LES DOSSIERS

Académie de l'Air et de l'Espace
Air and Space Academy

Comment volerons-nous en 2050 ?

Dossier 38 - 2013

ERRATUM

Une erreur qui s'était glissée dans la figure 9, page 55, a été corrigée dans cette version.

Dossiers récents

n°37 Le Traitement des situations imprévues en vol, 2013
n°36 Quel avenir pour l'industrie aéronautique et spatiale européenne ?, 2013
n°35 Trafic aérien et météorologie, 2011
n°34 Une stratégie à long terme pour les lanceurs spatiaux européens, 2010
n°33 Les Aéroports face à leurs défis, 2010
n°32 Prise de risque : conclusions et recommandations, 2009
n°31 Pour une approche européenne à la sécurité dans l'espace, 2008
n°30 Le Rôle de l'Europe dans l'exploration spatiale, 2008
n°29 Le Transport aérien face au défi énergétique, 2007
n°28 La Sécurité des compagnies aériennes, 2007
n°27 L'Europe de l'Espace ; enjeux et perspectives, 2006
n°26 Compagnies de transport aérien à bas prix, 2006
n°25 La Révolution des drones, 2005
n°24 L'Impact du trafic aérien sur l'environnement, 2004
n°23 La Menace balistique : quelle politique pour la France et l'Europe ?, 2004
n°22 L'Europe et les débris spatiaux, 2003
n°21 Retour d'expérience dans l'aviation civile, 2003

© Académie de l'air et de l'espace, 2013
Tous droits réservés
Image de couverture *:*
Airport: © ADPI - Concept plane © Airbus SAS 2010 - Satellite © ESA-J.Huart - Photomontage : © Arnaud Ribes

ISBN 2-913331-54-8
ISSN 1147-3657

TABLE DES MATIÈRES

1. DÉMARCHE 6

2. VISION DU TRANSPORT AÉRIEN EN 2050 8

2.1. Société, démographie et économie 8
2.2. Volume du marché 8
2.3. Qualité de service 9
2.4. Construction aéronautique 10
2.5. Énergie 10
2.6. Prix du billet et structures d'exploitation 11
2.7. Environnement 12
2.8. Les services de la circulation aérienne 12
2.9. Utilisation des moyens satellitaires 13

3. RECOMMANDATIONS ESSENTIELLES 14

3.1. Efficacité 14
3.2. Économie 14
3.3. Acceptabilité par la société 15
3.4. Affirmation de la position de l'Europe 15

4. DÉMOGRAPHIE, SOCIÉTÉ ET ÉCONOMIE 16

4.1. Le transport aérien dans le monde 16
4.2. Démographie 17
4.3. Société 18
4.4. Économie 19
4.5. Normes et règlements 21
4.6. Institutions 21
4.7. Conclusion 22

5. VOLUME DU MARCHÉ 23

5.1. Principes de la nouvelle approche du trafic 23
5.2. Niveau des ressources consacrées au transport aérien 24
5.3. Allocation des ressources 24
5.4. Réponse opérationnelle du système de transport 24
5.5. Modélisation du trafic aérien 24
5.6. Jeu d'hypothèses 25
5.7. Résultats de la modélisation 25
5.8. Conclusion 27

6. QUALITÉ DE SERVICE 28

6.1. Rendre le transport aérien plus attractif 28
6.2. Sécurité/Sûreté 30
6.3. Mettre en œuvre une vraie comodalité 31
6.4. Justifications/explications 31
6.5. Émergences et éventualités 34

7. CONSTRUCTION AÉRONAUTIQUE 35
7.1. Introduction 35
7.2. La flotte d'avions en 2050 35
7.3. Industrie de construction aéronautique et préservation de la place de l'Europe 43

8. NOTE RELATIVE AUX HÉLICOPTÈRES 45

9. ÉNERGIE 46
9.1. Disponibilité du jet fuel conventionnel 47
9.2. Utilisation accrue des ressources fossiles 48
9.3. Les biocarburants 50
9.4. Conclusions et recommandations 51

10. STRUCTURES D'EXPLOITATION ET PRIX DU BILLET 53
10.1. Rappel des hypothèses 53
10.2. Prix de vente du billet d'avion 53
10.3. Les droits aériens et le développement du transport aérien 56
10.4. Les compagnies aériennes 56
10.5. Les aéroports 59
10.6. Recommandations 64

11. ENVIRONNEMENT 66
11.1. Le contexte environnemental 66
11.2. Le bruit 66
11.3. Émissions locales et qualité de l'air 68
11.4. Effet de serre et réchauffement climatique 69
11.5. Interdépendances et exigences environnementales 71
11.6. Émergences dans le contexte environnemental 72

12. LES SERVICES DE LA NAVIGATION AÉRIENNE 73
12.1. La raison d'être des services de la navigation aérienne est la sécurité 74
12.2. aviation commerciale : entre coûts directs et performances du système 74
12.3. L'aspect institutionnel est déterminant dans l'évolution du système 76
12.4. La réduction des coûts 76
12.5. La capacité 76
12.6. La gestion des priorités face à des ressources rares 77
12.7. Les techniques sont suffisantes mais des améliorations sont possibles 77
12.8. D'une industrie de développement de systèmes à la fourniture de services 79
12.9. Pour les autres aviations, les choix sont politiques 80
12.10. Recommandations pour l'Europe 81

13. CONTRIBUTION DE L'ESPACE AU TRANSPORT AÉRIEN 82
13.1. Télécommunications 83
13.2. Navigation 84
13.3. Surveillance 84
13.4. Recherche et sauvetage 85
13.5. Recueil de données pour les services à l'aéronautique 85
13.6. Fonctions d'assistance à l'équipage et aux passagers 86

Annexe 1 : Résumé des valeurs numériques 88
Annexe 2 : Personnes ayant participé aux travaux 89
Annexe 3 : Glossaire 90

AVANT-PROPOS

Le transport aérien facilite d'abord la mobilité des personnes et des biens, mais aussi favorise la formation aux métiers de recherche et de production et contribue largement à l'équilibre de la balance des paiements de l'Europe. De surcroît, il a des retombées positives dans bien d'autres secteurs qui en font un contributeur significatif de l'élévation du niveau de vie, du progrès social et de l'amélioration du bien-être européen.

Cependant dans le contexte de libre concurrence et d'incertitude économique mondiale, ce secteur fait l'objet de rivalités géopolitiques justifiant la mobilisation de tous les acteurs et décideurs européens. Sensible aux défis auxquels le transport aérien pourrait avoir à faire face, l'Académie de l'air et de l'espace (AAE) a décidé en 2009 de lancer des études prospectives sur le devenir du transport aérien. « Comment volerons-nous en 2050 ? », c'est la question posée. L'Académie cherche par ce dossier à y répondre et aussi à proposer des recommandations qui permettent à l'Europe aéronautique de préserver sa place dans le monde.

Après études et échanges dans le milieu international, l'Académie publie le présent dossier, n°38, qui effectue la synthèse des résultats obtenus au cours des quatre années écoulées. Son originalité consiste dans la prise en compte des aspects exogènes au transport aérien que sont la démographie, la société et les perspectives économiques mondiales, avec leurs influences sur le marché du transport aérien commercial, la qualité de service, la sécurité/sûreté. Sont analysées ensuite leurs répercussions sur la construction aéronautique, les ressources énergétiques, les structures d'exploitation et le prix du billet. Sont enfin abordées les conséquences sur l'environnement, la navigation aérienne et les possibles apports de l'espace. Des recommandations importantes portant sur des choix institutionnels, industriels et plus en amont sur la recherche et la formation en découlent. Elles suscitent beaucoup d'intérêt de la part des personnalités à qui elles ont été déjà présentées.

Au-delà de ce dossier, l'Académie poursuit ses analyses dans le même domaine en approfondissant des points particuliers mis en lumière par les travaux présentés ici. Ce complément fera l'objet d'un dossier ultérieur.

Philippe Couillard

Président de l'Académie de l'air et de l'espace (AAE)

1. DÉMARCHE

Avec ses spécificités de liaison directe et rapide entre villes éloignées, le transport aérien joue un rôle sociétal, social et économique majeur tant au niveau mondial qu'au niveau de l'Europe. Quelques chiffres[1] permettent d'illustrer cette place reconnue de tous : un chiffre d'affaires mondial de 538 milliards de dollars (Europe : $176Mrd), 8,3 millions d'emplois opérationnels (Europe : 1,86), 618 milliards d'achats de marchandises et services, soit 9,3 millions d'emplois (Europe $213 Mrd, soit 2,19). L'Europe tire profit des atouts du transport aérien, mais bénéficie plus encore de retombées sociales, industrielles et intellectuelles de l'aviation, laquelle contribue largement à sa balance des paiements, facilite la mobilité des personnes et des biens, favorise la formation aux métiers de recherche, de développement et de production avec des retombées dans bien d'autres secteurs. L'aviation contribue, de manière essentielle, à l'élévation du niveau de vie, au progrès social et à l'amélioration du bien-être dans l'Europe. Dans un contexte de généralisation de la libre concurrence et d'incertitude économique mondiale, ce secteur constitue un champ de concurrence commerciale et de rivalités géopolitiques qui justifie la mobilisation de tous les acteurs et décideurs européens.

Sensible aux défis auxquels le transport aérien doit faire face, l'Académie de l'air et de l'espace a demandé à la Commission Prospective (CP) d'évaluer les risques à l'horizon 2050 et d'émettre des recommandations pour les réduire.

Cette commission, indépendante et bénéficiant de par l'origine de ses membres de compétences et d'expériences, s'est réunie en séances plénières et en groupes de travail suivant les thèmes interagissant sur le transport aérien que sont : la démographie mondiale, l'évolution du volume du marché, la disponibilité de l'énergie, l'effet sur l'environnement, la qualité de service attendu, la construction aéronautique, le service de la navigation aérienne, les structures d'exploitation des aéroports et des compagnies aériennes, l'utilisation de moyens spatiaux, en usant d'une démarche multidisciplinaire itérative.

Résolument, la commission prospective n'a pas opté pour une démarche de scénarios différenciés extrêmes, mais a élaboré une vision basée sur une projection qu'elle estime cohérente et probable. Elle a considéré que le transport aérien commercial de passagers, par sa dimension prépondérante dans l'activité aérienne, en constituait un indicateur

1 *Source : "Aviation: benefits beyond borders", publication ATAG, mars 2012.*

majeur permettant d'en apprécier l'évolution, et s'est attachée en détail à ce domaine. Le transport du fret, les aviations d'affaires et générale, les hélicoptères et les drones sont traités de manière marginale mais il est considéré que les problèmes majeurs identifiés leur sont applicables en général, à certaines spécificités près que le lecteur saura interpréter.

La réflexion a été élargie lors du colloque "Comment volerons-nous en 2050 ?" organisé en mai 2012 à Toulouse. Finalement les travaux de la commission ont donné lieu au présent dossier qui présente **en chapitre 2 sa vision du transport aérien en 2050 et en 3 les recommandations essentielles** pour l'atteindre. Les chapitres suivants contiennent les actions à mener d'ici là ainsi que l'ensemble des recommandations.

Le tableau en Annexe 1 résume les valeurs numériques utilisées et l'Annexe 2 donne les noms des personnes ayant participé aux travaux.

Sur le site de l'Académie[2] on trouvera un rapport complet de la CP avec des annexes plus détaillées pour chacun des thèmes étudiés.

