions spécifiques qui pourraient être entreprises au niveau français, ainsi que leurs modalités de mise en œuvre, pour contribuer aux débats nationaux, européens et internationaux sur le thème de la maîtrise des effets de l'aviation sur le climat.

4.1. Aviation et climat : une dichotomie qui se retrouve dans l'organisation internationale…

4.1.1. LA CCNUCC

La Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques signée le 4 juin 1992 à Rio est entrée en vigueur en mars 1994.

Son objectif est de « *stabiliser (…) les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique* » (Convention-cadre sur les changements climatiques, 1992)

La troisième Conférence des Parties[38] a abouti à la signature en 1997 du Protocole de Kyoto qui est le premier accord international contraignant sur la question du changement climatique. (cf. chap. I, section 1.6.1).

[38] La conférence des parties est l'assemblée des pays signataires de la Convention.

Les représentants des Etats qui contribuent aux travaux de la CCNUCC sont en général issus des ministères en charge de l'environnement.

4.1.2. L'OACI

L'OACI a été créée le 7 décembre 1944, par la signature de la Convention relative à l'aviation civile internationale à Chicago. La Convention de Chicago est entrée en vigueur en avril 1947. L'article 44 fixe les objectifs de l'OACI (Convention relative à l'aviation civile internationale, 1944) :

- Elaborer les principes et les techniques de la navigation aérienne internationale : voies aériennes, aéroports, installations et services nécessaires au développement ordonné et sûr de l'aviation civile internationale
- Promouvoir la planification et le développement sûr, régulier, efficace et économique du transport aérien international

L'OACI constitue donc un cadre naturel d'étude et de décision portant sur l'aviation internationale.

L'OACI est explicitement saisie de la question climatique par l'article 2.2 du Protocole de Kyoto.

Les représentants des Etats qui contribuent aux travaux de l'OACI sont en général issus des ministères en charge des transports

La dichotomie qui existe au sein du système des Nations Unies entre l'instance en charge de la question climatique et celle qui est en charge du transport aérien, souligne le rôle moteur que peut jouer la DGAC, direction générale du ministère qui gère à la fois les transports et l'environnement.

4.2. La DGAC : un acteur essentiel de la maîtrise de la contribution de l'aviation aux changements climatiques

La Direction Générale de l'Aviation Civile est rattachée au Ministère de l'Ecologie de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT). A ce titre elle veille à réduire l'impact de l'aviation sur l'environnement tout en étant garante de la sécurité et de la sûreté du trafic aérien. La DGAC agit aussi en conseil et partenaire de l'industrie aéronautique par le soutien qu'elle apporte à la recherche et au développement des grands programmes aéronautiques avec pour objectif de concourir aux diminutions des pollutions générées pas le transport aérien.

Par ses actions de régulation, de prestataire de service et de soutien à la recherche, la DGAC tient un rôle central dans l'animation et la coordination au sein du secteur pour progresser vers une aviation plus respectueuse de l'environnement.

4.2.1. La question climatique au sein de la DGAC

L'environnement est une préoccupation de longue date au sein de la DGAC. La limitation des nuisances locales, sonores et atmosphériques, fait partie de ses priorités.

La prise de conscience du risque climatique a tout naturellement amené la DGAC à faire de cette question une priorité.

Cela se traduit dans l'organisation de cette direction centrale du MEEDDAT :

Les acteurs

La DTA

La Direction du Transport Aérien constitue le pôle régalien de la DGAC. Au sein de la DTA, plusieurs sous-directions ou missions traitent de la question climatique.

- La Sous-direction de l'Europe et de l'International et la mission pour les questions internationales relatives à l'environnement :

Selon l'Arrêté du 9 juillet 2008 portant organisation de l'administration centrale du MEEDDAT, la sous-direction de l'Europe et de l'International est notamment chargée de contribuer à l'élaboration des positions françaises dans le domaine de l'aviation civile, de participer aux travaux menés au sein de l'UE et de l'OACI et de contribuer au suivi du travail des experts nationaux participant à l'élaboration de la réglementation européenne et internationale.

En outre cette sous-direction est chargée de promouvoir la présence de personnels de la DGAC dans les institutions et organismes européens et internationaux. La DGAC met en effet certains de ses agents à la disposition de l'OACI, de la Commission Européenne, de la CEAC, d'Eurocontrol, voire du Ministère des Affaires Etrangères (réseau diplomatique français), ainsi que l'illustre la récente nomination de Michel Wachenheim, ancien directeur de la DGAC, comme Ambassadeur, représentant permanent de la France au conseil de l'OACI à Montréal.

Elle tient donc un rôle central dans la promotion des positions françaises en matière environnementale. C'est un des acteurs essentiels dans la logique de la construction d'un

socle commun de connaissance et dans la mise en œuvre d'une stratégie d'influence (cf chap. III, section 3.2.3), au même titre que la mission pour les questions internationales relatives à l'environnement, directement rattachée au directeur du transport aérien, et dont le responsable est le représentant de la France au CAEP.

- La sous-direction du développement durable (SDD)

La sous-direction du développement durable est chargée d'élaborer un cadre de prévention des nuisances et de développement durable du transport aérien et d'élaborer les textes à caractère législatif et réglementaire relatifs à la lutte contre la pollution des aéroports et des aéronefs, notamment les restrictions d'exploitation et de survol, ainsi qu'au contrôle des émissions gazeuses des aéronefs (Arrêté du 9 juillet 2008 portant organisation de l'administration centrale du MEEDDAT, 2009). A ce titre la sous-direction est notamment chargée de la transposition de la directive ETS en droit français et de l'allocation des quotas aux exploitants.

La sous-direction joue un rôle essentiel dans la mise en œuvre des instruments économiques et normatifs de réduction des émissions au niveau français. A ce titre, c'est en lien avec cette sous-direction que devront être menée les réflexions visant à intégrer la prise en compte des autres effets de l'aviation (trainées, NO*x*) dans le marché de permis d'émission européen (Recommandation IRN LT n°2).

- La sous-direction de la construction (SDC)

La sous-direction de la construction aéronautique est notamment chargée d'animer le dialogue avec les industriels et les organismes de recherche, de mettre en œuvre le soutien public à la recherche aéronautique et de participer à l'élaboration des programmes-cadres européens de recherche et développement (Arrêté du 9 juillet 2008 portant organisation de l'administration centrale du MEEDDAT, 2009).

La sous-direction de la construction est dotée des budgets qui lui permettent d'orienter la recherche aéronautique pour une aviation plus durable. En 2008, son budget s'élevait à 257M€.

La sous-direction assure pour la DGAC le secrétariat du CORAC conjointement avec le GIFAS et à ce titre s'assure de la mise en œuvre au niveau français des programmes de

recherche et développement qui permettront d'atteindre les objectifs ACARE (réduction par un facteur 2 des émissions de CO_2, du bruit et par un facteur 5 des émissions de NO*x*).

- La sous-direction des Etudes, des statistiques et de la prospective (SDE)

La sous-direction des études, des statistiques et de la prospective est en particulier chargée, d'assurer le recueil, le traitement, l'analyse et la diffusion des données statistiques concernant le transport aérien, ainsi que d'établir les prévisions de trafic à court, moyen et long terme.

Du fait de ces missions, les services de la sous-direction fournissent les données essentielles au décompte des émissions des aéronefs et à l'évaluation ante et/ou ex-post des mesures environnementales qui peuvent être envisagées dans le secteur aérien.

Cette expertise et ses liens avec Eurostat et Eurocontrol constituent de réels atouts dans la perspective du développement de bases de données de référence pour mesurer et prévoir l'impact de l'aviation sur l'environnement (recommandation SCC MT n°1).

La DSNA
La Direction des Services de la Navigation Aérienne, organisme au statut de Service à compétence nationale, est le prestataire français chargé de fournir les services de circulation aérienne sur le territoire national.

A ce titre la DSNA participe activement au programme Ciel Unique européen dont l'objectif majeur est d'augmenter la sécurité et la capacité de l'espace aérien et des aéroports en minimisant l'impact environnemental de la circulation aérienne. La DSNA est donc particulièrement impliquée dans la mise en place du FABEC (Functional Air Bloc « Europe Central ») et dans le programme technologique SESAR.

La DSNA est dotée d'une mission environnement chargée de suivre l'implication environnementale du programme Ciel Unique, dont la mise en œuvre des procédures de descente continue est un des aspects.

4.2.2. Le STAC

Le Service Technique de l'Aviation Civile est un service à compétence nationale directement rattaché au directeur du transport aérien. C'est le service technique du pôle régalien de la DGAC.

Le service technique de l'aviation civile est, dans les domaines de la sécurité, de la sureté, de l'innovation et de l'environnement, notamment chargé (Arrêté du 25 février 2009 portant création du STAC, 2009) :

- d'apporter l'expertise technique utile pour les certifications, les contrôles de conformité et la surveillance prévus par les textes en vigueur
- d'évaluer ou vérifier les performances de systèmes ou équipements contribuant à la sécurité ou à la sûreté en vue de leur agrément, homologation ou certification
- d'apporter l'expertise technique utile à l'élaboration de la réglementation
- d'élaborer des guides méthodologiques et de diffuser les connaissances techniques
- de conduire des recherches et des expérimentations
- d'assurer la veille scientifique et technique
- de participer à la coopération scientifique et technique internationale

Au sein du STAC, le département ACE (Aménagement Capacité Environnement) est chargé des questions environnementales. Aux termes de l'arrêté du 25 février 2009 portant organisation du STAC, ce département doit, entres autres missions, « élaborer et diffuser les outils et méthodologies pour la connaissance et l'atténuation des impacts environnementaux du trafic aérien et conduire des campagnes de mesure de ces impacts ». Les problématiques des nuisances locales comme le bruit et la qualité de l'air autour des aéroports, y sont traitées de longue date. Un guide méthodologique pour la réalisation de bilan carbone des aéroports a récemment été élaboré en collaboration avec l'ADEME.

Les missions du STAC le placent comme référant scientifique et technique au sein de la DTA pour contribuer, avec les sous-directions concernées, à l'approfondissement des actions à mener pour rendre l'aviation plus respectueuse de l'environnement. L'expertise avérée du STAC en matière de modélisation des pollutions et de simulations de trafic pourrait être complétée dans le domaine des carburants aéronautiques pour garantir à la DTA un appui technique afin d'évaluer et d'orienter les actions à mener dans l'ensemble des domaines où des voies de progrès (chap. II) sont envisagées.

4.3. Recommandations et mise en œuvre des moyens d'action publique

4.3.1. Actions relatives à la construction d'un socle commun de connaissance (SCC)

Actions à court terme (CT< 1 an)

Commander un nouveau rapport spécial du GIEC sur l'aviation

Comme nous l'avons vu au chapitre 3, section 3.1.1 un nouveau rapport spécial du GIEC consacré aux émissions de l'aviation apparaît nécessaire pour aller de l'avant dans la limitation des effets du transport aérien sur le climat.

Aujourd'hui, toute forme d'action qui viserait à limiter les émissions de NO*x* ou l'apparition de trainées de condensation se heurterait à l'absence de références scientifiques partagées à l'appui desquelles elle pourrait être lancée.

Recommandation SCC CT n°1 : Commander au GIEC un rapport spécial qui actualise celui de 1999 « Aviation et atmosphère planétaire »

Le nouveau bureau du GIEC est nommé depuis l'été 2008, pour une période de 5 ans. C'est un temps relativement court. Mais, la France a la chance d'avoir un représentant au sein de ce bureau. Par son intermédiaire et via le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche et le MEEDDAT, le bureau du GIEC pourrait être saisi pour la réalisation d'un nouveau rapport spécial sur l'aviation et l'atmosphère planétaire. Il existe donc une véritable opportunité, au niveau national, de contribuer à la réalisation d'un socle commun de connaissances.

A ce titre la DGAC, au sein du MEEDDAT, pourrait jouer un rôle actif. Le STAC, envisageait en 2008 de conclure un partenariat avec le CERFACS pour réaliser une étude faisant le bilan des connaissances académiques relatives aux effets de l'aviation sur le climat. Ce travail n'a pu être mené pour des raisons administratives. Une telle étude, pourrait pourtant constituer la première étape du processus de saisie du bureau du GIEC.

Recommandation SCC CT n°2 : Réaliser ou commander une étude synthétique (tel un résumé à l'intention des décideurs) faisant le bilan des connaissances sur l'impact des émissions des avions en croisière, en particulier sur leur forçage radiatif.