Note importante : Le lecteur pourra apprécier le potentiel important que présente le transport aérien avec son cortège d'opportunités de développement tant technologique que social. Le mérite de ce dossier est de permettre d'identifier les actions permettant de les favoriser.

Alain Garcia

Président de la Commission Prospective

2 *www.academie-air-espace.com/upload/doc/ressources/CP-2050-VOLUME1.pdf*
www.academie-air-espace.com/upload/doc/ressources/CP-2050-VOLUME2.pdf

2. VISION DU TRANSPORT AÉRIEN EN 2050

2.1. SOCIÉTÉ, DÉMOGRAPHIE ET ÉCONOMIE

D'après les données de la Banque mondiale et du Centre d'études prospectives et d'informations internationales (CEPII) en France, la population mondiale atteint près de 9,3 milliards, l'Europe étant en légère décroissance à partir de 2020 alors que l'Amérique du Nord est en légère croissance. L'Asie de son côté culmine en 2050 vers 5 milliards, l'Afrique, continuant sa croissance, passe alors vers 2 milliards. En augmentation, la population vieillissante est disponible pour voyager, mais avec des besoins accentués de bonne qualité de traitement. La classe aisée est en plein essor, spécialement en Asie. Compte tenu de ces émergences, la demande de mobilité a crû.

Sur le plan économique, le taux moyen annuel de croissance du PIB mondial est de 2,8 % pour la période allant de 2010 à 2050. L'Europe passe progressivement d'un poids de 33 % en 2010 à 17 % en 2050, l'Amérique du Nord respectivement de 29 % à 22 % et l'Asie-Pacifique de 26 % à 42 %.

2.2. VOLUME DU MARCHÉ

La réflexion s'est concrétisée sous la forme d'une nouvelle modélisation s'appuyant sur des travaux universitaires et reposant sur deux constatations :

- les ressources utilisées mesurées par le chiffre d'affaires du transport aérien "passagers" suivent une évolution proportionnelle à celle du PIB ;
- l'utilisation de ces ressources en fonction de la distance à parcourir met en évidence une propension à se déplacer de type "gravitationnel" (c'est-à-dire en proportion de l'inverse du carré de la distance).

Cette modélisation donne un volume du trafic aérien exprimé en PKT[3] et permet de prévoir les évolutions du nombre de passagers, du nombre de vols ainsi que celle de l'emport moyen.

3 *Passagers Kilomètres Transportés*

La modélisation ainsi établie a conduit aux facteurs de croissance suivants :

- triplement du nombre de PKT (passant de 5,1 à 15,4 Téra PKT) soit un taux annuel de croissance de 2,8 % ;
- triplement du nombre de passagers (passant de 2,7 à 7,9 milliards de passagers) avec une faible croissance de la distance moyenne parcourue ;
- doublement du nombre de vols (passant de 28 à 61 millions de vols) s'expliquant par une croissance de l'emport moyen (de 94 à 128 passagers par vol) résultant d'une augmentation de la taille moyenne des appareils et de coefficients de remplissage améliorés.

En Europe, du fait de son rétrécissement économique relatif (sa part dans le PIB mondial chute de 32 % à 17 % entre 2010 et 2050), les prévisions correspondent à des facteurs multiplicatifs moindres :

- 1,4 pour le trafic en PKT ;
- 1,2 pour le nombre de passagers et le nombre de vols du fait de l'estimation de croissance de la distance moyenne parcourue en avion dans le continent suite au développement des trains à grande vitesse.

Les projections ainsi obtenues conduisent à une estimation des livraisons annuelles d'avions limitée à 1 200 unités, elles sont moins optimistes que celles affichées par les constructeurs aéronautiques.

2.3. QUALITÉ DE SERVICE

En 2050 la qualité de service au passager est significativement améliorée tant en aisance et sécurité du voyage en avion qu'en sûreté.

Le confort du passager a été accru et rend le transport aérien encore plus attractif.

Tous les acteurs du transport aérien fournissent une information personnalisée, claire et complète aux passagers, sachant que les systèmes de communication automatisés n'ont pas éliminé les interfaces humaines, spécialement en cas de crise.

En matière de **sécurité des vols**, et pour tenir compte de l'augmentation du trafic **la sécurité a été améliorée d'un facteur global de 4 par rapport à 2010,** aucun continent n'ayant un niveau de sécurité deux fois plus faible que le niveau moyen mondial.

En matière d'investigation après accidents, les enquêtes techniques sont effectuées par des organismes reconnus sur le plan international couvrant la même territorialité que les organismes de surveillance, mais indépendants de ceux-ci, et leurs résultats, qui sont publics, sont utilisés par l'enquête judiciaire.

En matière de sûreté le contrôle perdure et même s'intensifie. Ces contrôles ont été améliorés sous l'angle de l'éthique et de la liberté individuelle car moins pénalisants, plus discrets et n'engendrant plus de délais d'embarquement ou de transit. Enfin les réglementations et pratiques de contrôle de sûreté aux niveaux européen et mondial ont été harmonisées.

Les transports en commun de substitution (rail, route et parfois mer) sur de courtes ou moyennes distances (possibilité de redondance) sont considérés davantage comme

complémentaires de l'avion que concurrentiels. Les réseaux de transports européens (aériens et terrestres) ont été optimisés afin de permettre de basculer dans certains cas (problèmes climatiques ou sociaux) d'un mode de transport à un autre en accroissant la résilience du système de transport.

2.4. CONSTRUCTION AÉRONAUTIQUE

Du fait du remplacement progressif des flottes par les avions produits dans les années 2010, ou proches de l'être, et du niveau de maturité insuffisant des solutions alternatives, les avions volant en 2050 sont similaires à ceux de 2010, tout en ayant bénéficié de progrès continus en aérodynamique, masse et efficacité propulsive. Ainsi les gains de performance des avions, associés à ceux du contrôle du trafic aérien et des opérations des compagnies aériennes , permettent une **réduction de la consommation de la flotte moyenne de l'ordre de 35 % par PKT**, soit une multiplication par 2 de la consommation de carburant pour un trafic PKT triplé, alors que les meilleurs avions bénéficient jusqu'à 40 % de réduction de la consommation par rapport aux avions de technologie de 2010. **Les configurations alternatives** comme l'aile volante ou encore plus l'avion rhomboédrique n'ayant pas démontré leurs avantages **ne peuvent exister qu'en nombre marginal** et donc n'affectent pas les résultats globaux résultant de la famille des avions de configurations similaires à celles de 2010.

Au niveau européen l'industrie aéronautique est en position :

- **de concevoir et fabriquer des produits compétitifs, à des coûts de production acceptables** ;
- d'offrir des **métiers attractifs** pour les jeunes, après leur avoir fait suivre un enseignement et une formation de haute qualité, et de **maintenir un minimum de capacité de production stratégique ;**
- **de tirer bénéfice des technologies actuelles** afin d'atteindre les gains en consommation de carburant indiqués ci-avant et, en parallèle, de continuer à étudier de nouvelles configurations innovantes, comprenant une propulsion intégrée plus efficace ;
- **d'augmenter l'utilisation d'automates** en vue d'améliorer le niveau de sécurité, **avec intervention humaine du type managérial couvrant les conditions exceptionnelles** (par exemple un nouveau type de pilotage : un ingénieur-pilote à bord et une capacité sol apte à suivre et aider, voire reprendre les vols qu'elle suit) ;
- de coopérer avec la Chine, de façon équitable, en préservant savoir et savoir-faire, et **en ne délocalisant que le strict nécessaire**.

2.5. ÉNERGIE

Le kérosène aéronautique ou jet fuel reste, du fait de ses propriétés uniques, le carburant du transport aérien commercial ; sa disponibilité est un point dur. La demande, toutes activités confondues, est passée de 250 millions de tonnes/an (Mt/an) en 2010 à 450-500 Mt/an, au minimum, en 2050. Avec la connaissance de 2012 des futurs volumes de production et même en haussant la part de kérosène aéronautique extraite du pétrole brut de 6-7 % à 10 %, un déficit est apparu vers 2035-2045, conduisant

à des tensions importantes sur le marché de ce produit. Il a donc fallu trouver dès la période mentionnée de l'ordre de 100 Mt de carburants alternatifs supplémentaires de propriétés équivalentes à celui de 2010 ("drop-in"), parmi lesquelles :

- les transformations chimiques du charbon et du gaz naturel (Coal To Liquid-CTL et Gaz To Liquid-GTL) et,
- les carburants d'origine biologique ou biocarburants, progressivement utilisés.

Quant aux autres voies énergétiques souvent citées comme l'hydrogène et l'électricité, leur densité énergétique pour l'ensemble propulsif, comprenant : carburant, stockage à bord, distribution et combustion du carburant, ne permet pas d'envisager la construction et la mise en service d'un avion de transport de passagers pour 2050. À noter que dans le cas de l'hydrogène des précautions importantes seraient à prendre pour éviter des risques importants d'incendie.

Compte tenu de la tension existant alors entre l'offre et la demande en matière d'énergie pour le transport aérien avec le surcoût possible de production des solutions alternatives au pétrole qui nécessite de lourds investissements, et des effets de taxations supplémentaires, il a été estimé raisonnable de considérer dans les études un prix au marché du baril de pétrole (ou l'équivalent) de 250 US$. (L'effet de l'exploitation récente des gaz de schiste avec son développement incertain devra être évalué.)

2.6. PRIX DU BILLET ET STRUCTURES D'EXPLOITATION

Avec le carburant au prix de 250 US$ le baril**,** le prix de vente moyen par kilomètre n'augmente que de 10 % en monnaie constante avec les progrès d'efficacité énergétique des avions (consommation unitaire réduite de 35 %), les gains de productivité de toutes natures annoncés pour toutes les autres dépenses, dont celles relatives aux effectifs et sans augmentation des taxes. Le coût relatif du carburant a presque doublé dans le prix du billet, représentant alors la moitié (5,2 cUS$ sur 10,7 cUS$/km).

Le droit aérien international a évolué dans le cadre d'une concurrence équitable.

La plupart des aéroports ouverts au trafic commercial ont investi pour faire face à la croissance et aux nouveaux services demandés, notamment en matière de sûreté, de traitement des bagages et d'accès terrestres. Mais il a fallu aussi construire environ 200 nouvelles plates-formes essentiellement dans les pays en développement (hors Europe et États-Unis), où le nombre de vols a triplé. Toutes les régions du monde sont bien desservies ; il faut toutefois signaler les problèmes très ardus, faute de terrains disponibles assez grands, pour continuer à bien desservir quelques villes comme Londres, Tokyo ou Mumbai.

Les grands hubs ont continué à se développer plus vite que les autres aéroports parce qu'ils ont permis les gains de productivité et d'efficacité environnementale apportés par les gros porteurs.

Autour de ces grands aéroports se sont créées des cités aéroportuaires (Aérotropolis). Ce fut l'occasion de bâtir avec les riverains des relations de confiance : l'aéroport n'est

plus considéré seulement comme un lieu de passage et de nuisances au profit “d’étrangers”, mais comme une cité dynamique, source de richesses et d’emplois, ce qui a facilité son acceptation locale.

2.7. ENVIRONNEMENT

Grâce à un encadrement réglementaire ferme, **le bruit** a fortement diminué et la tendance générale, malgré la croissance du nombre de vols, s’est poursuivie du fait du renouvellement de la flotte. Ainsi, il est estimé que l’énergie sonore totale a diminué de 15 à 20 % entre 2010 et 2050. Cependant, pour certaines plates-formes à forte densité de trafic, le bruit reste un enjeu majeur et est surveillé, en prenant en compte des études appropriées sur les effets psycho-acoustiques.

Les **émissions totales** ont été relativement stables entre 2010 et 2050 grâce à la combinaison entre l’augmentation du trafic, la réduction de la consommation de carburant par passager/km et des émissions de ces gaz du fait de l’amélioration des techniques et des procédures opérationnelles.

Les émissions de particules font l’objet d’une attention croissante et les émissions de NOx restent relativement stables.

En ce qui concerne les effets de serre et le réchauffement climatique, l’aviation est toujours essentiellement concernée par les émissions de CO_2, compte tenu du maintien de l’utilisation majoritaire de carburants du type kérosène.

En 2010 l’industrie aéronautique a affiché des objectifs très ambitieux, dont une partie adoptée par l’OACI[4] : 1,5 % par an d’augmentation d’efficacité en consommation de carburant jusqu’en 2020 (2 % pour l’OACI), croissance neutre en carbone à partir de 2020, et émissions totales de CO_2 divisées par 2 en 2050 par rapport à 2005 (industrie seulement). Malgré son estimation de croissance de trafic nettement plus basse que celle de l’industrie, il est apparu à l’AAE très difficile que les progrès techniques suffisent à compenser les effets de cette croissance. **Aussi des efforts de recherche intensifs y ont été consacrés et la communauté s’est mobilisée pour produire de nouvelles solutions “émergentes”, pour une utilisation standard à l’horizon 2050.**

2.8. LES SERVICES DE LA CIRCULATION AÉRIENNE

Aux États-Unis et en Europe, la croissance du trafic ayant maintenant durablement ralenti, la priorité qui était donnée aux problèmes de capacité du système s’est en conséquence portée sur une réduction de la consommation de kérosène et de l’impact environnemental ainsi que sur la réduction des coûts des services de la navigation aérienne. Cependant le problème de capacité continue à exister sur les grandes plates-formes aéroportuaires principalement en Europe, aux États-Unis et en Chine, et a nécessité la mise en place de solutions innovantes. Dans le reste du monde le trafic a continué à croître fortement encore longtemps et donc le manque de capacité est pénalisant pour les

4 *Organisation internationale de l’aviation civile*

zones concernées n'ayant pas adopté des solutions au moins identiques à celles des États-Unis et de l'Europe.

L'aspect institutionnel est déterminant dans l'évolution du système au plan mondial et régional. La comparaison États-Unis-Europe en 2010 est instructive[5] : avec 35 000 personnes les États-Unis contrôlent un trafic 70 % supérieur à celui de l'Europe qui mobilise 57 000 personnes et le coût total par vol y est deux fois inférieur. Les principales raisons de cette différence en sont : l'unicité de l'organisme de contrôle du trafic aérien aux États-Unis, la séparation entre les budgets de la Federal Aviation Administration (FAA) et les recettes, et le fait que l'organisme de gestion des flux a autorité sur la capacité des centres.

Consciente de l'opportunité d'améliorations importantes, la Commission européenne a mis en place, dans les années 2000, les deux paquets législatifs du **Ciel unique européen non appliqués encore en 2012. En 2050 une souveraineté européenne sur l'espace aérien permet une plus grande intégration et la résolution des problèmes de capacité et d'efficacité.**

Pour la gestion des limitations temporaires de capacité lors de crises, la mise en place d'un **mécanisme de priorités et de régulation, différent du principe premier arrivé - premier servi** permet d'optimiser les capacités, par exemple lors de la gestion des flux en approche, et cela reste vrai quels que soient les systèmes et les institutions.

En Europe l'augmentation de l'efficacité et la réduction des coûts globaux pour les opérateurs ont nécessité **des mesures complémentaires tant organisationnelles que de recherche de nouvelles solutions de systèmes et services.**

2.9. UTILISATION DES MOYENS SATELLITAIRES

L'Europe a mis en œuvre ses capacités d'innovation et son potentiel technologique pour rester l'un des leaders dans le développement des infrastructures et des services aéronautiques à base de satellites au cours des prochaines décennies, et a gardé ainsi une place dans les développements économiques induits.

Les domaines suivants ont été renforcés :

- des télécommunications par satellites,
- de la navigation à base de satellites,
- de la recherche et du sauvetage.

Grâce à la mise en place d'un dialogue pérenne entre experts de l'aéronautique et du spatial des actions efficaces ont pu être portées sur la **surveillance des avions**, du **recueil de données de terrain**, du **recueil de données de météorologie et d'environnement**, de la **sécurité**, **télésurveillance et assistance au contrôle de l'avion** et enfin de la **télémédecine** à bord des avions.

5 *Source : Performance Review Commission*

3. RECOMMANDATIONS ESSENTIELLES

L'AAE recommande les actions suivantes dans quatre axes très importants pour le transport aérien :

3.1. EFFICACITÉ

R 1-1 : Charger un organisme européen de coordonner l'aménagement des territoires, les transports et l'énergie ;

R 1-2 : Transférer la souveraineté de l'espace aérien européen à une autorité unique européenne et regrouper les prestataires de services opérationnels de la navigation aérienne sur des zones géographiques permettant une optimisation réelle du trafic et les séparer des fournisseurs des services techniques ;

R 1-3 : Dans le domaine des télécommunications par satellites, renforcer la sécurité, l'intégrité, la disponibilité et la sûreté des liaisons de données ;

R 1-4 : Mettre en œuvre des réseaux de transport complémentaires assurant une vraie comodalité, résiliente aux incidents ;

3.2. ÉCONOMIE

R 2-1 : Prendre en considération des modèles plus réalistes de prévisions de marché par les décideurs dans l'établissement de leurs plans stratégiques, en particulier pour le niveau des investissements industriels de capacité ;

R 2-2 : Transférer la surveillance de la conformité aux dispositions de l'OACI sur la sécurité à des entités supranationales, à l'échelle des continents ou sous-continents ;

R 2-3 : Charger une entité européenne (ou mondiale), incluant tous les acteurs concernés du transport aérien, de veiller à la disponibilité à terme de l'énergie nécessaire à son fonctionnement ;

3.3. ACCEPTABILITÉ PAR LA SOCIÉTÉ

R 3-1 : Élaborer une charte du traitement des passagers, portant sur leurs droits et la qualité de service, tant au sol qu'à bord, et instituer le contrôle par des instances *ad hoc* ;

R 3-2 : Prendre en compte non seulement les caractéristiques du spectre acoustique, mais aussi les effets aggravants induits par la concentration et la répétition des événements sonores liées aux fluctuations temporelles des flux de trafic ;

R 3-3 : Fixer un objectif d'amélioration de la sécurité d'un facteur 4 d'ici à 2050, par rapport au niveau de 2009 sur un plan mondial, aucun continent ne devant avoir un niveau de sécurité deux fois plus faible que le niveau moyen mondial ;

R 3-4 : Lancer très rapidement un vaste débat et une réflexion du point de vue éthique sur la sûreté et les libertés individuelles ;

3.4. AFFIRMATION DE LA POSITION DE L'EUROPE

R 4-1 : Faire que l'Europe, dans le contexte d'un marché mondial ouvert, et d'un poids économique décroissant relativement, agisse impérativement de manière unie au niveau mondial via l'OMC et l'OACI en vue de l'imposition de règles rigoureuses évitant toute concurrence déloyale et haussant le niveau des standards communs ;

R 4-2 : Faire que ses industriels ne soient pas autorisés, en consentant des transferts de technologie excessifs, à hypothéquer l'avenir au profit de satisfactions immédiates et mettre en place un conseil consultatif de haut niveau pour veiller au maintien des compétences aéronautiques européennes, couvrant en particulier les sujets de formation, de coopération et de délocalisation ;

R 4-3 : Permettre une prudente mais saine consolidation du transport aérien, en révisant dans nombre de pays la législation actuelle qui limite la fusion entre compagnies de nationalités différentes, en assouplissant en particulier les clauses les plus restrictives sur la proportion des parts détenues par des étrangers ;

R 4-4 : Aider les acteurs européens à contribuer aux programmes de R&D et à la définition de normes internationales pour la sécurité et l'interopérabilité ;

R 4-5 : Intensifier les recherches, et lancer des programmes ambitieux et motivants de démonstrateurs, capables de mobiliser les meilleures compétences et d'attirer les jeunes générations, tel qu'un avion de transport intercités très silencieux au bilan carbone très réduit.

4. DÉMOGRAPHIE, SOCIÉTÉ ET ÉCONOMIE [6]

4.1. LE TRANSPORT AÉRIEN DANS LE MONDE

Le développement du transport aérien a bénéficié de la conjonction de facteurs favorables. Le premier est sans doute la sorte de "pax economica" qui a régné à partir des années 50 : sous la protection des mécanismes de paix des Nations Unies et de l'ombrelle de la dissuasion nucléaire, les conflits ouverts sont restés très localisés, cependant que le modèle occidental soutenu par la puissance des États-Unis s'étendait, en particulier sous l'influence d'organisations comme la Banque mondiale, le Fonds monétaire international (FMI) et l'OMC. La libéralisation des échanges au niveau planétaire appelait la mise en œuvre de moyens adéquats de transport rapide de produits de grande valeur, de rencontres entre hommes d'affaires, de déplacements de main d'œuvre.

Le second tient à la rencontre entre d'une part les progrès techniques des avions (masse, aérodynamique, systèmes de guidage, pilotage, navigation et propulsion devenus très sûrs, très fiables et plus économes et utilisant de plus en plus les techniques de l'information et de la communication), et d'autre part la disponibilité du carburant à coût modéré. Une organisation assez stricte de la sécurité des vols et de la gestion du trafic, avec une normalisation poussée, sous l'égide notamment de l'OACI, émanation de l'ONU, en a tiré le meilleur parti.

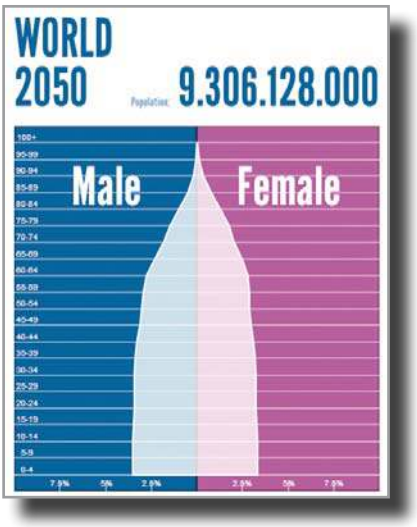

Figure 1 : Distribution de l'âge de la population mondiale en 2050 par sexe

Ces performances techniques ont permis de transformer l'offre de transport par air, passant

6 *Ce chapitre a extrait toutes ses données de documents publics, accessibles sous Internet. Il n'a pas paru opportun de tous les mentionner.*

dans les 50 dernières années d'un service accessible seulement à une minorité peu sensible au prix, à un transport accessible à beaucoup, où chacun est sensibilisé à la dépense. On se rapproche ainsi d'un transport de masse. Aux États-Unis, l'étendue du territoire, le niveau de vie de la population et les avantages comparatifs du mode aérien sur les autres modes de transport ont conduit à le banaliser et ont permis à leurs constructeurs de s'établir dans un quasi-monopole américain. Désormais, ces conditions favorables au transport aérien s'étendent pratiquement au monde entier, et conduisent à l'émergence d'autres constructeurs. Alors que les pays occidentaux sont confrontés à une diminution de leur influence économique, la Chine fera usage de sa puissance pour utiliser et produire des appareils, en concurrence sur le marché occidental. D'autres pays émergents suivront. Plus tard, l'Afrique de par sa démographie et ses dimensions d'immense continent, devrait offrir les opportunités de la construction d'un système complet de transport aérien.