Mettre la question de l'aviation à l'agenda du GIEC réclame l'implication des administrations concernées, mais ce travail se justifie car il relève à la fois d'une forme de responsabilité

environnementale et d'un souci de préservation des intérêts socio-économiques du secteur à long terme.

Actions à moyen terme (1 an < MT < 3 ans)

Développer des données et des modèles de référence

Comme nous l'avons vu au chapitre 3, section 3.1.2, la construction d'un socle commun de connaissance passe par la conception de modèles et le recueil de données qui puissent faire référence. A cet égard, les méthodologies d'estimation des nuisances environnementales par simulation de trafic aérien en temps accéléré présentent des qualités remarquables de robustesse, de précision, d'adaptabilité et de transparence.

Recommandation SCC MT n°1 : Construire au niveau français et avec les partenaires européens, un moteur de référence pour permettre des simulations du trafic aérien et de ses nuisances, de « stationnement à stationnement ».

La conception associerait la DGAC, le monde académique, les industriels et les compagnies. L'usage de cet outil pourrait être libre et permettrait entre autre de simuler l'impact d'une évolution d'une flotte, de l'ouverture d'une nouvelle ligne, de l'adoption d'une nouvelle route ou d'une nouvelle procédure d'approche, sur le bruit, la consommation de carburant ou les émissions.

Au sein de la DGAC, la DTI et le STAC disposent des savoir-faire et de l'expérience en matière de simulation du trafic pour assurer la maîtrise d'œuvre d'un tel projet en s'appuyant sur des travaux déjà réalisés par ailleurs et notamment par le CAEP. Au sein de la DTA, la sous-direction des études réalise les statistiques du trafic français. L'association de partenaires européens, au premier rang desquels Eurocontrol, d'industriels et d'exploitants doit permettre d'en fiabiliser le contenu et d'en faire un véritable outil partagé.

Futurs carburants aéronautiques : profiter de l'expérience automobile

Historiquement, le développement des carburants alternatifs répondait avant tout à des objectifs d'indépendance énergétique vis à vis du pétrole ou pour trouver des débouchés aux excédents agricoles. Aujourd'hui ce développement constitue une des voies prioritaires pour répondre aussi aux enjeux environnementaux du secteur des transports terrestres : réduction de la pollution globale (GES) et réduction de la pollution locale (CO, HC, Nox, fines particules, O_3). C'est pourquoi pour les carburants automobiles ce développement est encadré, par différents textes aux niveaux communautaire et national : paquet énergie-climat, directives sur les énergies renouvelables et nouvelle directive sur les carburants automobiles.

Recommandation SCC MT n°2 : Susciter et participer aux travaux relatifs aux biocarburants au sein du réseau scientifique et technique (RST) du MEEDDAT pour valoriser dans le secteur de l'aviation les résultats déjà obtenus sur cette thématique pour les transports terrestres.

Assurer la veille scientifique et sanitaire

L'utilisation de ressources végétales pour la production de carburant soulève des questions quant à l'impact de la combustion des résidus de métaux ou de phosphore présents naturellement dans les plantes.

Recommandation SCC MT n°3 : Assurer une veille scientifique et sanitaire sur la question des polluants secondaires liés aux biocarburants.

Evaluer l'effet radiatif de l'utilisation de carburants alternatifs

Les carburants de synthèse XTL présentent l'avantage de ne contenir, ni soufre, ni composés aromatiques. Leur usage dans l'aviation permettrait de limiter les émissions de particules et la formation des cotras (cf. chap. I, section 1.3.2).

Recommandation SCC MT n°4 : Etudier l'impact des carburants aéronautiques de synthèse XTL sur le forçage radiatif, hors CO_2, des aéronefs.

Cette étude doit permettre de mieux qualifier l'intérêt des différentes filières de production en tenant compte de la disponibilité effective de la ressource, sans que le bilan CO_2 du « puit à l'aile » soit le seul critère.

Concevoir un guide des pratiques de green taxi

La construction d'un socle commun de connaissance passe aussi par le partage d'expérience. Les voies de progrès étudiées au chapitre 2 suggèrent qu'une amélioration de l'exploitation des avions au sol pourrait être une source de diminution des nuisances environnementales. Aujourd'hui, diverses méthodes, divers équipements sont expérimentés, mais il n'existe pas de vision claire des bénéfices qu'ils apportent.

Recommandation SCC MT n°5 : Réaliser un inventaire des solutions de « Green Taxi » existantes ou en cours de développement. En décliner un guide des bonnes pratiques.

Un guide des bonnes pratiques de « green taxi » permettrait de faciliter la coordination des acteurs concernés en vue de l'intégration des solutions les plus intéressantes.

Rendre possible le billet unique avion+train et l'enregistrement multimodal

Le développement de la complémentarité modale nécessite la prise en compte du confort du voyageur, comme nous l'avons vu au chapitre II, section 2.4.

La conception de gare ferroviaire dans l'enceinte des aérogares est à ce titre un progrès nécessaire, mais il n'est sans doute pas suffisant.

Recommandation SCC MT n°6 : Réaliser une étude des moyens techniques, organisationnels et juridiques (sureté) de la mise en œuvre d'un billet unique avion+train, et de l'enregistrement des bagages en gare ferroviaire pour les trains à destination des aérogares français

Cette étude pourrait être menée conjointement par la DGAC et la DGITM et supervisée par le CGDD. La question épineuse soulevée par la libéralisation du rail français pourrait toutefois peser sur cette étude, puisqu'elle conditionne la possibilité pour une compagnie aérienne d'affréter des trains à destination de son hub. En revanche, cette étude pourrait utilement explorer les possibilités d'introduire des mesures de sureté dans le secteur ferroviaire à l'image des pratiques du secteur aérien.

Actions à long terme (LT > 3 ans)

Evaluer les mesures, les actions

Convention d'engagements du secteur aérien français, CORAC, SESAR, ACARE, nombreux sont les domaines où des voies de progrès sont étudiées et des actions entreprises. Pour chacun d'eux, des objectifs plus ou moins contraignants de réduction des émissions peuvent être avancés.

L'évaluation indépendante des gains environnementaux doit pouvoir éclairer acteurs et décideurs sur l'opportunité de certains choix techniques.

Recommandation SCC LT n°1 : Conduire l'évaluation des gains environnementaux des différents programmes d'amélioration des performances environnementales de l'aviation.

L'étude réalisée par le STAC pour mesurer les gains environnementaux des procédures de descente continue a mis en lumière les difficultés d'évaluation de l'efficacité de certaines mesures. Des bases de données et des modèles de référence (cf. recommandation SCC MT n°1) devraient faciliter la mise en œuvre de cette recommandation.

4.3.2. Actions relatives à l'évolution des instruments de réduction des nuisances (IRN)

Actions à court terme (CT< 1 an)

Améliorer la composition du kérosène

Le rapport Giblin avait conclu en 2005 à la nécessité d'améliorer la composition du kérosène de manière à en réduire le taux de soufre et de composés aromatiques. Depuis aucune avancée n'a été enregistrée sur ce plan.

Les procédés de réduction de la teneur en soufre des dérivés du pétrole existent pourtant, leur application au carburant aéronautique aurait un impact positif sur les émissions polluantes et très certainement sur le bilan radiatif de l'aviation, mais cela nécessiterait un investissement de l'ensemble du secteur, alors qu'il n'existe pour cela aucune incitation.

Recommandation IRN CT n°1 : Mettre en place, au niveau français ou européen dans un premier temps, une norme environnementale limitant la présence de soufre et de composés aromatiques dans le carburant aéronautique.

Lors d'un entretien, Nicolas Jeuland, de l'IFP, a rappelé que c'était sous la pression croissante des normes environnementales qui s'appliquaient aux constructeurs automobiles, que ces derniers avaient pu « convaincre » les pétroliers de s'engager dans une démarche de réduction de la teneur en soufre des carburants automobiles. Mais au contraire du secteur automobile, le secteur aérien ne constitue pas un débouché essentiel de la filière pétrolière. Le kérosène est le fruit d'une coupe intermédiaire entre le gazole et le supercarburant automobile. Du fait d'une forte pression sur la demande de diesel en Europe, les pétroliers pourraient aisément limiter la production de kérosène au profit du diesel. Les compagnies aériennes ou les avionneurs ne peuvent pas peser seuls dans le dialogue avec les pétroliers. Ces « imperfections du marché» légitiment l'action publique en ce domaine. C'est pourquoi les normes doivent s'appliquer directement au carburant et non aux émissions des moteurs. Mais leur mise en œuvre doit faire l'objet d'un dialogue approfondi et selon un calendrier à long terme afin que les industriels du pétrole puissent s'adapter. Le temps qui sera nécessaire avant l'entrée en vigueur effective d'une norme sur le kérosène exige que les travaux soient lancés le plus rapidement possible (action de court terme).

Développer une méthodologie bilan carbone pour les futurs carburants aéronautiques
Les carburants alternatifs représentent une des voies de progrès les plus prometteuses pour réduire l'impact de l'aviation sur les changements climatiques, tout particulièrement s'ils sont issus de la biomasse.

La détermination de l'efficacité environnementale des différentes filières est déterminante. La directive ETS prévoyant d'appliquer un coefficient d'émission nul pour la biomasse, il apparaît d'autant plus important de pouvoir évaluer le bilan carbone des différentes filières qui sont en cours de développement.

Recommandation IRN CT n°2 : Etablir un guide méthodologique sur le bilan carbone des carburants aéronautiques.

Ce guide pourra servir dans le cadre de l'ETS à l'instruction des demandes d'application d'un coefficient d'émission nul pour le carburant issu de la biomasse. Il pourra être réalisé, au sein de l'initiative FCA, avec l'IFP et l'ADEME, sur le même modèle que le guide bilan carbone des aéroports.

Confier la responsabilité du contrôle des déclarations au régulateur du transport aérien
L'évaluation des consommations de kérosène et des émissions associées de l'aviation se base sur des données propres au secteur aérien : données de trafic, types d'appareil, types de moteur, route suivie, etc. L'introduction progressive de carburants alternatifs dont certains seront exonérés de quotas rendra plus délicate encore ces opérations. La perspective de la prise en compte ultérieure des contributions spécifiques de l'aviation au changement climatique ajoutera un niveau supplémentaire de complexité. Les spécificités du transport aérien conduisent donc à préconiser la mise en place d'une organisation dédiée pour l'agrément des vérificateurs et le contrôle des déclarations.

Recommandation IRN CT n°3 : Faire du pôle régalien de la DGAC l'organe chargé d'agréer les bureaux de certification des déclarations d'émission des compagnies. Faire d'un service de la DGAC, l'acteur du contrôle des déclarations.

Actions à moyen terme (1 an < MT < 3 ans)

Une certification à périmètre réduit
La certification d'un nouveau carburant aéronautique est une opération lourde (cf. chapitre II, section 2.5.2)

L'initiative Futur Carburant Aéronautique lancée par la sous-direction de la construction de la DGAC a mis en place un sous-groupe spécifique chargé d'étudier les différentes solutions pour lever ce frein.

On peut néanmoins estimer que la certification internationale constitue un absolu à atteindre, mais qu'il y a certainement des voies intermédiaires à explorer pour y parvenir.

Au même titre que certaines solutions d'avenir pour le secteur automobile sont déployées dans un premier temps au niveau de flottes « captives », il y a certainement des possibilités de « cantonner », dans un premier temps, l'utilisation de biocarburants aéronautiques à un périmètre d'application restreint, pour pouvoir acquérir de l'expérience et laisser aux filières de distribution le temps de se mettre en place. Ce périmètre réduit pourrait ne concerner qu'une compagnie et qu'un seul type d'appareil. Dans ce cadre une certification moins restrictive pourrait être envisagée, sans pour autant remettre en question la sécurité du transport.

Recommandation IRN MT n°1 : Certifier des biocarburants aéronautiques pour une utilisation exclusive sur le territoire national, sur une ligne déterminée et pour un nombre limité d'appareils.