Dans une approche prospective les questions qui se posent sont la pérennité du contexte général favorable au transport et les rééquilibrages entre régions. La problématique est donc réellement géopolitique.

4.2. DÉMOGRAPHIE

La CP a retenu comme base de ses réflexions les projections démographiques de l'ONU "The 2010 revision", selon la variante médiane. Ces projections font état d'une population mondiale de 9,3 milliards d'habitants en 2050. La période autour de 2050 se caractérise par le début d'une décroissance de la population chinoise, et la proximité du plafond de population mondiale. Cette population sera marquée par un vieillissement général, à l'exception de l'Afrique, qui sera en très forte croissance. L'Europe ayant terminé son cycle de transition démographique sera en déclin. L'Amérique du Nord en revanche se maintiendra. La prédominance démographique de l'Asie sera donc forte.

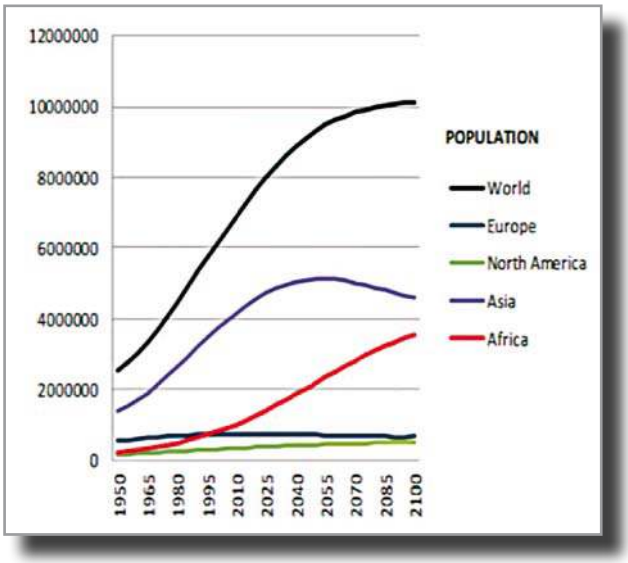

Figure 2 : Croissance de la population mondiale

La baisse de fécondité est largement constatée presque partout, sauf dans certains pays, souvent pauvres. L'extrapolation de cette tendance n'est pas toujours sûre, non plus que celle de l'accroissement de l'espérance de vie, cause du vieillissement. Néanmoins, une

augmentation de la population mondiale de l'ordre du tiers de l'actuelle ne peut manquer de poser des problèmes d'alimentation, de santé, d'occupation des sols, et de disponibilité de sources d'énergie.

Les migrations seront importantes, les nombres retenus par l'ONU correspondent aux objectifs des politiques, mais peuvent être dépassés par la réalité. La formation de diasporas jeunes et nombreuses dans des pays vieillissants peut marquer la société.

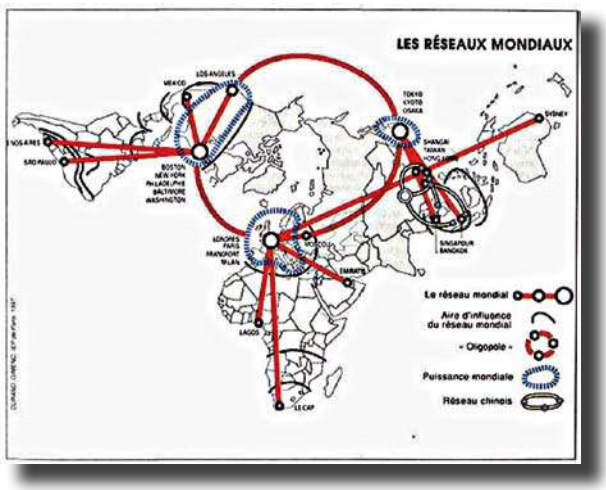

Figure 3 : Les réseaux mondiaux

Globalement l'urbanisation se poursuivra à un rythme élevé, soit pour la recherche de subsistance, soit pour accéder à des services de haut niveau. Outre la multiplication des métropoles, plusieurs mégalopoles se développeront, relativement planifiées en Chine, plus spontanées ailleurs ; elles structurent les réseaux de communication et de trafic des échanges mondiaux. La desserte régionale de ces mégalopoles en toutes matières posera des problèmes. Un retour à une semi-ruralité est plausible, mais restera encore limité.

4.3. SOCIÉTÉ

La CP a considéré que les aspirations et le mode de vie de la société mondiale ne changeraient pas profondément à l'horizon 2050, malgré des épisodes plus troublés. Des conflits régionaux peuvent être attendus, causés par la pénurie d'eau, les déplacements de populations dus aux effets du changement climatique, la mainmise sur les ressources précieuses (pétrole, métaux), les chocs interculturels avec les migrants ; la CP a pris l'hypothèse qu'ils resteraient localisés et de durée limitée. La stabilité d'ensemble s'accorde avec celle des grands ensembles tels que les États-Unis, la Chine ou l'Europe, l'Afrique accompagnant son expansion démographique et économique et poursuivant sa transition vers des régimes plus proches du type occidental.

L'humanité n'échappera pas à ses contradictions, désir d'équipements technologiques et de déplacements lointains, propension à la vitesse et à la consommation rapide, face à des préoccupations environnementales multipliées.

Associées aux réactions aux conséquences du changement climatique, les exigences sociétales de réduction des nuisances et des pollutions devraient logiquement conduire à des normes et règlements plus sévères. On ne peut cependant exclure que seules les menaces immédiates telles que les événements extrêmes, soient prises en compte,

laissant les besoins énergétiques du développement économique prévaloir en matière de gaz à effet de serre.

Sous l'égide de l'ONU, les programmes visant les "Objectifs du millénaire" ne paraissent cependant pas pouvoir faire beaucoup mieux que de contenir aux proportions actuelles les taux de pauvreté et de privation des moyens d'hygiène et de développement, laissant place à des frustrations et ressentiments.

La stabilité relative supposée ne suffira donc pas à écarter les menaces terroristes dont la caractéristique est de transporter un conflit local à l'échelle mondiale. Parallèlement, les organisations non gouvernementales (ONG), en nombre croissant, augmenteront leur pouvoir face aux entreprises transnationales. Celles-ci sauront en compensation exploiter les tendances sociétales et les failles d'une organisation mondiale encore en gestation à l'horizon considéré.

4.4. ÉCONOMIE

L'hypothèse de base est que l'économie mondiale continuera de fonctionner peu ou prou dans le même dispositif, qu'on peut qualifier pour l'essentiel de libéral. Les tentations de protectionnisme seront fortes, notamment à cause de la raréfaction des ressources en énergie et matières premières, mais resteront sans doute limitées, voire volatiles, à cause des interdépendances de plus en plus fortes entre États, en raison même de ce contexte. La société ne se détournera pas du commerce international, ni du tourisme.

L'épreuve la plus forte proviendra de la raréfaction des ressources d'énergie fossiles. Compte tenu de ce problème et de l'impact des conflits, la CP a retenu un taux moyen de croissance du PIB nominal mondial de 2,8 % l'an de 2010 à 2050, soit un triplement en conditions économiques constantes. La part de l'Asie (Chine, Inde, Indonésie, Japon) sera alors très largement prédominante, malgré le maintien de la position des États-Unis. La répartition présumée du PIB entre régions est celle généralement admise, après la croissance des pays du "BRICS" (Brésil - Russie - Inde - Chine - Afrique du Sud) étendue notamment au Mexique, à la Turquie et à l'Indonésie (cf. études diverses de la Banque mondiale, du FMI, de Goldman-Sachs, de PricewaterhouseCoopers, du CEPII). Quant à l'Europe, le consensus se fait autour d'une diminution marquée de sa place dans l'économie mondiale, jaugée par sa quote-part au PIB mondial, divisée au moins par 2, voire 3 pour certains pays (en monnaies courantes reflétant la puissance dans les échanges) à l'horizon 2050.

La croissance globale moyenne dissimule des disparités assez fortes entre pays, et de fortes inégalités internes. La CP n'est pas entrée dans une analyse de ces inégalités, qui peuvent provoquer des instabilités, et a implicitement admis que l'enrichissement atteindrait une proportion élargie de la population. L'extension d'une "classe moyenne" dans les pays émergents et en développement, catégorie accédant par l'aisance financière à un transport aérien lui-même plus accessible, promet un accroissement soutenu pour l'industrie de l'aérien.

Cette projection globale à 2,8 % pour le PIB est plus modeste que les projections publiées, notamment chez les constructeurs aéronautiques ; les comparaisons sont rendues diffi-

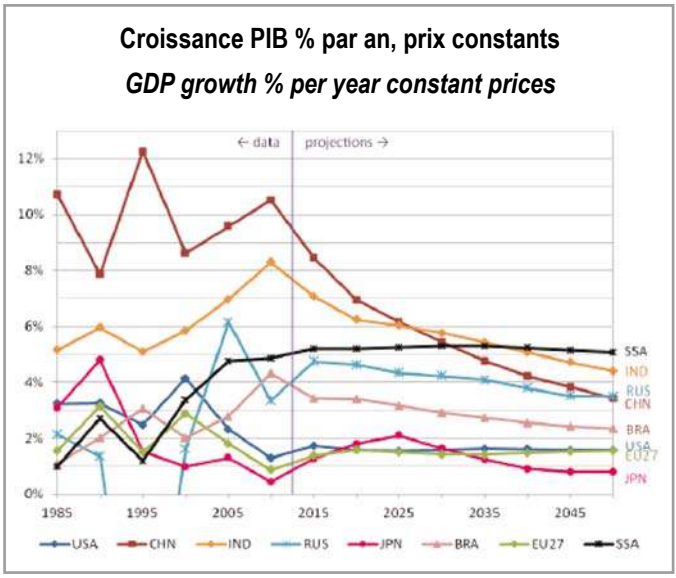

Figure 4 :

Croissance du PIB, Source: Fouré, Bénassy-Quéré et Fontagné (2012) CEPII

ciles par l'utilisation de diverses définitions du PIB (nominal ou en parité de pouvoir d'achat, en monnaies constantes ou courantes) ; compte tenu de la nature internationale du transport aérien il a paru plus adapté de s'en tenir à une évaluation du PIB nominal au taux de change en US dollar constant.

Au total, il a été retenu un accroissement de l'usage du transport aérien, tant pour les passagers que pour le fret. L'ensemble de ces considérations se retrouve dans le rapport entre le chiffre d'affaires des compagnies aériennes et le PIB pris en compte pour évaluer le trafic aérien (voir le chapitre suivant consacré au volume du marché). Le propos principal de la CP porte sur le tableau global, mais l'attention se porte naturellement sur

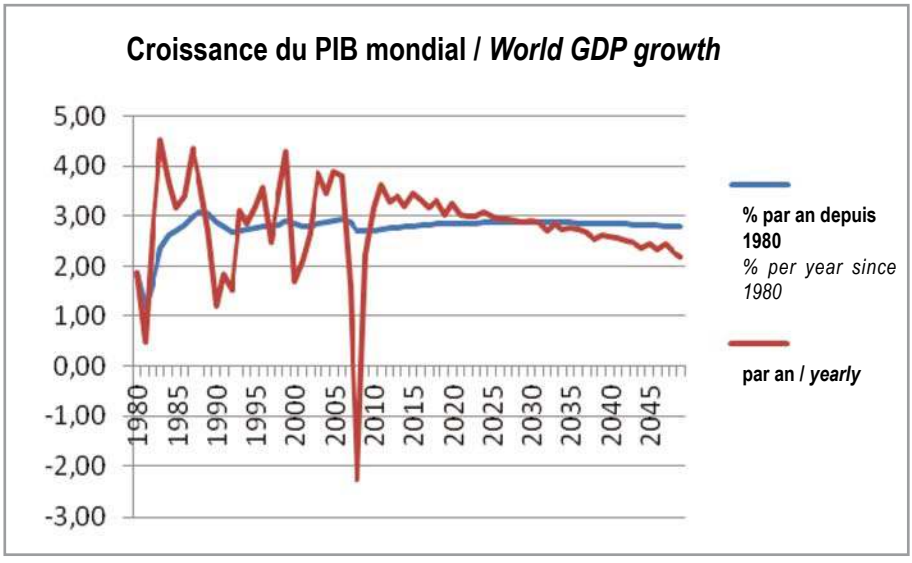

Figure 5 : Croissance du PIB depuis 1980

l'Europe. Encore que la définition de cet espace à l'horizon 2050 puisse varier, en ce qui concerne le transport aérien la croissance devrait y être plus modérée que la moyenne mondiale, pour des raisons assez claires : difficultés d'acceptation sociales des aéroports conduisant à des saturations, démographie stagnante voire décroissante, réseaux de dessertes déjà denses et assez satisfaisants, enrichissement moyen assez faible à partir d'un niveau déjà élevé, concurrence des moyens de surface rapides.

L'importance économique du transport aérien comprend une part propre liée à cette activité (emplois, investissements, consommations) et une part qui peut lui être attribuée parce qu'elle correspond à des activités n'existant que par le transport aérien (tourisme lointain). Au-delà, il est fréquent d'évoquer une part qui bénéficie des avantages du transport aérien pour les échanges commerciaux et l'organisation industrielle ; les limites floues de cette catégorie peuvent donner lieu à des appréciations trop flatteuses.

Dans ce cadre, l'avenir économique du transport aérien dépend de sa capacité à offrir des services toujours plus attractifs pour un prix largement accessible. Le prix du billet comprend de multiples composantes, dont le poste important du carburant. Alors que le prix de la matière première (le brut) et celui des produits synthétiques, eux-mêmes guidés par les investissements et leur rentabilité, s'aligneront à terme, le prix du carburant embarqué sera affecté par les taxations ; les consommations unitaires diminueront encore grâce à la technologie ; les charges de personnel et les redevances peuvent évoluer avec une refonte du modèle industriel et leur réduction compenser d'autres augmentations.

4.5. NORMES ET RÈGLEMENTS

S'agissant des domaines concernant le transport aérien, les exigences sociétales se traduiront très probablement par :

- la sévérité accrue des normes et règlements existants ou l'apparition de nouveaux textes sur les émissions de produits polluants, sur l'énergie sonore émise, et même sur les émissions de CO_2 ;
- le renforcement des normes de sécurité, pour maintenir le nombre d'accidents sous un seuil d'acceptabilité sociétale ;
- le maintien de mesures de sûreté compatibles avec les libertés individuelles, sous des formes plus transparentes ;
- la standardisation des vecteurs énergétiques, en particulier des carburants pour l'aérien, de sorte que leur production à l'échelle mondiale préserve l'économie, la gestion des ressources, et l'environnement (par exemple pour limiter la fabrication de carburant liquide à partir de charbon).

4.6. INSTITUTIONS

La CP souligne l'importance des institutions qui régulent, réglementent et encadrent le transport aérien, telles que l'OACI (et au travers de l'OACI, la convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique, CCNUCC) et l'OMC, UE/CE et EASA pour l'Europe. C'est vers un renforcement ou une expansion de telles institutions que tendent les réflexions de la CP : émergence d'une autorité unique de gestion de l'espace aérien

européen unifié, évolution vers des entités de sécurité aérienne supranationales et internationales (enquêtes et analyses, établissement des normes), création d'une entité européenne en charge de la disponibilité du kérosène et de ses substituts.

4.7. CONCLUSION

Le système socio-économique "Humanité sur Terre", dont la démographie montre la taille significative à l'échelle planétaire, est un écosystème dont le transport aérien assure certaines fonctions d'échanges. Dans ce système complexe, toutes les composantes sont profondément interdépendantes. L'humanité est par nature implantée dans le système "Planète" et interagit avec lui. Les ressources limitées que la planète peut offrir, la variabilité des climats, avec ou sans action de l'humanité, les manifestations de l'atmosphère ou de la croûte terrestre, l'érosion comme la montée des eaux, sont autant de contraintes imposées ; par la puissance technique mise en œuvre dans son exploitation de la planète, l'humanité provoque des changements difficilement réversibles : déforestation, dégradation des sols, pollution généralisée. De multiples rétroactions se manifestent au sein des sociétés composant l'humanité. La puissance des moyens de communication physiques ou virtuels les propage rapidement à l'ensemble de l'humanité. En son sein, une forme de mode de vie des individus, composants ultimes, dite civilisation occidentale, a eu tendance à se généraliser, malgré des confrontations avec d'autres modes.

Les perspectives du demi-siècle montrent que la prééminence de ce qu'il est convenu d'appeler le monde occidental s'efface au profit du monde oriental autour de la Chine et de l'Inde, à la faveur de la généralisation du modèle occidental.

Nonobstant cette évolution, le transport aérien est profondément impliqué dans les rouages de la vie économique et sociale du monde entier, où il joue un rôle assez important pour qu'on puisse le considérer comme indispensable au bon fonctionnement du système global. Cependant, l'avenir du transport aérien peut ne pas être un long fleuve tranquille. Aux conflits d'origines diverses qui ne manqueront pas de le troubler par périodes, s'ajoute, pour l'essentiel, une menace sur son approvisionnement et sa consommation énergétiques en conséquence du changement climatique. Le transport aérien pourrait se trouver à la fois rationné en activité et contraint de changer à grands frais de carburant.

Le système de transport aérien n'est pas près de disparaître, mais il connaîtra sans doute des crises susceptibles de nuire gravement à son rôle-clé dans le développement harmonieux de la planète. L'enjeu fondamental pour le transport aérien, et au-delà pour tout ce qui dépend de lui, est donc d'être en mesure de dominer ces crises, ce qui suppose le développement d'une capacité d'adaptation et fait de l'agilité une caractéristique essentielle.

La recommandation au terme de ce chapitre est de mettre en place à cette fin, un ensemble de dispositifs robustes capables d'anticiper et de trouver rapidement les palliatifs à la concrétisation des menaces, en ayant recours notamment à la constitution de réserves financières, à la recherche de nouvelles solutions, à la multiplication des formations innovantes, à la pratique de comportements civiques.

.

5. VOLUME DU MARCHÉ

5.1. PRINCIPES DE LA NOUVELLE APPROCHE DU TRAFIC

Une première question se pose : pourquoi une nouvelle approche alors qu'il existe aujourd'hui de nombreuses modélisations proposées par les constructeurs, les compagnies aériennes et les administrations ? Plusieurs raisons justifient cette position :

- la principale motivation de changement est à rechercher dans le schéma simpliste retenu dans les projections et basé sur un taux de croissance annuel constant voisin de 5 % : un tel schéma ne nous semble pas pertinent pour une analyse à long terme (horizon 2050) ;
- l'activité de transport aérien se développant dans un environnement contraint en toutes ses dimensions, il nous est aussi apparu nécessaire de prendre en compte dans la prévision les diverses limitations intervenant pour son développement dans les domaines économique et énergétique ainsi qu'une contraction des potentiels d'amélioration d'efficacité tant sur le plan technique que sur celui des opérations ;
- de plus, le trafic aérien ne pouvant être isolé et dissocié de l'ensemble des transports (quel que soit le mode utilisé), l'approche proposée s'intégrera dans les réflexions menées dans le domaine général du transport (travaux conduits à Lyon, par le professeur Yves Crozet et son équipe du Laboratoire d'économie des transports, LET).

L'analyse ne traite que du trafic de passagers analysé dans sa globalité mondiale et au niveau des six grandes régions du monde (Amérique du Nord, Europe, Amérique latine, Asie Pacifique, Afrique et Moyen-Orient). Deux périodes de quarante années chacune ont été prises en compte :

- le passé de 1970 à 2010, comme base de la nouvelle modélisation proposée ;
- l'avenir de 2010 à 2050, pour l'application de la modélisation.

La modélisation proposée repose sur l'approfondissement des trois questions suivantes :

- quelle part de ses ressources le passager est-il prêt à consacrer pour le transport aérien ?
- comment le passager compte-t-il utiliser cette ressource en fonction des sollicitations ?
- quelle réponse opérationnelle apporte le transport aérien pour répondre à ce besoin ?

5.2. NIVEAU DES RESSOURCES CONSACRÉES AU TRANSPORT AÉRIEN

Pour répondre à la question “quelle part de ressources le passager est-il prêt à consacrer pour satisfaire son besoin de transport aérien ?”, une analyse menée au niveau mondial sur la période de 1970 à 2010 des évolutions comparées du chiffre d’affaires du transport de passagers et du PIB (ressources totales) met en évidence un tassement dans la progression : après une croissance soutenue jusqu’au début des années 90, la part de ressources consacrée au transport aérien tend asymptotiquement vers un plafond correspondant à 1,1 % du PIB. Un même constat est vérifié au niveau régional.

À l’appui de ce résultat, on peut faire état d’observations similaires en provenance de sources indépendantes. Ainsi, Boeing, dans ses prévisions à 20 ans fait-il le constat du plafonnement du chiffre d’affaires des compagnies aériennes rapporté au PIB ; une même corrélation est signalée indirectement par Airbus et se retrouve dans les dossiers du Laboratoire d’études du transport (LET) pour l’ensemble des transports.

5.3. ALLOCATION DES RESSOURCES

À la deuxième question, “Comment utiliser ces ressources en fonction des diverses sollicitations de transport ?”, la réflexion fait ressortir l’importance du paramètre distance à parcourir. Une analyse du trafic en fonction de la distance parcourue (à partir de données OACI pour l’année 2009) met en évidence une propension à se déplacer variant en proportion de l’inverse du carré de la distance. On obtient ainsi une variation de type “gravitationnel” ; de telles variations gravitationnelles ont été signalées pour représenter de nombreux comportements sociétaux, en particulier dans le domaine des transports.

5.4. RÉPONSE OPÉRATIONNELLE DU SYSTÈME DE TRANSPORT

Pour formuler “la réponse opérationnelle du système de transport aérien” (troisième question), il reste à définir la capacité de l’avion (caractéristique essentielle de la mission, avec le rayon d’action).

Les évolutions passées des flottes montrent une progression de la capacité en fonction du rayon d’action (adaptation de la mission en fonction des décalages horaires et plus grande efficacité opérationnelle) et du volume global de passagers *P* à transporter (on constate ainsi que la croissance du nombre de passagers est absorbée à 60 % par le nombre de vols et à 40 % par la capacité).