Cette démarche présenterait de multiples intérêts :

- Simplification de la procédure de certification, puisque le carburant n'aurait pas vocation à être « universel » mais répondrait à des critères spécifiques correspondant au type d'appareil opérant sur la ligne choisie.
- Simplification de la question de la distribution du carburant. En se cantonnant à une ligne donnée, la distribution du carburant ne nécessite pas de moyens lourds. L'acheminement de fûts peut même être envisagé.
- Adéquation de la demande aux faibles capacités de production qui caractérisent les filières naissantes de biocarburants.
- Acquisition d'expérience
- Opportunités de communication pour les différents participants à une telle démarche

Actions à long terme (LT > 3 ans)

Développer une « boîte verte »

L'étude des contributions spécifiques de l'aviation au changement climatique (cf. chap. I, section 1.3.2) en dehors des émissions de CO_2, indique que l'effet radiatif d'un vol dépend de nombreux paramètres, comme la composition du carburant, le type de moteur, la poussée des réacteurs ou les caractéristiques de l'atmosphère traversée. Ces paramètres sont, pour la plupart, connus au niveau de l'exploitation de l'avion.

L'analyse de la mise en œuvre de l'inclusion de l'aviation dans le système ETS (cf.chap. III, 3.4.3) montre que le mécanisme impose des procédures de comptabilisation des émissions qui peuvent être assez lourdes et qui pourraient être amenées à se compliquer encore d'avantage dans la perspective de l'extension du dispositif au plan global, du développement de l'usage de kérosènes alternatifs (introduction d'un facteur d'émission variable), ou de la prise en compte de l'effet des cotras ou des émissions de NO*x*.

La solution réside peut-être dans le développement d'un enregistreur de bord qui tiendrait compte de l'ensemble des paramètres d'un vol (paramètres d'exploitation de l'avion, caractéristiques de l'atmosphère traversée) pour en modéliser l'effet radiatif réel.

Recommandation IRN LT n°1 : Développer un enregistreur « boîte verte » installée à bord des appareils permettant d'estimer et d'enregistrer en temps réel et en continu l'effet radiatif réel au cours d'un vol.

Ce type d'appareil pourrait permettre aux compagnies d'adapter leurs stratégies d'exploitation pour minimiser leur impact radiatif réel. Cela pourrait par exemple se traduire par un contournement des zones sursaturées en cirrus, de la même manière que certains pilotes cherchent à « accrocher » les courants jets sur certaines routes pour réduire leur consommation, ou le temps de vol. Cela pourrait contribuer à l'amélioration de l'efficacité environnementale de l'aviation.

L'enregistrement de ces données par l'exploitant pourrait lui permettre une gestion simplifiée de ses déclarations d'émissions et ouvrir la voie à une automatisation. A terme, l'enregistreur pourrait être sécurisé, à l'instar des chronotachygraphes du transport routier ce qui autoriserait une réduction drastique des frais de déclaration, certification et contrôle des émissions, tant pour le régulateur que pour l'exploitant. Une « boîte verte » contribuerait ainsi à améliorer l'efficience d'un marché de permis d'émission.

Le développement d'un appareil de ce type serait nécessairement une opération de long terme, associant avionneurs, industriels (avionique), monde académique (modélisation de l'effet radiatif) et administration.

A terme, on pourrait envisager une optimisation des routes, non pas seulement en fonction des impératifs du contrôle aérien, mais aussi en fonction du bilan environnement complet d'un trajet donné.

Introduire une modulation du facteur d'émission

Un défaut de l'inclusion de l'aviation dans l'ETS, tel que cela a été prévu dans la directive, est de ne se focaliser que sur les émissions de CO_2 (cf. chap. III, 3.4.3).

L'utilisation d'un facteur d'émission plus grand que celui retenu dans la directive ETS[39] pour prendre en compte les autres effets de l'aviation semble être une bonne solution pour créer une véritable incitation pour limiter des effets (cotras, NO*x*, particules en croisières) qui aujourd'hui ne font l'objet d'aucune mesure de limitation.

L'instauration d'un tel facteur devrait s'accompagner d'un accroissement proportionnel des quotas alloués de manière à ne pas pénaliser le secteur aérien, dans l'attente d'un consensus plus global sur la modélisation de l'ensemble des effets radiatifs de l'aviation.

Recommandation IRN LT n°2 : Adopter dans la directive ETS un facteur d'émission supérieur à celui du seul CO_2 résultant de la combustion du kérosène et augmenter les quotas alloués au secteur aérien en proportion

Introduire une différenciation des trajets comptabilisés dans l'ETS

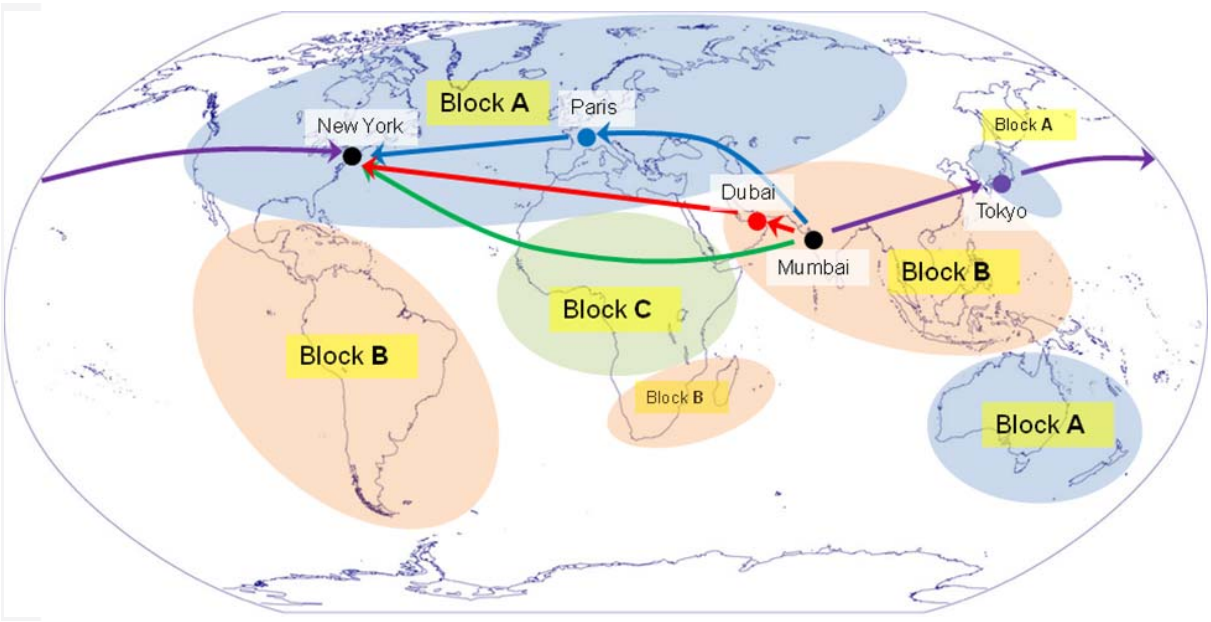
Afin de maximiser les chances de voir l'inclusion de l'aviation dans l'ETS être finalement admise par le plus grand nombre de pays, l'une des solutions envisagées serait d'introduire une modulation dans le décompte des émissions en fonction du trajet.

- Pour un trajet effectué entre l'UE et un autre pays de l'annexe I, l'ensemble des émissions serait décompté
- Pour un trajet entre l'UE et un pays non annexe I, seule la moitié des émissions serait décomptée

Recommandation IRN LT n°3 : Pour inscrire la démarche de l'inclusion du secteur aérien dans l'ETS, il apparaît nécessaire d'introduire une modulation dans le décompte des émissions suivant les trajets selon qu'ils relient ou non l'UE à un pays de l'Annexe I ou non.

Cette approche pourrait aussi servir de base à celle qui devra a terme être adoptée au niveau de l'OACI où il sera nécessaire, pour parvenir à un consensus, de distinguer les trajets en fonction d'une classification cohérente avec celles de la CCNUCC.

[39] Le facteur d'émission qui figure dans la directive ETS est le simple rapport entre la quantité de CO2 émise par la combustion du kérosène sur la quantité donnée de kérosène brulée.



Exemple de classification en blocs selon les catégories de la CCNUCC (AEA - Contribution to a global approach for international aviation , 2008)

Introduire une norme sur les émissions en croisière

Aujourd'hui, il existe des normes sur les émissions des moteurs d'avion durant le cycle LTO, qui visent à limiter la pollution locale autour des plateformes aéroportuaires. Le CAEP travaille régulièrement à un durcissement de ces normes qui visent en particulier les NO*x*.

Jusqu'à aujourd'hui, ces normes ont certainement permis de limiter les émissions en croisière. Les technologies futures permettront d'avoir des moteurs dont le fonctionnement pourra présenter plusieurs facettes selon les phases de vol. Ces techniques permettraient aux motoristes de ne plus être limités par le compromis théorique entre limitation des émissions de NO*x* et diminution de la consommation (ou limitation des émissions de CO_2) tel qu'il existe aujourd'hui. Dans cette perspective, et en l'absence de toute contrainte, on peut craindre une augmentation des émissions de NO*x* en croisière pour favoriser la consommation même si, en parallèle, les normes sur les émissions de NO*x* du cycle LTO sont renforcées.

Recommandation IRN LT n°4 : Mettre en place une norme environnementale sur les émissions de NO*x* en croisière. A cette occasion, une norme sur les émissions de particules pourrait aussi être envisagée.

Ce ne sera pas un chantier facile, car au contraire des polluants locaux dont la maîtrise conditionne l'acceptation des activités aériennes par les populations, la maîtrise des émissions en croisière ne constitue pas une priorité pour les exploitants et les industriels. La difficulté d'établir un lien simple entre ces émissions et leur pouvoir de réchauffement ne permet pas

non plus simplement d'invoquer un impact avéré sur le climat pour agir. Cette approche relève en l'état du principe de précaution et pourrait trouver écho, au moins dans un premier temps, chez nos partenaires européens, avant de pouvoir être étendue au niveau mondial. Dans tous les cas, le CAEP devra être consulté.

Limiter le rayon d'action des aéronefs pour limiter les consommations

L'étude du diagramme de pay-load range d'un aéronef (chap. 3, section 3.3.2) indique qu'à partir d'une certaine distance franchissable, l'exploitant doit limiter la masse commerciale pour pouvoir embarquer le carburant nécessaire au voyage. Dans cette configuration, l'avion consomme du carburant pour pouvoir transporter le carburant qui sera utilisé pour franchir une longue distance.

Recommandation IRN LT n°5 : Elaboration d'une norme limitant l'exploitation des aéronefs sur des distances où l'emport de carburant limite la charge commerciale admissible.

Une telle norme devrait être discutée et élaborée au sein de l'OACI par le CAEP, qui devra notamment trouver des solutions pour que les compagnies dont les appareils auront à faire escale pour ravitailler ne soient pas trop pénalisées financièrement par les redevances d'aéroport correspondantes. L'économie de carburant réalisée devra bénéficier au passager de manière à le convaincre de l'utilité environnementale et économique alors qu'aujourd'hui un vol sans escale représente un argument commercial.

Conclusion

La croissance continue de l'aviation à long terme semble suivre une tendance lourde qui ne se dément pas malgré une extrême sensibilité à la conjoncture. Sous l'effet des gains de productivité et de la dérégulation du secteur, le transport aérien s'est généralisé. Que ce soit pour le tourisme, les affaires ou le fret, l'aviation a accompagné, sinon rendu possible le mouvement de globalisation que nous connaissons. L'aviation civile joue un rôle essentiel dans le développement de nos sociétés, tant du point de vue culturel, par les rapprochements entre les peuples qu'elle autorise, que du point de vue économique par les échanges qu'elle permet.

La prise de conscience grandissante de l'impact des activités humaines sur l'équilibre climatique de la planète impose de s'interroger sur la contribution non négligeable de l'aviation aux émissions de gaz à effet de serre. Mais les différents travaux scientifiques montrent qu'il faut pousser plus loin l'analyse et que l'effet de l'aviation sur le réchauffement dépasse celui de ses seules émissions de CO_2.

Les émissions à haute altitude de NO*x*, de particules et les trainées de condensation ont selon toute vraisemblance un impact pour le climat.

Les scientifiques estiment que l'impact de l'aviation sur le climat peut-être deux à quatre fois supérieur, en moyenne, à l'effet de réchauffement dû aux seules émissions de CO_2 du secteur (GIEC - Rapport spécial aviation et atmosphère planétaire, 1999). Des incertitudes demeurent toutefois lorsqu'il s'agit de quantifier l'effet radiatif de phénomènes complexes non directement liés à l'émission de CO_2 au travers d'une métrique développée pour mesurer les effets des émissions des GES au sol.

Face aux conséquences du réchauffement climatique pour les activités humaines et les écosystèmes, des mesures politiques ont déjà été prises, notamment sous l'impulsion de la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, dont le Protocole de Kyoto constitue un premier jalon. C'est le premier traité fixant des objectifs chiffrés de réduction des émissions de GES. Mais en raison du statut particulier de l'aviation civile internationale et des difficultés d'imputation des émissions aux Parties signataires, le transport aérien international est resté en dehors du champs d'application directe du Protocole de Kyoto. C'est à l'OACI, dont le rôle premier est d'œuvrer pour un développement sûr de

l'aviation internationale, qu'a été confiée la responsabilité de traiter la question de la maîtrise des effets de l'aviation sur le climat.

Les théories économiques plaident en faveur de l'imputation au pollueur des coûts liés à la pollution qu'il génère par la mise en œuvre de mesures fiscales, ou par la mise en place d'un marché de permis d'émission.

Les instruments économiques ne sont cependant pas les seuls auxquels l'action publique peut recourir. Les instruments normatifs doivent les accompagner pour garantir que les progrès qui seront réalisés en matière de maîtrise des émissions de gaz à effet de serre se doubleront aussi d'une diminution des autres nuisances environnementales imputables à l'aviation. Ces objectifs environnementaux seront atteints grâce à un renforcement de l'effort de recherche dans chacune des voies où les progrès sont envisageables : carburants alternatifs, construction des aéronefs, gestion du trafic aérien, etc. L'action publique a bien entendu son rôle à jouer dans cet effort de recherche et notamment se concentrer sur les aspects pour lesquels les forces de marché ne permettent pas un investissement spontané des agents économiques. De façon plus générale, il apparaît crucial que l'ensemble des acteurs du secteur, publics et privés coopèrent pour que l'aviation puisse relever sans délai les défis environnementaux que son développement engendre. Le consensus autour du développement durable de l'aviation civile est déjà largement engagé en France et en Europe. Les accords volontaires, telle la Convention signée par les acteurs français du secteur aérien le 28 janvier 2008 dans le cadre du Grenelle de l'environnement, ou les programmes de recherche coordonnés en Europe, en attestent. Mais le transport aérien est une activité mondiale par nature et il est fondamental de convaincre l'ensemble des acteurs au niveau international de l'impérieuse nécessité de s'engager dans une démarche résolue de développement durable. La construction d'un socle commun de connaissance, auquel le GIEC a déjà largement contribué, est une étape primordiale, alors que la mise en œuvre d'une stratégie d'influence en France, puis en Europe constitue le moyen de promouvoir non seulement le concept mais surtout la pratique du développement durable.

Dans cette perspective, au sein du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, la DGAC est en mesure de jouer un rôle de premier plan pour mieux comprendre, évaluer et contribuer à atténuer les nuisances environnementales de l'aviation.

Bibliographie

Travaux cités

« Les Entretiens de Toulouse » - Air France. (7 et 8 avril 2009).

ADEME. (2008). Les Véhicules Particuliers en France.

AEA - Contribution to a global approach for international aviation . (2008).

AFP. (2007, Décembre).

Airbus - Document commercial. (2008).

Airbus - Global Market Forecast 2004-2023. (2004).

Airbus. (2003). A380 - Airbus Airplane Characteristics for Airport Planning.

Arrêté du 25 février 2009 portant création du STAC. (2009). *http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=899638ECAE596F4E9C74EE6021DBC09A.tpdjo05v_3?cidTexte=JORFTEXT000020495968&dateTexte=20090606.* Récupéré sur www.legifrance.fr.

Arrêté du 9 juillet 2008 portant organisation de l'administration centrale du MEEDDAT. (2009). Récupéré sur www.legifrance.gouv.fr: http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexteArticle.do;jsessionid=ED531E7508CECB8F19B8244BDE74E0EE.tpdjo14v_2?idArticle=JORFARTI000019147246&cidTexte=JORFTEXT000019147078&dateTexte=29990101&categorieLien=id

BOEING. (2004, octobre). 777-200LR/-300ER Airplane Characteristics for Airport Planning.

Bruno Sportisse - Pollution Atmosphérique. (2007). *Pollution atmosphérique - Des processus à la modélisation.* (Springer, Éd.)

CAEP - Résolution 33-8 (appendice I) . (2000). OACI.

CE-Delft - Final Report. (2005). *Inclusion of aviation in the European Emission Trading System (ETS) : design and impact.* Commission Européenne - DG Environnement.

Challenges. (2007). *Challenges* .

CITEPA / CORALIE / format SECTEN / màj fev 2008. (2008). *Inventaire des émissions de polluants atmosphérique en France.*

CONSAVE 2050 - European Commission. (2005).

Convention relative à l'aviation civile internationale. (1944, Décembre 7). Chicago.

Convention-cadre sur les changements climatiques . (1992, juin 4). Rio.

DGAC - Aviation et CO2 : les chiffres clés. (2009). Récupéré sur www.aviation-civile.gouv.fr: www.aviation-civile.gouv.fr/eco-calculateur/aviation_et_co2_les_chiffres_clefs.html

EEA - Annual European Community GHG Report. (2008).

ENAC/TSE - Air Transport Market. (2009).

ENAC-Yves Bienvenu. (2009). Cours sur les performances opérationnelles des aéronefs.

Eurocontrol - Long Term Forecast Flight Movements 2008-2030. (2008).

Eurocontrol - Short Term Forecast. (2009, Mai). Flight movements 2009-2010.

Eurocontrol Medium Term Forecast Flight Movements 2009–2015. (2009).

Forum Européen de l'Energie et des Transports. (2005). *Transport aérien et changement climatique: Taxation du kérosène et autres solutions fondées sur le marché* . Avis.

Giblin. (2005). *Maîtrise des émissions de gaz à effets de serre de l'aviation.* Conseil Général des Ponts et Chaussées.

GIEC - Changements Climatiques - Rapport de synthèse. (2007).

GIEC - Rapport de synthèse. (2001).

GIEC - Rapport du groupe de travail I. (2007). 4ème rapport.

GIEC - Rapport spécial aviation et atmosphère planétaire. (1999).

GIEC - Résumé Technique - Groupe de Travail 1. (2007). 4ème rapport.

GIEC - Résumé technique - Groupe de travail III. (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques : L'atténuation des changements climatiques.*

Glossaire GIEC – Troisième Rapport Annexe B. (2001).

Greenpeace - False Hope. (2008). *Why carbon capture and storage won't save the climate ?*

ICAO - Voluntary Activities against global warming in aviation sector. (2009).

IPCC - Summary for Policymakers - Special Report Carbon Dioxide Capture and Storage. (2005).

Ministère du Développement Durable. (2008). *Le Grenelle 3 : la transition vers un nouveau modèle de croissance.* pdf.

OACI - Circular 313. (2007). *Oulook for airtransport to the year 2025.*

OACI - Convention relative à l'aviation internationale. (Ed. 2006). Chicago: OACI.

OACI - Perspectives du transport aérien d'ici à l'an 2025. (2007).

OACI - Rapport environnemental. (2007).

OACI - Résolutions adoptées par l'Assemblée - 36ème session. (2007).

Patrick Monclar - Président du Comité Technique du Gifas. (2009). Les enjeux environnementaux pour l'industrie aéronautique et spatiale. *Conférence CORAC.*

Sausen - DLR - Aviation Radiative Forcing in 2000 . (2005).

SDC - Feuille de route FCA. (2009).

SESAR Definition Phase Report. (2007). *Performance Objectives and Targets.*

SNECMA. (2005). Maîtrise des émissions de l'aviation.

STAC - Bilan environnemental de la phase III de l'expérimentation Green Tracks. (2009).

Voyageurs Du Monde - compensation volontaire. (2008). *http://www.vdm.com/vdm/voyages/Annonce/developpement-durable-actions.asp*. Récupéré sur www.vdm.com.

Wikipédia - Nimby. (2009). *Nimby*. Récupéré sur Wikipédia: http://fr.wikipedia.org/wiki/Nimby

www.iata.org. (2009). *What We Do.* Récupéré sur http://www.iata.org/whatwedo/environment/fuel_efficiency.htm

Ouvrages imprimés

EWALD, F. et al. 2001. *Le Principe de précaution*. Paris : PUF, Que Sais Je ?.

HOOD, Christopher C. 1986. *The Tools of Government*. Hong Kong : Chatham House Publishers, Inc., 177 p

JANCOVICI, J-M., (2002), *L'avenir climatique : quel temps ferons nous?*, Seuil, Paris

SPORTISSE, B., (2007), *Pollution Atmosphérique : Des processus à la modélisation*, Springer, Paris

Ouvrages électroniques

ARRHENIUS, Svan. 1896. *On the Influence of Carbonic Acid in the Air Upon the Temperature of the Ground, Vol. 41, pp. 237-276* . [en ligne] : Philosophical Magazine, http://web.lemoyne.edu/~giunta/arrhenius.html#foot1.

COASE, R.H. 1960. *The problem of Social Cost, Vol. 3, pp. 1-44* . [en ligne], Chicago : The University of Chicago Press. http://links.jstor.org/sici?sici=0022-2186%28196010%293%3C1%3ATPOSC%3E2.0.CO%3B2-F.

Rapports imprimés

ADEME. Mars 2008. *Charte de la compensation volontaire des émissions de gaz à effet de serre*. Paris.

ADVISORY COUNCIL FOR AERONAUTICS RESEARCH IN EUROPE (ACARE). Octobre 2004*, Strategic research agenda*.

ADVISORY COUNCIL FOR AERONAUTICS RESEARCH IN EUROPE (ACARE) *2008 Addendum to the strategic research agenda*

ASTM, Subcommittee J on Aviation Fuels. *ASTM Standard Practice for Qualification and Approval of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives*.

CITEPA. Décembre 2007. *Inventaire des emissions de gaz a effet de serre En France au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques - Rapport national d'inventaire* . Paris.

COMMISSION EUROPÉENNE . 2000. *Green paper on greenhouse gas emissions trading within the European Union*. Bruxelles.

COMMISSION EUROPÉENNE, Report on the Public Consultation March-May 2005. 2005. *Reducing the Climate Change Impact of Aviation*. Brussels.

COMMISSION EUROPEENNE, Communication de la Commission au Conseil, au Parlement Européen, au Comité Economique et Social et au Comité des Régions. 2000. *COM (1999) 640, Les transports aériens et l'environnement*. Bruxelles.

COMMISSION EUROPEENNE, Communication de la Commission au Conseil, au Parlement Européen, au Comité Economique et Social et au Comité des Régions. 2000. *COM (2000) 110, Taxation du carburant d'aviation*. Bruxelles.

COMMISSION EUROPEENNE, Communication de la Commission au Conseil, au Parlement Européen, au Comité Economique et Social et au Comité des Régions. 2005. *COM (2005) 459, Réduction de l'impact de l'aviation sur le changement climatique*. Bruxelles.

CONSEIL DE L'UNION EUROPEENNE, dossier interinstitutionnel. 7 avril 2008. *Position commune arrêtée par le Conseil en vue de l'adoption de la directive du Parlement européen et du Conseil modifiant la directive 2003/87/CE afin d'intégrer les activités aériennes dans le système communautaire d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre*. Bruxelles.

CONSEIL DE L'UNION EUROPEENNE, dossier interinstitutionnel. 3 avril 2008. *Position commune arrêtée par le Conseil en vue de l'adoption de la directive du Parlement européen et du Conseil modifiant la directive 2003/87/CE afin d'intégrer les activités aériennes dans le système communautaire d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre*. Bruxelles.

CONSEIL GENERAL DES PONTS ET CHAUSSEES, GIBLIN, Jean-Pierre. Mars 2005. *Maîtrise des émissions de gaz à effet de serre de l'aviation civile*. Rapport élaboré dans le cadre d'un groupe de travail interministériel présidé par Jean-Pierre GIBLIN.

CONSEIL POUR LA RECHERCHE AERONAUTIQUE CIVILE FRANÇAISE (CORAC) Groupe de travail préparatoire à la mise en place du Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile française 1er juin 2008*, Rapport de synthèse*.

CONSEIL POUR LA RECHERCHE AERONAUTIQUE CIVILE FRANÇAISE (CORAC) Groupe de travail préparatoire à la mise en place du Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile française 1er juin 2008, *Annexe au rapport de synthèse*.