5.5. MODÉLISATION DU TRAFIC AÉRIEN

Ces réflexions ont conduit la modélisation suivante de l’évolution des trafics mondiaux et régionaux :

- deux premiers modèles permettent d’estimer successivement la part de ressources (CA “passagers” exprimé en % de PIB) et les trafics en PKT (passagers, kilomètres,

transport), à partir du PIB retenu (mesuré en $), du et du prix du billet ($ par passager et par kilomètre) :

$$(CA/PIB)\ en\ \% = 1{,}1 - 0{,}15 \times e^{-0{,}03 \times (Année - 2010)}$$

$$Trafic\ (PKT) = \frac{(Chiffre\ d'affaires\ en\ \%\ PIB) \times (PIB\ en\ \$)}{(prix\ du\ billet\ en\ \$\ par\ passager\ et\ par\ km}$$

- le modèle élargit la prévision à l'ensemble des flux de trafic : ainsi le nombre de passagers-déplacements $N_{A,B}$ entre les deux régions A (caractérisée par son PIB P_A) et B (caractérisée par son PIB P_B) peut être estimé en proportion du produit des PIB ($P_A \times P_B$) des 2 régions, divisé par le carré de la distance d entre les régions ; le volume $T_{A,B}$ de trafic en PKT, est obtenu en multipliant $N_{A,B}$ par la distance de chaque déplacement.

$$N_{AB} = proportionnel\left(\frac{P_A \times P_B}{d^2_{AB}}\right) \quad et \quad T_{AB} = N_{AB} \times d_{AB} = proportionnel\left(\frac{P_A \times P_B}{d_{AB}}\right)$$

- l'emport moyen E en fonction du trafic et de la mission est estimé à partir du modèle :

$$E = 2{,}8 \times (1 + 0{,}6 \times d) \times (P^{0{,}4} + 6)$$

5.6. JEU D'HYPOTHÈSES

Le jeu d'hypothèses retenues pour l'application de la modélisation est rappelé ci-dessous.

1. Les hypothèses économiques tant au niveau mondial que régional résultent du thème "économie" ; remarquons la notable réduction de la part relative de l'Europe elle-même compensée par une forte augmentation de la part de la région Asie-Pacifique.
2. Le **prix du baril de pétrole** croît jusqu'à 250 dollars en 2050.
3. Le **chiffre d'affaires** des compagnies aériennes est en % de PIB.
4. Le **prix de vente du billet** est basé sur les estimations du thème "structure d'exploitation" prenant en compte à la fois l'amélioration de l'efficacité opérationnelle et l'augmentation du prix du pétrole.
5. La matrice des distances internes et entre régions caractérise l'ensemble des flux de trafic.

5.7. RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION

La figure 6 **montre l'évolution des PKT** au niveau mondial selon diverses prévisions :

- la courbe correspond au constat statistique ;
- le trait pointillé prolongeant la courbe présente l'estimation obtenue par le présent modèle ;
- les triangles et les ronds, correspondant aux prévisions de Boeing et d'Airbus estimées 10 ou 20 années auparavant, sont généralement supérieures aux réalisations au cours de la période 2000 et 2010.

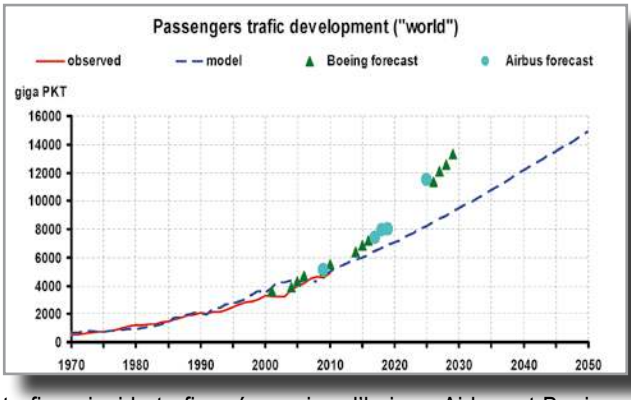

Figure 6 : Évolution du trafic "passagers"

La comparaison des prévisions en 2030, entre le présent modèle et celui des constructeurs (basé sur une croissance de 5 %) met en évidence un décalage d'une quinzaine d'années pour l'obtention d'un même niveau de trafic : ainsi le trafic prévu aujourd'hui par Airbus et Boeing pour 2030, ne serait atteint selon le présent modèle qu'en 2045.

Le tableau ci-dessous détaille le trafic de passagers par régions et par flux de trafic, en présentant les résultats pour les trois années : 2010 (comparaison des résultats donnés par le modèle avec les réalisations) et 2030 (comparaison des résultats donnés par le modèle avec les prévisions d'Airbus et Boeing) et 2050.

Tableau 1 : Trafic de passagers par région	2010 AAE modèle (constat)	2030 AAE modèle (Boeing)	2050 AAE modèle
Hypothèses			
PIB monde (Téra $)	52	90	156
% Europe	32,3%	24,6%	17,6%
% Amérique du Nord	29,0%	24,7%	21,9%
% Asie-Pacifique	26,6%	36,7%	42,4%
CA compagnies (%PIB)	0,95 (0,91)	1,02	1,055
Baril de pétrole ($)	80	210	250
Trafic PKT (Téra)			
Monde	5,1 (4,9)	9,0 (13,3)	15,5
Europe	1,6 (1,4)	1,9 (3,3)	2,2
Amérique du Nord	1,6 (1,4)	2,2 (2,7)	3,3
Asie-Pacifique	1,4 (1,4)	3,8 (5,0)	7,7
Passagers (Giga)			
Monde	2,7 (2,6)	4,8	7,9
Europe	0,7 (0,7)	0,7	0,8
Amérique du Nord	0,9 (0,8)	1,2	1,7
Asie-Pacifique	0,9 (0,8)	2,2	4,0
Vols (Méga)			
Monde	29 (28)	42,2	61,2
Europe	6,2	6,8	7,1
Amérique du Nord	8,8	10,8	13,8
Asie-Pacifique	8,7	15,7	21,2

Le graphique et le tableau mettent en évidence les résultats suivants :

- la bonne concordance entre estimations et réalisations valide la modélisation ;
- les prévisions moins optimistes que celles d'Airbus et Boeing correspondent à un décalage d'une quinzaine d'années pour l'obtention d'un même niveau de trafic ;
- en conséquence directe des hypothèses économiques retenues, une forte réduction de la part de l'Europe et une montée en puissance de l'Asie-Pacifique : entre 2010 et 2050, la part relative de l'Europe dans le trafic mondial chute de 30 à 17% comme son PIB ;
- les prévisions du nombre de passagers et du nombre de vols (informations très utiles pour le dimensionnement des aéroports et de l'ATM) constituent un plus de la modélisation par rapport aux prévisions d'Airbus et Boeing.

5.8. CONCLUSION

On peut retenir de cette nouvelle approche prévisionnelle du trafic aérien et des résultats ainsi obtenus :

- qu'une bonne corrélation entre les résultats obtenus par la modélisation et les données statistiques relevées pour la période passée valide la nouvelle approche ;
- que la faculté d'avoir accès à l'ensemble des paramètres opérationnels (par exemple le nombre de vols, très utile pour toute projection dans l'avenir) est un plus par rapport aux outils actuels de prévision.

La modélisation apporte aussi une vision immédiate de la **sensibilité des résultats** comme le montre le tableau ci-dessous mesurant les conséquences de trois écarts sur l'évolution du trafic en 2050 :

- moindre pessimisme en matière de prévision du PIB en 2050 (plus 10%) ;
- part des ressources allouées plus élevée (1,2% au lieu de 1,1%) ;
- prix plus faible du baril de pétrole en 2050 (200 dollars soit -20%).

Tableau 2 : Trafic en 2050	base	PIB +10%	CA /PIB +0,1%	Baril 200 $ (-20%)
PKT (en téra)	15,5	17	17	17
Passagers (en giga)	7,9	9	9	9
Vols (en méga)	61,2	65	65	65

6. QUALITÉ DE SERVICE

Bien que la qualité de service ne se limite pas à la perception que peut en avoir le passager, elle doit prioritairement répondre aux attentes principales du client, qui seront, en 2050, proches des critères actuels :

- économie du voyage ;
- respect des horaires ;
- aisance dans le processus complet, depuis la réservation jusqu'à la fin du voyage ;
- voyage vu du lieu de départ à la destination finale (durée, fiabilité) ;
- besoin d'informations avant, et pendant le voyage ;
- besoins de communication pendant le voyage ;
- confort ;
- sentiment de sécurité (incluant à la fois la sécurité et la sûreté).

Trois fonctionnalités différentes ont été examinées pour la qualité de service :

1. rendre le transport aérien plus attractif ;
2. renforcer la sécurité et garantir la sûreté du transport aérien ;
3. mettre en œuvre une vraie comodalité.

Ces trois fonctionnalités donnent lieu à des messages et recommandations différents.

6.1. RENDRE LE TRANSPORT AÉRIEN PLUS ATTRACTIF

Rendre le transport aérien encore plus attractif se décline suivant trois séries de recommandations.

6.1.1. Gouvernance européenne et/ou internationale

Une autorité internationale devra contrôler le marché international d'attribution des créneaux ("slots") afin que soient pris en compte les besoins des passagers plus que la conquête ou la protection des parts de marché par tel ou tel transporteur.

Un nombre plafond de fréquences quotidiennes devra être établi pour chaque ligne de façon à éviter l'occupation inutile de "slots" et contribuer à l'augmentation de l'emport moyen de passagers sur chaque vol, améliorant ainsi la fluidité du trafic, l'économie du

transport tout en réduisant les impacts négatifs sur l'environnement en matière de bruit et d'émissions.

Tout en continuant de soutenir une politique favorisant la libéralisation du secteur du transport aérien, les États devront veiller à ce que soit maintenue une pluralité dans l'offre de transport, gage d'une saine concurrence, sachant que les concentrations extrêmes et la libéralisation totale ne vont pas dans le sens de la qualité de service aux passagers.

6.1.2. Droits du passager

Au niveau de l'aéroport

Afin que le passager aérien se sente à l'aise dans les aéroports en tout point de la planète où son voyage le mènera, il faut imposer une signalétique claire et universelle.

Même si l'on doit s'attendre à une généralisation des procédures automatisées, il doit exister la possibilité d'un accueil personnalisé pour les passagers peu familiarisés avec les équipements modernes.

Il faut exiger que dans toutes les plates-formes aéroportuaires un passager handicapé puisse avoir accès à la totalité des installations qui font partie du parcours normal à emprunter pour effectuer son voyage.

De façon à permettre aux populations résidant loin d'une plate-forme aéroportuaire d'avoir accès au voyage aérien, tout aéroport devra être connecté à un réseau de transport collectif.

Toute création d'aéroport ou de terminal devra s'accompagner de la création ou du développement d'une liaison de transport en commun en site propre entre la plate-forme et le centre urbain le plus proche. Cette liaison devra être capable de traiter au moins 50 % de la capacité prévue pour la plate-forme.

Au niveau du voyagiste/transporteur

Le développement de toutes les techniques de l'information aura des répercussions très significatives pour le passager, à qui seront rendus des services plus personnalisés.

Il est nécessaire d'obliger réglementairement les transporteurs et voyagistes à fournir une information claire, complète et non ambiguë sur la tarification et les services offerts.

Il faudra améliorer de façon drastique l'information en cas d'incident (clarté, rapidité, véridicité et exhaustivité des informations), et faire des campagnes d'information générale sur les aléas et contraintes inévitables du transport aérien au profit de l'opinion publique indépendamment d'irrégularités éventuelles du trafic.