DIRECTION GENERALE DE L'AVIATION CIVILE (DGAC), DIRECTION DU TRANSPORT AERIEN. Février 2009, *Enquête sur l'image de l'aviation civile 2008*.

DIRECTION GENERALE DE L'AVIATION CIVILE (DGAC), DIRECTION DU TRANSPORT AERIEN., SOUS-DIRECTION DE LA CONSTRUCTION, DESVALLEES Patrice. *Feuille de route technologique pour les futurs carburants aeronautiques FCA*. .

EUROCONTROL. Mai 2009. *Flight Movements 2009-2010*.

EUROCONTROL. 2009. *Flight Movements 2009-2015*.

EUROCONTROL, 2008. *Long Term Forecast Flight Movements 2008-2030*.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY , Technical report No 6/2008. 2008. *Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2006 and inventory report 2008 – Submission to the UNFCCC Secretariat - Version 27 May 2008* . Copenhagen.

FORUM EUROPEEN DE L'ENERGIE ET DES TRANSPORTS , WARREN, Andrew. 2005. *Transport aérien et changement climatique: Taxation du kérosène et autres solutions fondées sur le marché*.

GIEC, 1999. *Rapport spécial aviation et atmosphère planétaire*.

GIEC, 2001. *Troisième rapport Annexe B*.

GIEC, 2007. *Changements climatiques – Rapport de synthèse*

GIEC, 2007. *Rapport du groupe de travail I- Quatrième rapport*.

GIEC, 2007. *Résumé technique – Groupe de travail 1- Quatrième rapport*.

GIEC, 2007. *Résumé technique – Groupe de travail III, bilan 2007 des changements climatiques : L'atténuation des changements climatiques*.

GREENPEACE, 2008, *False Hope, Why carbon capture and storage won't save the climate ?*

HORTON, Gareth. Qinetiq, Business Analysis Unit at the Department of Trade and industry for Peter Newton of the DTI and Roger Gardner of the DfT. November 2006. *Forecasts of CO2 emissions from civil aircraft for IPCC*. UK.

ICAO, 2009, *Volontary Activities against global warming in aviation sector*

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO), 15 April 2007. *Report on Voluntary Emissions Trading for Aviation*.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO), Assemblée 36e session. Montréal 18-28 septembre 2007. *Résolutions adoptées par l'Assemblée,* Montréal.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO), ICAO Workshop on Aviation and Alternative Fuel. Montreal 10_12 February 2009. *Report on Voluntary Emissions Trading for Aviation*. Montreal.

IPCC. 2001. *Climate Change 2001: Synthesis Report*. Geneva.

IPCC. 2005. *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge.

IPCC, WG1. 2001. *Climate Change 2001, the Scientific Basis. Summary for the policymakers and technical Summary of the Working Group I Report*. Cambridge.

IPCC, WG1 et WG3. 1999. *Aviation and global atmosphere - Special report*. Geneva.

MEEDDAT, 2008. *Le Grenelle 3 : la transition vers un nouveau modèle de croissance.*

MEEDDAT, CAISSE DES DEPOTS, Edition 2009. *CO2 et énergie, France et Monde, Chiffres clés*..

OACI, 2007. *Circular 313 Outlook for airtransport to the year 2025.*

OACI, 2007. *Rapport environnemental 2007*

OACI, Assemblée. 2004. *35ème session, rapport du comité exécutif sur le point 15 de l'ordre du jour, A-35-WP/352 P/84*. Montréal.

REPUBLIQUE FRANCAISE, 2005. *Memorandum présenté par la France : Réduire l'impact de l'aviation sur le changement climatique*. Bruxelles.

SAUSEN, DLR, 2005. *Aviation Radiative Forcing in 2000.*

SESAR, 2007. *SESAR Definition Phase Report Performance, Objectives and Targets*.

SNECMA, 2005. *Maîtrise des émissions de l'aviation.*

TAMBIDORE, Ilangovane. Comité Aviation Atmosphère, 15 mai 2008. *Synthèse des enseignements tirés des travaux du Comité aviation atmosphère*..

Travaux universitaires

BIENVENU, Yves. 2009. *Cours sur les performances opérationnelles des aéronefs*. Cours, ENAC

BRIOL, Xavier. 2008. *L'impact du transport aérien sur le changement climatique*. Examen professionnel, IEEAC, 68 p.

CARPENTIER, Alexandra, ANDRE, Cédric. Février 2006. *Les enjeux du protocole de Kyoto pour l'Aviation Civile ou comment appliquer un processus de limitation des GES par des permis négociables dans l'aérien ?* ENPC, 12 p.

DONZEL, Carine, DEFIGIER, Aurélien. DEREU, Etienne. 25 mai 2007. *Changement climatique et transport aérien*. ENPC, 68 p.

MALAVOLTI, Estelle. 2009. *Air Transport Market*., 2009. Cours, ENAC/TSE.

Articles de périodiques imprimés

CORMIER, Henri. Octobre/novembre 2008. Sommet européen « Aviation et environnement à Bordeaux » : Le transport aérien tient ses promesses. *Aviation Civile* , 348, p9.

CORMIER, Henri. Mai 2009. Grenelle Environnement : Un an après le décollage. *Aviation Civile 350 ,p* 29.

DGAC, DAST. Mai 2008. Transport aérien et changement climatique, vers une intégration de l'aviation au système d'échange de quotas d'émission. *Les notes thématiques*, Mai 2008 N°7bis .

DGAC, DAST. Mai 2008. Effet de serre, changement climatique : Points de repères. *Les notes thématiques*, Mai 2008 N°7bis .

REDACTION AIR&COSMOS. 12 décembre 2008. Interview de Dominique Bussereau, secrétaire d'Etat aux Transports, « La France a fait avancer le ciel unique ». *Air & Cosmos*, N°2151 p33.

Articles de périodiques électroniques

CHALLENGES. 2008 [référence du 2009]. www.challenges.fr.

Communications dans un congrès

HURLIN, H., AIR FRANCE. 7 avril 2009. Réduction de bruit, réduction de consommation : quel compromis ?. Les Entretiens de Toulouse, Rencontres aérospaciales, *Toulouse*, *7 avril 2009*. :

MONCLAR, Patrick. 2009. Les enjeux environnementaux pour l'industrie aéronautique et spatiale. Conférence du CORAC, *Paris*,

Textes réglementaires

COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES. 2009. Directive du Parlement européen et du Conseil 2008/101 EC modifiant la directive 2003/87/CE afin d'intégrer les activités aériennes dans les système communautaire d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre.

COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES. 13 octobre 2003. Directive du Parlement européen et du Conseil 2003/87/CE établissant un système d'échange de quotas

d'émission de gaz à effet de serre dans la Communauté et modifiant la directive 96/61/CE du Conseil.

NATIONS UNIES. 1944. Convention relative à l'aviation civile internationale, dite convention de Chicago. (Doc 7300/8)

NATIONS UNIES. 1992. Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

NATIONS UNIES. 1997. Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

Sites web consultés

ACARE [référence 2009], www.acare4europe.org.

STAC [référence 2009],. www.stac.aviation-civile.gouv.fr.

OACI [référence 2009],. www.icao.int/.

IPCC [référence 2009], www.ipcc.ch..

AIR FRANCE [référence 2009], www.corporate.airfrance.com/

AIR FRANCE [référence 2009], www.developpement-durable.airfrance.com

Agence européenne pour l'environnement (AEE ou EEA) [référence 2009], www.eea.europa.eu

CITEPA [référence 2009], www.citepa.org

ADEME [référence 2009], www.ademe.fr

Dgac [référence 2009], www.aviation-civile.gouv.fr

Green Peace [référence 2009], www.greenpeace.org

Action Climat [référence 2009], www.rac-f.org

Boeing [référence 2009], www.boeing.fr/

Airbus [référence 2009], www.airbus.com

EADS [référence 2009], www.eads.net

SAFRAN [référence 2009], www.safran-group.com/

SNECMA [référence 2009], www.snecma.com/

Cleansky [référence 2009], www.cleansky.eu/

ADP [référence 2009], www.aeroportsdeparis.fr

Eurocontrol [référence 2009], www.eurocontrol.int

SESAR [référence 2009], www.sesarju.eu

GIFAS [référence 2009], www.gifas.asso.fr

IATA [référence 2009], www.iata.org/worldwide/europe

Union Française des Aéroports [référence 2009], www.aeroport.fr/
TOTAL [référence 2009], www.total.com/

Annexes

Annexe 1. Lettre de mission

Ministère
de l'Ecologie, de
l'Energie,
du Développement
durable et de
l'Aménagement du
Territoire

dgac

Direction Générale
de l'Aviation civile

**Service Technique
de l'Aviation Civile**

Département
Aménagement, Capacité,
Environnement

Mastère d'action publique de l'ENPC – Année 2008-2009

Proposition de mission par le Service technique de l'aviation civile (STAC)
« Aviation et lutte contre les changements climatiques :
analyse des moyens d'action publique »

Impact de l'aviation sur des changements climatiques

Le transport aérien contribue aujourd'hui pour environ 3 % au réchauffement climatique. Sa contribution est en augmentation rapide compte tenu de la croissance du trafic. L'impact de l'aviation est la résultante de divers effets (émissions de dioxyde de carbone, création d'ozone, destruction de méthane, etc.) dont certains, tels l'effet des traînées de condensation et surtout la création de cirrus liée aux suies et aux particules sulfatées, sont mal connus à ce jour (source : 4ème rapport du GIEC[1], 2007).

Globalement 3 types d'actions d'atténuation sont possibles (cf. rapport CGPC 2004-0217-01 « Maîtrise des émissions de gaz à effet de serre de l'aviation civile » rédigé par J.-P. Giblin en mars 2005) :

- Actions de nature économique (marché de permis d'émissions, redevances, taxation),
- Incitation à la recherche et au développement (connaissance de l'impact radiatif, construction aéronautique, biocarburants, etc.),
- Optimisation des opérations de navigation aérienne (roulage des avions au sol, choix des routes, approche en descente continue, …).

Action publique française dans le contexte européen et international

La France joue un rôle actif dans les politiques mises en œuvre au niveau européen, autant pour la définition de mesures économiques (mise en place de l'*ETS*[2]) que pour l'élaboration de programmes de soutien à l'innovation technologique (Conseil *ACARE*[3] –, programmes *Clean Sky* et SESAR).

Les efforts européens sont déclinés au niveau national par le soutien de la DGAC à la recherche aéronautique (104 M€ en 2008). La convention signée entre les partenaires français du transport aérien le 30 janvier 2008 dans le cadre du Grenelle de l'environnement a décidée l'établissement d'un Conseil pour la recherche aéronautique civile chargée de définir et mettre en oeuvre les actions de recherche et d'innovations technologiques à entreprendre.

[1] : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.
[2] : *Emission Trading System*.
[3] : Conseil consultatif pour la recherche aéronautique en Europe – en anglais *Advisory Council for Aeronautics Research in Europe*.

31, av. du Maréchal Leclerc
94381 Bonneuil-sur-Marne cedex

Téléphone : 01 49 56 82 28
Télécopie : 01 49 56 82 14

jean-philippe.dufour
@aviation-civile.gouv.fr

Enfin, la France avec ses partenaires européens œuvrent également au sein de l'OACI[4] et de la CCNUCC[5] pour une prise en compte plus efficace au niveau mondial de la problématique climat liée à l'aviation.

Objectif de la mission proposée

Dans ce cadre, la mission proposée à un étudiant du Mastère consiste à analyser l'ensemble des moyens d'actions publiques pour réduire la contribution de l'aviation au réchauffement climatique. Dans un premier temps il s'agira de passer en revue les différents types d'action possibles : quelles voies ont été mises en œuvre (ou négligées) ? Quels avantages en attendre ? A quelles échéances ? Quelles en sont les limites ?

La seconde phase consistera à analyser les pistes de recherche et d'étude du STAC souhaitables pour valoriser la contribution de la DGAC à la thématique « Aviation et climat » : sur quels aspects se concentre sa *valeur ajoutée* au niveaux national, européen et international ? Quelles activités mettre en œuvre ? Avec quelles ressources ? etc.

Environnement de travail et moyens à disposition

Au sein du STAC (Bonneuil-sur-Marne – 94), service technique à compétence nationale d'environ 280 agents au sein de la Direction générale de l'aviation civile (MEEDDAT), l'étudiant mènera sa mission au département Aménagement-Capacité-Environnement (ACE) où son correspondant sera Jean-Philippe Dufour, Chef du département. Il y disposera des facilités bureautiques usuelles. Le service financera ses déplacements professionnels (à Toulouse en particulier).

Ses autres interlocuteurs au STAC seront entre autres la Direction, les 4 autres chefs de départements et les agents de la division Environnement du département ACE (14 personnes dont 2 agents en charge de la qualité de l'air).

Il devra également se rapprocher de la Direction du transport aérien de la DGAC (entre autres la Sous-direction du développement durable), des autres correspondants du département au MEEDDAT, de ses partenaires privés (aéroports, transporteurs aériens, constructeurs) et internationaux.

Contact

jean-philippe.dufour@aviation-civile.gouv.fr
Tél. 01 49 56 82 28 / 06 29 66 42 19

[4] : Organisation relative à l'aviation civile internationale.
[5] : Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

Annexe 2. Liste des personnes rencontrées

Philippe Ayoun	DGAC / DTA / sous-direction des études et de la prospective
Elisabeth Bouffard-Savary	DGAC / DTA/ sous-direction des études et de la prospective
Jean-Michel Bour	DGAC / DTA / sous direction de l'Europe et de l'international
Daniel Cariolle	CERFACS
Dominique Colin de Verdière	DSNA, SESAR
Philippe Costes	AIRBUS
Patrice Desvallées	DGAC / DTA / SDC
Jean-Pierre Giblin	Ingénieur général honoraire des ponts et chaussées
Pierre Guigon	Bluenext
François Guay	AIR TOTAL
Henry Hurlin	Air France
Nicolas Jeuland	IFP
Paul Kuentzman	ONERA
Hakim Lahlou	DGAC / DTA / sous-direction des études et de la prospective
Philippe Langumier	DGAC / DTA
Richard Lavergne	CGDD
Hervé Le Treut	LMD-IPSL
Pascal Luciani	DGAC / DTA / SDD
Guilhem Magoutier	DGAC / DTA / SDD
Estelle Malavolti	ENAC, Toulouse School of Economics
Corinne Marizy	AIRBUS
Philippe Raedeli	Powernext
Gilles Rollin	SNECMA Moteurs
Ilangovane Tambidoré	DGAC
Jean-Luc Tinland	DGAC / DTA / SDC
Geoffroy Ville	DGAC / DSNA

Annexe 3. Carburants alternatifs : les différents procédés ou ressources envisageables

Procédés Ressources \	Alcools	esters	Carburants synthétiques	Biomasse hydrotraitée	Carburants cryogéniques
Non renouvelable (fossile) : Kérosène conventionnel **JET-A1 (OK)**			**CTL (existe, AUJOURD'HUI)** SASOL 50% CTL en service depuis 1999, TRL9, SASOL 100% en 2009, TRL6 **GTL (en développement, DEMAIN)** Blend 50% SASOL TRL5		**LNG** Faible contenu énergétique par unité de volume, disponibilité, infrastructure, non 'drop-in', etc.
Renouvelable : Inconvénients	**Ethanol** **NON** contenu énergétique inférieur de 35%, concurrence potentielle avec alimentaire	**FAME** (EMHV) **NON** contenu énergétique inférieur de 10%, -5°C *Freeze point*, instable thermiquement et se décompose quand la température augmente …	**BTL** **OUI FUTUR** Blend 50% Choren TRL5, 50% BTL Algae TRL1	**HVO** **OUI FUTUR** 1° génération HVO TRL3, 100% HVO Algae TRL1)	**LH2 …** **Difficile** faible contenu énergétique / volume, disponibilité, infrastr., non 'drop-in', etc.) **Autres** : LCH4, … long terme

(SDC - Feuille de route FCA, 2009)

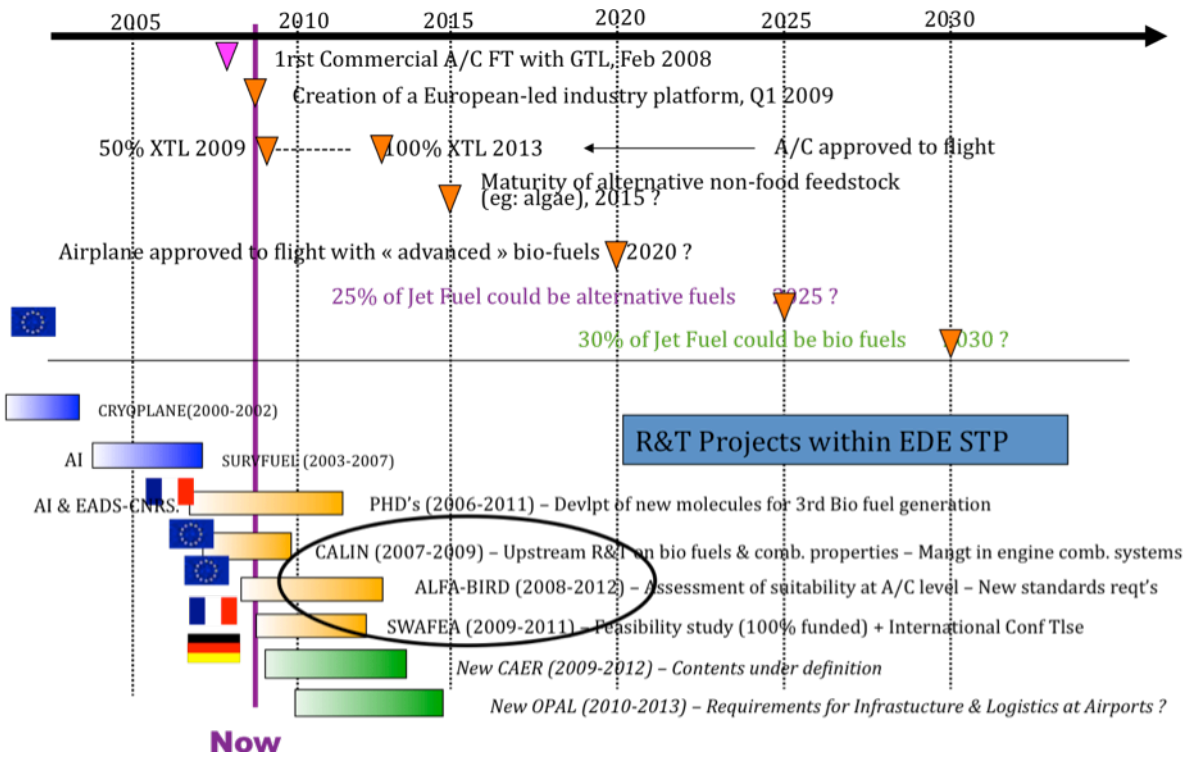


Figure 25-Inventaire des projets de carburants aéronautiques alternatifs

Annexe 4. Analyse multicritère des normes environnementales dans l'aviation

Instrument	Les normes environnementales dans l'aviation :	Normes existantes sur les émissions du cycle LTO (Nox et bruit)

Critères politiques

Gouvernance du dispositif	Phase de conception du dispositif	Au sein du CAEP. Groupes de travail dédiés. Consultation des acteurs industriels, des opérateurs et des institutions. L'ensemble des pays est invité à apporter sa contribution aux travaux des membres permanents du CAEP.
	Décision	Le CAEP assiste le Conseil de l'OACI dans la définition de l'évolution des normes et pratiques environnementales à instaurer au plan mondial. Au moins une réunion annuelle du groupe directeur du CAEP. Les recommandations du CAEP font l'objet de rapports établis à la suite des réunions officielles du CAEP et adressés au conseil (7 depuis 1986). L'assemblée de l'OACI (qui se réunit tous les trois ans) entérine les propositions du Conseil.
	Mise en œuvre	Calendrier d'entrée en vigueur d'une norme à la suite de son adoption par l'Assemblée
Echelle géographique	Niveau de décision	Assemblée de l'OACI – niveau international
	Niveau d'application	Mondial
Communication	Agenda de l'actualité	La publication des rapports du GIEC peut constituer une incitation à la mise à l'agenda du CAEP de nouveaux travaux
	Acteurs de la communication (association, gouvernement, élus…)	La communication autour de l'évolution des normes environnementales de l'aviation est surtout l'objet des industriels, des associations professionnelles du secteur (union des aéroports, associations de compagnies), et des opérateurs eux-mêmes. La communication déployée sert soit à influencer les travaux du CAEP, soit à attester de l'exemplarité environnementale du secteur.
Acceptabilité de la mission, des objectifs, de l'instrument	Contexte socio-économique, élaboration de la mesure,	L'établissement de nouvelles normes dans le cadre du CAEP doit faire l'objet d'un large recours à la consultation et à la participation des différents acteurs, puis doit être adoptée par l'Assemblée générale de l'OACI. Ce processus garantit un niveau d'acceptabilité élevé.
	Mécanisme	Le mécanisme lui même, dès lors qu'il est de portée internationale et non discriminatoire est bien accepté, y compris par les industriels qui y voient un argument commercial.

Critères socio-économiques

Equité sociale	Equité face à la pollution	Les normes apportent la garantie d'un progrès spécifique pour chaque nouvelle génération. Elles ne tiennent cependant pas compte de l'exposition réelle à la pollution qui dépend de l'intensité du trafic. Ce point relève le plus souvent de normes sanitaires locales. L'OACI a ainsi défini le concept d'approche équilibrée pour limiter l'exposition au bruit autour des aéroports, qui prend en compte la réduction du bruit à la source (normes), la planification et la gestion des terrains d'aviation (recommandations), les procédures d'exploitation (recommandation) et les limitations d'exploitation.
	Equité face aux revenus	Les normes frappent plus durement les industriels les moins avancés techniquement et les compagnies qui n'ont pas nécessairement les moyens de renouveler leur flotte. Elles constituent des barrières à l'entrée du marché des aéronefs.
	Equité face aux alternatives de comportement possibles	Un avion qui n'est pas certifié, ne peut pas être exploité. Il n'y a pas d'alternative possible pour l'industriel ou la compagnie.

Critères technico-économiques

Efficacité	Efficacité environnementale estimée	Bonne dans l'absolu pour les objectifs de la norme. Les normes permettent d'établir des hiérarchies entre différents types d'appareils. Elles doivent néanmoins s'intégrer dans un système global de réduction de la pollution, qui prend en compte le trafic.
	Recettes générées	Sans-objet
Efficience	Coûts administratifs	Modérés. Ils se limitent aux travaux de conception et d'implémentation des textes. Les coûts de contrôles sont intégrés pour l'essentiel aux coûts de certification dont les critères évoluent pour correspondre à la norme.
	Coûts de déploiement	Modérés. Le déploiement consiste en l'adoption de la norme.
	Déformation du comportement économique des acteurs	Les normes constituent une incitation au progrès pour les industriels. Pour les compagnies, un durcissement des normes peut se traduire par un renchérissement des coûts d'acquisition et/ou d'exploitation des appareils. Mais il s'accompagne souvent de limitation d'exploitation pour les appareils plus anciens, ce qui constitue une incitation au renouvellement des flottes

Instrument :	Les normes environnementales dans l'aviation :	Normes à concevoir sur les émissions en croisière

Criteres Politiques		
Gouvernance Du Dispositif	Phase de conception du dispositif	Au sein du CAEP. Selon le même processus que celui des normes du cycle LTO. Il s'agit ici de limiter les émissions de Nox, particules et les Sox en croisière.
	Décision	Comme pour les normes du cycle LTO, le CAEP assiste le Conseil de l'OACI dans la définition de l'évolution des normes et pratiques environnementales à instaurer au plan mondial. Les recommandations du CAEP font l'objet de rapports établis à la suite des réunions officielles du CAEP et adressés au conseil. L'assemblée de l'OACI entérine les propositions du Conseil.
	Mise en œuvre	Calendrier d'entrée en vigueur d'une norme à la suite de son adoption par l'Assemblée
Echelle Geographique	Niveau de décision	Assemblée de l'OACI – niveau international
	Niveau d'application	Mondial
Communication	Agenda de l'actualité	Un nouveau rapport spécial du GIEC au sujet de l'aviation et de l'atmosphère planétaire pourrait constituer un véritable élément fédérateur pour une mise à l'agenda du CAEP
	Acteurs de la communication (association, gouvernement, élus…)	L'OACI, les industriels et les compagnies
Acceptabilite De La Mission, Des Objectifs, De L'instrument	Contexte socio-économique, élaboration de la mesure,	Cette norme irait à l'encontre de la demande spontanée des voyageurs pour des vols sans escales. Les compagnies risquent donc d'y être à priori opposées. C'est pourquoi le travail de consultation du CAEP est ici essentiel.
	Mécanisme	Le mécanisme lui même, dès lors qu'il est de portée internationale et non discriminatoire devrait être bien accepté par les acteurs. A condition que le grand public y ait été sensibilisé

Criteres Socio-Economiques		
Equite Sociale	Equité face à la pollution	Cette norme doit amener une réduction des émissions au plan global.
	Equité face aux revenus	Cette norme doit amener une réduction de la consommation et donc du coût du voyage. L'économie réalisée devra profiter à ceux qui font « l'effort » de faire escale : la compagnie et le passager.
	Equité face aux alternatives de comportement possibles	Les compagnies seront incitées à optimiser le choix des appareils en fonction des distances totales et des escales possibles.