Avant et pendant le vol, chaque passager doit être informé des modifications apportées à son voyage et doit pouvoir, sur le champ, choisir de nouvelles dispositions.

6.1.3. Confort du passager à bord

Le volume disponible pour chaque passager doit tenir compte de l'évolution de la morphologie de la population (évolution de la corpulence moyenne) et, en classe à haute-densité,

l'espacement des sièges doit permettre un minimum de mobilité afin de limiter les risques d'accidents médicaux.

Un standard international s'appliquant à tout nouvel avion de transport commercial devra être établi pour les caractéristiques de pression en cabine et de niveau de bruit.

6.1.4. Bagages

Le traitement des bagages sur les plates-formes aéroportuaires est à repenser totalement (reconfiguration des salles d'enregistrement, d'embarquement, cheminement, mise en place de conteneurs standardisés, etc.).

Un système radicalement nouveau de traitement des bagages doit permettre à la compagnie aérienne de confirmer au passager que son bagage est bien à bord, et à l'aéroport d'en assurer la livraison dans les minutes qui suivent l'arrivée de l'avion à sa porte.

6.2. SÉCURITÉ/SÛRETÉ

6.2.1. Renforcer la sécurité

Il est impératif de fixer un objectif d'amélioration de la sécurité d'un facteur 4 d'ici à 2050, par rapport au niveau de 2010 sur un plan mondial, et aucun continent ne devant avoir un niveau de sécurité deux fois plus faible que le niveau moyen mondial.

Il est recommandé que la surveillance de la conformité aux dispositions de la nouvelle annexe de l'OACI sur la sécurité ainsi qu'à celle des annexes 6 (Operation of Aircraft) et 8 (Airworthiness of Aircraft) soit transférée d'ici à 2025 à des entités supranationales, pratiquement à l'échelle des continents (alors que l'OACI se limite à conférer cette responsabilité aux États).

Il faut renforcer les pouvoirs de contrôle et de surveillance de l'OACI (et donc ses moyens) afin de s'assurer du niveau de formation du personnel aéronautique à travers le monde et du maintien des compétences.

D'ici à 2025, les enquêtes techniques liées aux accidents devront être faites par des organismes reconnus sur le plan international, couvrant la même territorialité que les organismes de surveillance mais indépendants de ceux-ci, et reconnus indépendants des intérêts nationaux, comme l'OACI.

Il est recommandé que l'enquête judiciaire, s'il y a lieu d'en faire une, utilise comme base les résultats de l'enquête technique. Il est également nécessaire que les conclusions des enquêtes d'accident soient communiquées publiquement, clairement et complètement.

D'ici à 2020, tous les aéronefs de transport public doivent être localisés (émission, écoute) à tout moment de leur vol.

6.2.2. Garantir la sûreté

Il faut :

- **lancer très rapidement un vaste débat et une réflexion du point de vue éthique sur la sûreté et les libertés individuelles** ;
- **intensifier la recherche** afin de développer des équipements de contrôle de la sûreté non pénalisants du point de vue de la facilitation, c'est-à-dire permettant un contrôle à débit élevé, sans fouille corporelle et sans manipulation des bagages (sauf dans le cas où il faut lever un soupçon) ;
- lancer, au niveau international, une réflexion sur la formation et la surveillance du personnel chargé de la sûreté.

6.3. METTRE EN ŒUVRE UNE VRAIE COMODALITÉ

Il faut :

- **créer avant 2020 une autorité unique** pour l'aménagement du territoire, les transports et l'énergie, à l'échelon européen ;
- **créer des réseaux de transport terrestres collectifs rapides** pour les aéroports importants.

6.4. JUSTIFICATIONS/EXPLICATIONS

La qualité du service de transport aérien se mesure aujourd'hui selon des critères d'appréciation qui sont les mêmes que ceux des autres moyens de transport, c'est-à-dire liés principalement à la sécurité du passager, à son confort dans les différentes phases de son voyage, à la facilité d'accès aux installations aéroportuaires et à la sûreté au sol et à bord. En 2050 ces critères d'appréciation seront les mêmes, mais les niveaux de satisfaction auxquels ils correspondent auront beaucoup évolué, pour tenir compte de changements significatifs intervenus dans les attentes du client sous l'effet de l'expansion démographique et de la mondialisation.

6.4.1. Confort du voyage

Concernant le confort du passager qui, plus souvent qu'aujourd'hui, sera en situation de choisir entre différents modes de transport, il doit être accru pour rendre le transport aérien encore plus attractif.

Bien que le passager n'ait de lien contractuel qu'avec la compagnie aérienne, la diversité des interlocuteurs et autorités qui forment l'interface avec le passager dans le cours de son voyage implique une coopération totale entre eux tous (autorité en charge du transport terrestre/aéroport/autorités d'État/prestataires de service/compagnie aérienne) si l'on veut obtenir l'amélioration nécessaire dans la qualité du service. Les efforts conjugués porteront sur la fourniture aux passagers d'une information personnalisée, claire et complète sur les vols au départ et à l'arrivée (particulièrement en période de crise), sur la tarification et les services offerts, grâce au développement des techniques de l'information. Parallèlement, une éducation civique permettra de faire admettre à l'usager que même en 2050 il existe des événements extérieurs et des cas de force majeure (météo, cendres volcaniques, séismes, etc.) pouvant altérer temporairement un

service de transport aérien qui ne peut, malgré les meilleurs efforts de chaque intervenant, être garanti exempt d'aléas.

Même si le transport aérien doit généraliser – pour sa communication avec les passagers – l'utilisation de systèmes automatisés (tels que bornes, système de localisation, "smartphones", etc.), il lui faudra veiller à ne pas supprimer toute interface humaine, et à réserver un accueil personnalisé pour les passagers (en particulier ceux qui sont peu familiarisés avec le transport aérien ou avec tel aéroport), ceci pour les rassurer et être adapté aux différences culturelles des populations.

Les efforts devront aussi prendre en compte l'effet de l'accroissement significatif du nombre de passagers, l'évolution morphologique de la population (taille, corpulence, vieillissement) et l'accès complet des handicapés aux différentes installations sera effectif. De plus, la conception actuelle du traitement des bagages devra impérativement être repensée, éliminant ainsi les pertes, vols, dommages et retards, événements générateurs de stress. Tout ceci pourra avoir des conséquences sur la configuration des avions, l'aménagement et la taille des aéroports, l'équipement des bagages et en fin de compte, sur l'attractivité du transport aérien.

De leur côté, tout en soutenant une politique favorisant la libéralisation du secteur, les États veilleront au maintien d'une pluralité de l'offre de transport. **Une autorité internationale contrôlera l'attribution des créneaux,** avec comme critère le besoin des passagers et la fluidité du trafic, plus que la conquête ou la protection des parts de marché des transporteurs.

Une charte du traitement des passagers doit être élaborée le plus rapidement possible, et portera non seulement sur leurs droits, mais aussi sur la qualité de service tant au sol qu'à bord des avions. Le respect de cette charte sera contrôlé par des instances *ad hoc*.

6.4.2. Sécurité des passagers

Dans le domaine de la sécurité du passager, le niveau global actuel est de 0,5 accident fatal par million de vols. Cela fait de l'avion l'un des moyens de transport les plus sûrs, bien qu'il existe malheureusement de fortes disparités d'un continent à l'autre. L'augmentation prévisible d'un facteur 3 du nombre de passagers transportés en 2050, correspondant à une multiplication par 2 du nombre de vols, devra donc être accompagnée par un niveau de risque global en diminution dans un rapport 4, aucun continent ne devant avoir un niveau de sécurité deux fois plus faible que le niveau moyen mondial.

Pour atteindre cet objectif, l'OACI a décidé la création d'une nouvelle annexe relative à la sécurité, en complément des annexes existantes ; **il est recommandé que la surveillance de la conformité aux dispositions de cette nouvelle annexe ainsi qu'à celle des annexes 6 (operation of the aircraft) et annexe 8 (airworthiness of the aircraft) soit transférée d'ici à 2025 à des entités supranationales, pratiquement à l'échelle des continents, alors que l'OACI laisse à chaque État cette responsabilité**. On rencontre déjà cette situation en ce qui concerne la conception des aéronefs (par exemple EASA en Europe). Pour gagner en efficacité et ne pas avoir à biffer les particularités nationales qui paralysent toute évolution, il apparaît nécessaire de se doter au

niveau de chaque continent d'une organisation centrale disposant de suffisamment de moyens pour pouvoir effectuer une surveillance opérationnelle des compagnies aériennes et de maintenance qui sont en train d'évoluer en compagnies multinationales, chaque acteur devant suivre des processus de certification équivalents.

Les enquêtes d'accident sont un moyen d'augmenter la sécurité d'une part, et de fournir aux familles des victimes, d'autre part, les informations auxquelles elles ont droit sur les causes des accidents. Le cas de la France montre que l'opinion publique n'a souvent plus confiance dans les conclusions du BEA, qu'on croit dépendant de la DGAC, et s'imagine facilement que le BEA est au service de l'État et des constructeurs. La situation est la même dans les autres pays. On ne pourra sortir de cette suspicion que si, d'ici à 2025, les enquêtes techniques sont faites par des organismes reconnus sur le plan international, couvrant la même territorialité que les organismes de surveillance évoqués précédemment, mais indépendants de ceux-ci, et reconnus être au-dessus des intérêts nationaux, comme l'OACI. Un organisme mondial doit être considéré pour 2050. Les organismes d'enquête doivent pouvoir échanger toutes leurs données en matière d'accidents et d'incidents. Ces organismes sont chargés d'informer les familles des victimes.

L'opinion publique ne comprend pas les délais des enquêtes, ni la différence entre les enquêtes techniques et les enquêtes judiciaires. Cela ajoute au flou, à l'incompréhension et à la défiance. Il est recommandé que l'enquête judiciaire, s'il y a lieu d'en faire une, utilise comme base les résultats de l'enquête technique. Il est également nécessaire que les conclusions des enquêtes d'accident soient communiquées publiquement, clairement et complètement.

Les avions doivent pouvoir être localisés à tout moment de leur vol afin d'assurer le plus rapidement possible les secours SAR et de retrouver rapidement les enregistreurs de vol en cas d'accident. D'ici à 2020, tous les aéronefs de transport public doivent être munis de moyens permettant de les localiser à tout moment de leur vol.

6.4.3. Sûreté

La nécessité d'assurer, en l'intensifiant, le contrôle de sûreté ne peut que s'affirmer. Ces contrôles devront être moins pénalisants du point de vue de la facilitation, être plus discrets et ne plus engendrer de délais d'embarquement ou de transit. En particulier, les passagers ne devraient subir qu'un seul contrôle de sûreté au départ, même s'ils effectuent un voyage complexe avec correspondances. Toutefois les moyens imaginables à ce jour pour atteindre l'objectif pourraient avoir des conséquences inadmissibles sur le respect de l'intimité du voyageur, de sa vie privée et de sa dignité. Il est donc impératif que soient lancés au plus tôt un vaste débat et des réflexions du point de vue éthique sur la sûreté et les libertés individuelles. Au niveau international, on reverra la formation et la surveillance du personnel chargé de la sûreté.