Criteres Technico-Economiques		
Efficacite	Efficacité environnementale estimée	Bonne dans l'absolu pour les objectifs de la norme. Elle doit néanmoins s'intégrer dans un système global de réduction de la pollution qui favorisera le développement d'appareils à forte capacité de passager et rayon d'action limité (effort de R&D)
	Recettes générées	Sans-objet
Efficience	Coûts administratifs	Modérés. Ils se limitent aux travaux de conception et d'implémentation des textes. Les coûts de contrôles sont intégrés pour l'essentiel aux coûts de certification dont les critères évoluent pour correspondre à la norme.
	Coûts de déploiement	Modérés. Le déploiement consiste en l'adoption de la norme.
	Déformation du comportement économique des acteurs	Pour les compagnies une telle norme les incitera à revoir leur politique d'exploitation de certaines lignes, voir à recourir à d'autres types d'appareils mieux optimisés. Pour les industriels, cette norme constituerait une incitation au développement d'appareils pour lesquels la priorité est donnée à l'emport de passager et plus au rayon d'action.

Instrument :	Les normes environnementales dans l'aviation :	Normes à concevoir pour limiter le rayon d'action des aéronefs

Critères Politiques

Gouvernance Du Dispositif	Phase de conception du dispositif	Au sein du CAEP. Cette mesure visant prioritairement les vols longs et très longs courriers, sa conception doit faire l'objet de discussions au plan international, comme pour les normes limitant les émissions du cycle LTO. Il s'agit ici de ne plus autoriser l'exploitation des aéronefs dès lors que l'emport carburant limite la charge transportable. Des études devront être menées pour déterminer les lignes actuellement exploitées qui pourraient être concernées par la mesure, puis pour évaluer les solutions d'escales qui pourraient être mises en place. Le groupe chargé de ces études devra aussi évaluer les risques de dérapage des redevances d'aéroports aux escales imposées
	Décision	Comme pour les normes du cycle LTO, le CAEP assiste le Conseil de l'OACI dans la définition de l'évolution des normes et pratiques environnementales à instaurer au plan mondial. Les recommandations du CAEP font l'objet de rapports établis à la suite des réunions officielles du CAEP et adressés au conseil. L'assemblée de l'OACI entérine les propositions du Conseil.
	Mise en œuvre	Calendrier d'entrée en vigueur d'une norme à la suite de son adoption par l'Assemblée
Echelle Géographique	Niveau de décision	Assemblée de l'OACI – niveau international
	Niveau d'application	Mondial
Communication	Agenda de l'actualité	Un nouveau rapport spécial du GIEC au sujet de l'aviation et de l'atmosphère planétaire pourrait constituer un véritable élément fédérateur pour une mise à l'agenda du CAEP
	Acteurs de la communication (association, gouvernement, élus…)	L'OACI, les industriels et les compagnies
Acceptabilité De La Mission, Des Objectifs, De L'instrument	Contexte socio-économique, élaboration de la mesure,	Cette norme irait à l'encontre de la demande spontanée des voyageurs pour des vols sans escales. Les compagnies risquent donc d'y être à priori opposées. C'est pourquoi le travail de consultation du CAEP est ici essentiel.
	Mécanisme	Le mécanisme lui même, dès lors qu'il est de portée internationale et non discriminatoire devrait être bien accepté par les acteurs. A condition que le grand public y ait été sensibilisé

Critères Socio-Economiques

Equite Sociale	Equité face à la pollution	Cette norme doit amener une réduction des émissions au plan global.
	Equité face aux revenus	Cette norme doit amener une réduction de la consommation et donc du coût du voyage. L'économie réalisée devra profiter à ceux qui font « l'effort » de faire escale : la compagnie et le passager.
	Equité face aux alternatives de comportement possibles	Les compagnies seront incitées à optimiser le choix des appareils en fonction des distances totales et des escales possibles.

Critères Technico-Economiques

Efficacité	Efficacité environnementale estimée	Bonne dans l'absolu pour les objectifs de la norme. Elle doit néanmoins s'intégrer dans un système global de réduction de la pollution qui favorisera le développement d'appareils à forte capacité de passager et rayon d'action limité (effort de R&D)
Efficience	Coûts administratifs	Modérés. Ils se limitent aux travaux de conception et d'implémentation des textes. Les coûts de contrôles sont intégrés pour l'essentiel aux coûts de certification dont les critères évoluent pour correspondre à la norme.
	Coûts de déploiement	Modérés. Le déploiement consiste en l'adoption de la norme.
	Déformation du comportement économique des acteurs	Pour les compagnies une telle norme les incitera à revoir leur politique d'exploitation de certaines lignes, voir à recourir à d'autres types d'appareils mieux optimisés. Pour les industriels, cette norme constituerait une incitation au développement d'appareils pour lesquels la priorité est donnée à l'emport de passager et plus au rayon d'action.

Annexe 5. Analyse multicritère d'une taxe environnementale sur le kérosène

Instrument	Taxes	Instauration d'une taxation du kérosène

Critères Politiques

Gouvernance Du Dispositif	Phase de conception du dispositif	Le prélèvement de l'impôt relevant directement de la souveraineté des Etats, la fixation d'une taxe sur le kérosène au plan international exigerait un accord entre des pays aux intérêts et aux sensibilités divers, ce qui semble irréaliste. De plus une telle mesure remettrait en question l'un des fondements de organisation internationale de l'aviation (non taxation des soutes internationales)
	Décision	L'OACI serait l'instance où une telle mesure pourrait être discutée, mais la décision de la mise en œuvre relèverait de chaque Etat individuellement.
	Mise en œuvre	Bien qu'étant un instrument « simple », compte tenu des questions de souveraineté que cela pose, la mise en œuvre d'une taxe internationale paraît très délicate.
Echelle Géographique	Niveau de décision	Assemblée de l'OACI – niveau international
	Niveau d'application	Mondial. L'échelon national n'est pas approprié, car la non taxation des soutes internationales fait l'objet d'un accord international. La taxation du kérosène pour les seuls vols intérieurs, qui ne constituent qu'une petite part de l'ensemble des vols et qui ne représentent pas le segment de marché le plus dynamique, n'aurait qu'un très faible impact environnemental et risquerait de favoriser les stratégies de « tankering » et donc des surconsommations de carburants…
Communication	Agenda de l'actualité	Les compagnies aériennes sont très sensibles à la conjoncture économique. La période de crise économique globale que nous connaissons aujourd'hui est incompatible avec la mise en œuvre d'une telle mesure.
	Acteurs de la communication (association, gouvernement, élus…)	Sans-objet
Acceptabilité De La Mission, Des Objectifs, De L'instrument	Contexte socio-économique, élaboration de la mesure, mécanisme	En période de crise économique, alors que les prévisions de trafic sont à la baisse, les compagnies sont plutôt en attente de mesures de soutien… Il existe une véritable aversion des acteurs à l'idée de taxation.

Critères socio-économiques

Equité sociale	Equité face à la pollution	Une taxation du kérosène touche directement et de manière proportionnelle les pollueurs
	Equité face aux revenus	Une taxation du kérosène toucherait plus durement les compagnies qui n'auraient les moyens de renouveler leur flotte.
	Equité face aux alternatives de comportement possibles	Les compagnies seront incitées à optimiser le choix des appareils en fonction et les stratégies d'exploitation qui minimisent les consommations de carburant.
Affectation des ressources	Double-dividende	Une taxation du kérosène serait source de revenus. La question de l'affectation des produits d'une telle taxe serait de la responsabilité des Etats chargés de la collecte. L'existence d'un double-dividende dépendrait de leurs stratégies de redistribution.

Critères technico-économiques

Efficacité	Efficacité environnementale estimée	Excellente dans l'absolu du fait de l'aversion des acteurs pour ce type de mesure et parce qu'en étant liée au carburant, une telle mesure aurait un impact sur l'ensemble des émissions de l'aviation. Mais dans la mesure où cette aversion en empêche l'implémentation, l'efficacité est théorique.
	Recettes générées	Dépendraient du quotient et de l'assiette.
Efficience	Coûts administratifs	Modérés, au regard des recettes qu'une telle mesure pourrait générés.
	Coûts de déploiement	Fonction de la difficulté à aboutir à un accord international. Sans doute élevés.
	Déformation du comportement économique des acteurs	Evidente, même si les compagnies sont déjà très sensibilisées à la nécessité de consommer moins de carburant

Annexe 6. Analyse multicritère de la modulation des redevances de route

Instrument :	Modulation des redevances	Instauration de la modulation des redevances de route en fonction de l'impact des aéronefs sur l'environnement (efficacité des appareils et distance parcourue)

Critères Politiques

Gouvernance Du Dispositif	Phase de conception du dispositif	Selon la doctrine de l'OACI, les redevances ne peuvent être appliquées qu'en échange d'un service rendu. Les recettes générées par une redevance environnementale devraient donc être affectées à la réduction effective des émissions, par exemple en abondant un fond d'aide à la recherche aéronautique, ou un fond de compensation des émissions. La modulation pourrait aussi s'effectuer à revenu constant. Les avions les moins efficaces paieraient plus pour que les plus efficaces paient moins.
	Décision	Au niveau des Etats, mais la mise en œuvre d'un dispositif de ce type exigerait certainement une implication au niveau de l'OACI
	Mise en œuvre	Les redevances de route existent déjà et leurs montants laissent apparaître de grandes disparités en fonction des zones survolées. L'instauration d'une modulation en fonction de la catégorie d'appareil et de son efficacité ne devrait pas constituer une grande difficulté, mais exigerait un suivi précis des performances énergétiques de chaque type d'appareil.
Echelle Géographique	Niveau de décision	National ou au niveau de l'organisme en charge du service du contrôle en route (qui n'est pas toujours public).
	Niveau d'application	National, avec possibilité de stratégies supranationales, au sein de l'UE par exemple
Communication	Agenda de l'actualité	Le sujet des redevances de route est peu propice à la mise à l'agenda de l'actualité
	Acteurs de la communication (association, gouvernement, élus…)	Les Etats ou l'OACI en cas de mise en œuvre globale.
Acceptabilité De La Mission, Des Objectifs, De L'instrument	Contexte socio-économique, élaboration de la mesure,	Le modèle à revenu constant serait sans doute le mieux accepté. La création d'un fond pour le soutien à la R&D aéronautique serait surtout bénéfique pour les pays dotés d'une industrie aéronautique, même si le fond est géré au niveau de l'OACI. Un fond de compensation des émissions serait sans doute mieux accepté. Mais l'évaluation de l'efficacité des mesures de compensation est délicate.
	Mécanisme	Le mécanisme de redevance de route est répandu. Sa modulation, surtout si elle se fait à revenu constant, ne devrait pas poser de problème d'acceptabilité.

Critères Socio-Economiques

Equité Sociale	Equité face à la pollution	Dans la mesure où la modulation pénaliserait les avions les moins efficaces et/ou qui parcourent les plus grandes distances au profit des plus efficaces, c'est une mesure relativement équitable vis à vis de la pollution.
	Equité face aux revenus	Une telle mesure toucherait plus durement les compagnies qui n'auraient pas les moyens de renouveler leur flotte pour acquérir des avions plus efficaces.
	Equité face aux alternatives de comportement possibles	La modulation des redevances de route constitue une incitation relativement faible au renouvellement des flottes vu le faible poids relatif de ce poste dans les coûts d'exploitation d'un aéronef. L'instauration d'une modulation trop brutale sur une route, ou au-dessus d'un territoire qui n'est pas un passage obligé, pourrait néanmoins conduire certaines compagnies à contourner les zones où cette modulation est à l'œuvre. Une alternative de comportement possible pourrait donc être de parcourir un peu plus de kilomètres pour échapper à la redevance…
Affectation Des Ressources	Double-dividende	Une modulation à revenu constant n'induit aucun double dividende. Si la modulation sert à abonder un fond de soutien à la recherche ou à un fond de compensation des émissions, le double dividende est limité.

Critères Technico-Economiques

Efficacité	Efficacité environnementale estimée	Une étude du CE DELFT de 2002 envisage une assez bonne efficacité de ce type de mesure qui induirait une réduction des émissions de 5% dans le cas d'une mise en œuvre à revenu constant d'une modulation des redevances de route au-dessus de l'espace européen
	Recettes générées	Sans objet dans le cas d'une mise en œuvre à revenu constant. Sinon les recettes dépendent du niveau de modulation et des critères retenus. elles peuvent être très importantes, mais si elles sont affectées aux Etats survolés, il s'agit de taxes, si elles sont affectées à un fond de soutien à la R&D, elles bénéficieront prioritairement aux Etats qui disposent d'une industrie aéronautique.
Efficience	Coûts administratifs	Modérés. La structure de collecte des redevances de route existe déjà.
	Coûts de déploiement	Modérés (cf. supra)
	Déformation du comportement économique des acteurs	Proportionnelle au niveau de modulation, sans doute assez faible au regard du poids des redevances de route dans les coûts d'exploitation d'un aéronef, mais pouvant induire un contournement si une route alternative « moins coûteuse » existe.

Annexe 7. Analyse multicritère de l'inclusion de l'aviation dans un marché de permis d'émission

Instrument :	Inclusion de l'aviation dans un marché d'échange de permis d'émission	Inclusion de l'aviation dans le système communautaire ETS

Critères Politiques

Gouvernance Du Dispositif	Phase de conception du dispositif	L'approche unilatérale de l'UE a déjà était condamnée devant l'assemblée de l'OACI en 2007. Le fait que la mesure touche de manière indifférenciée l'ensemble des compagnies opérant sur le territoire d'un Etat de l'Union démontre que sa conception s'est attachée à ne pas induire de distorsion concurrentielle parmi les exploitants quel que soit leur nationalité. Malgré les réserves émises devant l'assemblée de l'OACI, l'UE a poursuivi sa démarche et la directive incluant l'aviation dans le système communautaire a été adoptée en janvier 2009. L'UE s'est appuyée sur différents rapports, dont certains émanant de l'OACI, qui concluaient à la supériorité de ce mécanisme sur tout autre instrument de réduction des émissions de GES de l'aviation.
	Décision	Prise au niveau du Parlement et de la Commission sous l'impulsion d'Etats membres, dont la France La directive est en cours de transposition par les Etats membres.
	Mise en œuvre	L'inclusion de l'aviation dans le mécanisme ETS existant limite les problèmes de mise en œuvre même si, à la différence des installations industrielles, le décompte des émissions sera plus difficile car il nécessitera un suivi par la compagnie et un contrôle des quantités de kérosène utilisées pour chacun des vols à destination ou au départ de l'Union
Echelle Géographique	Niveau de décision	Décision Européenne
	Niveau d'application	Application « globale » à toutes les compagnies qui opèrent au départ ou à destination de l'Union

Communication	Agenda de l'actualité	La directive a été adoptée à quelques mois de l'ouverture de la conférence de Copenhague qui doit aboutir à un accord post-Kyoto. L'approche volontariste de l'Europe, qui a pu être qualifiée d'unilatérale a fait craindre que des recours soient déposés auprès de l'OACI. Sans que ces risques ne soient complètement écartés, le changement d'administration américaine, qui marque un virage à 180° dans l'approche environnementale et internationale des Etas-Unis, semble constituer une réelle opportunité pour que la démarche européenne s'étende.
	Acteurs de la communication (association, gouvernement, élus…)	Preuve du bon niveau d'acceptabilité de ce type de mesure, les compagnies aériennes et certaines de leurs associations se sont emparées du sujet et ont manifesté leur souhait de voir s'étendre au niveau mondial le dispositif.
Acceptabilité De La Mission, Des Objectifs, De L'instrument	Contexte socio-économique, élaboration de la mesure,	L'inclusion de l'aviation dans le mécanisme ETS s'est inscrite dans la contexte de la remise du prix Nobel de la Paix au GIEC, à la suite de la publication de son 4ème rapport et dans un contexte de prise de conscience croissante des questions environnementales et tout particulièrement celle du changement climatique.
	Mécanisme	Une des particularités du secteur aérien est d'être sensibilisé de longue date à l'optimisation des consommations de carburant. Des progrès très importants ont été réalisés ces 40 dernières années. Les possibilités de progresser de manière significative à court terme sont assez limitées. C'est pourquoi l'inclusion de l'aviation dans un marché (semi-)ouvert est bien acceptée. Cette approche permettra à l'aviation de « financer » la réduction des émissions globales dans des secteurs où les économies de GES sont moins coûteuses. Pour les autres secteurs déjà acteur du marché, l'inclusion de l'aviation est perçue comme un moyen de soutenir les cours. Le secteur aérien ne dispose en effet de pratiquement aucune possibilité d'abattement à court terme.

Critères Socio-Economiques

Equité Sociale	Equité face à la pollution	L'ETS, conformément aux prescriptions du Protocole de Kyoto, intègre aussi le mécanisme de développement propre, pour inciter les pays industrialisés à réaliser des projets de réduction des émissions des pays en développement. Le mécanisme incite donc non seulement à réduire une pollution à l'impact global mais aussi à investir dans les pays les plus pauvres.
	Equité face aux revenus	Dans la mesure où les possibilités d'abattement sont quasi inexistantes, les acteurs du secteur aériens n'auront pas vraiment d'autres choix que de payer. Les compagnies les plus fragiles risquent donc d'être les plus exposées.
	Equité face aux alternatives de comportement possibles	Cf supra.
Affectation Des Ressources	Double-dividende	La mise aux enchères des quotas d'émissions est pour le moment limitée à 15% du total. Ce montant doit notamment servir à couvrir les frais de mise en œuvre et de suivi de la mesure. A l'exception du mécanisme de développement propre, il n'y a pas de caractère redistributif associé à l'inclusion de l'avion dans l'ETS

Critères Technico-Economiques

Efficacité	Efficacité environnementale estimée	Plusieurs études démontrent que l'inclusion de l'aviation dans un marché multisectoriel de permis d'émission serait l'instrument le plus efficace.
	Recettes générées	Sans objet, tant que la mise aux enchères est cantonnée à la couverture des frais directs de mise e œuvre de la mesure.
Efficience	Coûts administratifs	A étudier. Le suivi et le contrôle des déclarations des consommations et leur ventilation sur chaque vol risquent de se révéler très pénalisants sur ce point, à la fois pour les administrations et pour les compagnies. De plus, participer à un marché représente des frais : intermédiaires financier, gestion, cabinets de certification des émissions.
	Coûts de déploiement	Non négligeables. Selon une évaluation interne à la DTA, jusqu'à 4 ETP devraient être nécessaires en 2011, lorsqu'il faudra recevoir, valider et archiver les rapports à la fois d'activité et d'émissions. En régime de croisière, ce sont 2.5 ETP qui seront nécessaires à chaque premier semestre de l'année :
	Déformation du comportement économique des acteurs	Directement dépendant du cours du quotas d'émission.

Annexe 8. Glossaire

ACARE	Advisory Council for Aerospace Research in Europe
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ADP	Aéroports de Paris
AERO	*Aviation Emission and évaluation of Reduction Option*
AEA	*Association of Europeean Airlines*
AFQRJOS	*Aviation Fuel Quality Requirements for Jointly Operated Systems*
AIE	Agence Internationale de l'Energie
AIRE	*Atlantic Interoperability initiative to Reduce Emissions*
ALFA-BIRD	*Alternative Fuels and Biofuels For Aircraft Development*
ANSP	*Air Navigation Services Providers*
APU	*Auxiliary Power Unit*
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
ATM	*Air trafic management*
BTL	*Biomass to liquid*
CAEP	*Committee on Aviation and Environmental Protection*
CDA	*Continuous Descent Approach*
CDG	Charles de Gaulle
CEAC	Conférence Européenne de l'Aviation Civile
CGDD	Commissariat Général au Développement Durable
CH_4	Méthane
CITEPA	Centre Interprofessionel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CO	Monoxyde de carbone
CO_2	Dioxyde de carbone
CO2eq	Equivalent – CO_2
CONSAVE	*CONstrained Scenarios on Aviation and Emissions*
CORAC	Conseil pour la Recherche de l'Aéronautique Civile française
CT	Court terme

CTL	*Coal to Liquid*
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile
DLR	*Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt*
DSNA	Direction des Services de la Navigation Aérienne
DTA	Direction du Transport Aérien
EEA	*European Energy Agency*
EMHV	Ester méthylique d'huile végétale
ENAC	Ecole Nationale de l'Aviation Civile
ETBE	Ethyl-tertio-butyl-éther = éthanol
ETP	Equivalent Temps Plein
ETS	*Emissions Trading Scheme*
FAB	*Functional Airspace Blocks*
FCA	Futur Carburant Alternatif
FR	Forçage radiatif
Gt	Giga-tonne : 10^9 t
GES	Gaz à effet de serre
GHG	*Greenhouse Gas* (cf. GES)
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GIFAS	Groupement des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales
GTL	*Gaz to liquid*
GWP	*Global warming potential.* Cf. PRG
H_2	Hydrogène
H_2O	Eau, eau liquide, vapeur d'eau
HFC	Hydrofluorocarbures
HVO	*Hydrogenated Vegetal Oils*
IATA	*International Air Transport Association*
IEA	*International Energy Agency*
IFP	Institut Français du pétrole
IPCC	*International Panel on Climate Change* (GIEC)
IRN	Instrument de réduction des nuisances
LCH_4	Méthane liquide
LH_2	Hydrogène liquide
LMD – IPSL	Laboratoire de Météorologie Dynamique – Institut Pierre-Simon Laplace
LNG	*Liquefied Natural Gas*

LOSU	*Level Of Scientific Understanding*
LT	Long terme
LTO	*Landing and Take Off*
MEEDDAT	Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire
MT	Moyen terme
Mt	Méga tonne (10^6 t)
N_2O	Protoxyde d'azote
NEXTGEN	*NEXT GENeration Air Transport System*
NO*x*	Oxydes d'azote
O_3	Ozone
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
ONERA	Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales
PAX	Passager
PCRD	Programme Cadre de Recherche et Développement
PFC	Perfluocarbones
PIB	Produit Intérieur Brut
PKT	Passager-kilomètre-transportés
PPM	Parties par millions
PRG	Pouvoir de Réchauffement Global
R&D	Recherche et développement
SCC	Socle commun de connaissance
SESAR	*Single European Sky ATM Research*
SDC	Sous-direction de la construction
SDD	Sous-direction du développement durable
SF_6	Hexaflorure de soufre
SO*x*	Oxydes de soufre
STAC	Service Technique de l'Aviation Civile
SWAFEA	*Sustainable Way for Alternative Fuel & Energy for Aviation*
TRL	*Technology Readiness Level* (niveau de maturité technologique)
TSE	Toulouse School of Economics
UK-DefStan	*Defense standards UK* (norme carburant militaire)
UTCF	Utilisation et Changement d'affectation des Terres et des Forêts
XTL	*Anything To Liquid*, carburant obtenu par le procédé Fischer-Tropsch

service technique de l'Aviation civile
31, avenue du Maréchal Leclerc
94381 BONNEUIL-SUR-MARNE CEDEX
Tél. 33 (0) 1 49 56 80 00
Fax 33 (0) 1 49 56 82 19

Site de Toulouse
9, avenue du Docteur Maurice Grynfogel - BP 53735
31037 TOULOUSE CEDEX
Tél. 33 (0) 1 49 56 83 00
Fax 33 (0) 1 49 56 83 02

Centre de test de détection d'explosifs
Centre d'essais de lancement de missiles - BP 38
40602 BISCARROSSE CEDEX
Tél. 33 (0) 5 58 83 01 73
Fax 33 (0) 5 58 78 02 02