6.4.4. Co-modalité

Les transports en commun de substitution (fer, route) sur de courtes ou moyennes distances (possibilité de redondance) seront considérés davantage comme complémentaires que concurrentiels – c'est la notion de "co-modalité" vers laquelle il faut tendre. Les

développements et limitations des capacités aéroportuaires vont accroître la nécessité d'aménager la co-modalité, d'autant plus que ces évolutions influenceront la stratégie des compagnies aériennes concernant le rôle des hubs. Les accès terrestres actuels des aéroports depuis le centre-ville doivent être améliorés impérativement, en favorisant les transports en commun. Les nouvelles créations de plates-formes seront nécessairement assorties de moyens de desserte par un réseau de transport collectif. La correspondance pratique entre modes de transport doit être organisée pour répondre aux attentes des voyageurs, ce qui nécessite tout d'abord une bonne collaboration de tous les acteurs, car cela conduit à une information cohérente et une billetterie simple. De plus, les réseaux de transport européens (aériens et terrestres) devront être optimisés afin de permettre de basculer dans certains cas (climatiques, sociaux ou autres) d'un mode de transport à un autre, en accroissant la permanence du système. Les choix à faire dépendent donc de l'aménagement du territoire, du coût des redondances et des dépenses énergétiques des différents modes. Il est donc important de créer à l'échelon européen une autorité commune s'occupant de tous les transports, de l'aménagement du territoire et de l'énergie avant 2020 (pour des résultats en 2050).

6.5. ÉMERGENCES ET ÉVENTUALITÉS

En rupture avec les tendances estimées ou projetées, un certain nombre d'éléments pourraient émerger dans la période considérée, modifiant sensiblement le paysage de la qualité de service. En particulier, il faudra étudier avec attention les conséquences des éventualités suivantes :

- dans le domaine de l'attractivité :
  - dégradation rédhibitoire de la ponctualité,
  - concentration excessive des compagnies aériennes,
  - modification des aspirations de certaines catégories de passagers,
  - évolution des normes d'emport (passagers handicapés, bagages…) ;
- dans le domaine de la sécurité :
  - exigence d'un niveau de sécurité encore plus contraignant, du fait d'une judiciarisation à outrance,
  - prolifération des avions individuels ;
- dans le domaine de la co-modalité :
  - évolution de l'environnement institutionnel entre l'aérien et le ferroviaire (par exemple création de compagnies globales inter-modes ou, au contraire, concurrence à outrance entre les modes de transport).

7. CONSTRUCTION AÉRONAUTIQUE

7.1. INTRODUCTION

L'avion, de toute évidence, se situe au centre du système de transport aérien de passagers. C'est la raison pour laquelle la commission Prospective a mené, sous le thème de la construction aéronautique, sa réflexion sur la perspective 2050 selon deux axes complémentaires :

- la composition de la flotte d'avions en service en 2050 ainsi que la définition des avions livrés cette année-là ;
- les caractéristiques de l'industrie de construction aéronautique en général et la préservation de la place tenue dans l'industrie aéronautique mondiale par l'Europe.

7.2. LA FLOTTE D'AVIONS EN 2050

L'amélioration de la flotte mondiale occupe une place centrale dans l'étude menée par le thème "Construction aéronautique". Ce dernier a analysé l'évolution de la flotte mondiale d'aéronefs commerciaux jusqu'aux années 2050, en identifiant d'abord la flotte en service en 2010 et ses caractéristiques, puis les améliorations techniques pouvant être raisonnablement introduites dans la flotte de 2050.

L'évolution de la flotte répond à l'évolution de la demande de transport aérien dont l'aspect quantitatif est précisé par le thème "Volume du marché" qui détaille les besoins du marché en termes globaux de trafic et de paramètres opérationnels, par analyse des tendances historiques. Verra-t-on apparaître des solutions futuristes en complément des avions exploitant les technologies conventionnelles, elles-mêmes poussées vers leurs limites asymptotiques ?

La réponse à cette question est liée aux défis suivants :

1. **Contraintes économiques tant pour les constructeurs et les compagnies que pour les utilisateurs ultimes, les passagers**. Le coût d'exploitation à optimiser est la somme des coûts liés à l'achat (financement inclus), du carburant, de la maintenance, des équipages et des taxes diverses.

2. **Raréfaction et hausse des prix du pétrole fossile**, incertitudes sur la disponibilité de carburants alternatifs au jet fuel (cf. thème "Énergies").

3. **Contraintes environnementales** (cf. thème “Environnement”).

4. **Concurrence accrue des grands pays émergents et développement vers le haut des constructeurs d’avions régionaux.** Ceci va affecter Airbus et Boeing dans leur position de duopole. Dans tous les pays, adapter les moyens (compétences et effectifs) aux besoins des activités de recherche, au développement de nouveaux produits et au suivi en service d’une flotte en forte croissance, constituera une difficulté majeure pour les constructeurs aéronautiques, et de façon similaire pour les compagnies aériennes (pilotes et maintenance), en luttant en outre contre une relative perte d’intérêt des jeunes diplômés pour le monde aéronautique, en particulier vis-à-vis des métiers techniques. Par ailleurs, le maintien du savoir-faire en production nécessite une remise en cause des politiques de délocalisation, qui ne peuvent avoir qu’un effet catastrophique à long terme.

7.2.1. Identification de la flotte 2010

La diversité des demandes pour le transport aérien et les technologies disponibles ont conduit à produire une grande variété d’aéronefs, allant des avions court-courrier monocouloir de faible capacité pour de courts trajets, jusqu’aux gros porteurs de grande capacité pour les longues et très longues distances. Afin de prendre en compte cette diversité d’aéronefs, 5 catégories d’avions ont été identifiées, correspondant exactement à la segmentation du marché : court-courrier turbopropulseur (CC TP), court-courrier turbofan (CC TF), moyen-courrier (MC), long-courrier (LC) et très long-courrier à très grande capacité (VLA).

Le tableau ci-dessous synthétise les principales caractéristiques et performances pour l’avion moyen dans chaque catégorie d’aéronefs considérée ou chaque segment. Seuls les avions de plus de 19 sièges ont été pris en compte. Leur date d’entrée en service (EIS) est indiquée comme date de référence pour les standards technologiques associés. Les caractéristiques et performances de l’avion moyen de chaque segment sont dérivées de l’avion de référence par application de méthodes simples basées sur la formule de Breguet.

Cette formule permet de calculer la longueur de l’étape (***R*** km) que peut effectuer un avion dont on connaît la vitesse (***V*** km/h), la finesse aérodynamique (***f***), la consommation spécifique du moteur (kg/N/h) et les masses au décollage (***Md*** kg) et à l’atterrissage (***Matt*** kg) :

$$R = V \times f / (g \times Cs) \times LN (Md / Matt)$$

Le nombre d’avions est extrait de données de l’OACI. Il apparaît une légère différence avec la flotte considérée par la CP. Les paramètres considérés sont le nombre de passagers (***Npax***) associé à un aménagement de cabine typique, la longueur de l’étape maximale (***Rmax***) et celle de l’étape moyenne (***Rmoy***) exprimées en km. Rmax permet d’estimer les caractéristiques principales (surface et puissance ou poussée) de chaque avion moyen, Rmoy permet d’évaluer le nombre de vols annuels ainsi que la consommation.

Afin de réajuster la consommation de carburant de la flotte AAE sur celle constatée, un facteur de dilution (Dil=1,16) lui a été appliqué, couvrant plusieurs effets (écart de technologie d’un

avion à l'autre au sein d'un même type, vieillissement de l'avion moyen, effet ATM) ainsi que les incertitudes liées aux méthodes utilisées pour l'estimation des performances.

FLOTTE 2010						
AVION	**CC TP**	**CC TF**	**MC**	**LC**	**VLA**	**Flotte AAE** (#OACI)
Nombre A/C	3111	3819	10036	2837	528	20331
Avion de référence	ATR 42	CRJ 700	A320	A330 340	B747 400	
Technologie EIS	1985	2001	1988	1994	1989	
Avion Moyen						
Npax C1	43	66	154	271	375	143
Rmax km	2000	4000	6000	10001	12964	
Rmoy km R1	567	939	1251	4431	6741	1841
Vcr kt TAS	300	446	454	473	482	
Temps bloc h	1,37	1,61	1,96	5,53	8,02	
Utilisation TB/an	2462	2812	2631	3810	4602	
Vols/an	1794	1750	1343	689	573	1377
Carburant kg/vol	718	1940	4265	27580	73429	
Carburant g/pax/km	29,7	31,5	22,1	23	29,1	24,1
LF	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
Dilution	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
Capacité moyenne C2	43	66	154	271	375	121
PAX*10^6	185	342	1622	413	89	2651
PKT*10^9	105	321	2029	1829	597	4881
Distance globale 10^6 km	3165	6275	16865	8657	2041	37004
Vol *10^6	5,6	6,7	13,5	2	0,3	28
Billet Dollars/vol	100	123	143	331	505	179
Recette 10^9 Dollars	19	42	231	137	45	473
Dollars/Pax/Km	0,177	0,131	0,114	0,075	0,075	0,097
Carburant kg/ PKT*1000 Dil	44	46,6	32,7	34	43,1	35,6
Carburant kg 10^9 Dil	4,63	14,98	66,43	62,26	25,69	174

Tableau 3 : Caractéristiques et performances des avions de la flotte 2010

Explications concernant ce tableau :

- R1 : distance moyenne parcourue par un passager **R1** = **PKT** / **Pax**
- C1 : capacité moyenne des avions de la flotte
- C2 : capacité moyenne par vol ***C2= Pax / vol /LF*** (LF : coefficient de remplissage).

7.2.2. Les tendances asymptotiques

Il est fait l'hypothèse que les aéronefs utiliseront un carburant aux caractéristiques proches du carburant actuel, disponible avec parcimonie, à un prix élevé, quelle que soit son origine. Les autres sources d'énergie ne sont pas encore jugées adéquates pour le transport aérien, ni incontournables à l'échéance 2050.

Les améliorations des consommations résulteront donc de l'incorporation progressive des résultats des recherches en cours dans tous les domaines, associée à des choix de paramètres de conception prenant en compte l'impact du prix du carburant sur les coûts d'exploitation, coûts d'exploitation qui constituent cependant le paramètre à optimiser ; compte tenu de l'importance des progrès réalisés dans les quarante dernières années, les gains escomptés dans les quarante prochaines années seront plus faibles en pourcentage et encore plus en valeur absolue, traduisant bien la tendance asymptotique des améliorations.

Ces niveaux asymptotiques sont difficiles à déterminer, et dans ce contexte, une démarche associant réalisme et ambition raisonnable a été adoptée.

Les gains en aérodynamique à grande vitesse résulteront principalement d'une augmentation des allongements et de la prise en compte d'un gain modeste de laminarité. La finesse en croisière sera améliorée en moyenne de 12 à 15 %.

Les gains en consommation spécifique des moteurs "isolés" ont été estimés à 25 % et sont à corriger au niveau de l'avion des effets d'installation (masse du système propulsif et traînée de la nacelle) très dépendants des configurations de l'avion.

Pour les masses de la cellule, un gain de 10 % sur la masse à vide a été retenu.

L'effet cumulé de ces améliorations, combiné avec l'impact des changements de capacité et de longueur d'étape sur le coefficient de la formule de Breguet, est de l'ordre de 32 % en moyenne ; l'amélioration de consommation sur l'étape moyenne en résultant pour le moyen-courrier, avion contribuant le plus à la consommation de la flotte, est présentée sur la planche suivante, qui traduit bien la tendance asymptotique des améliorations ; une même tendance se retrouve sur les autres catégories d'avions.

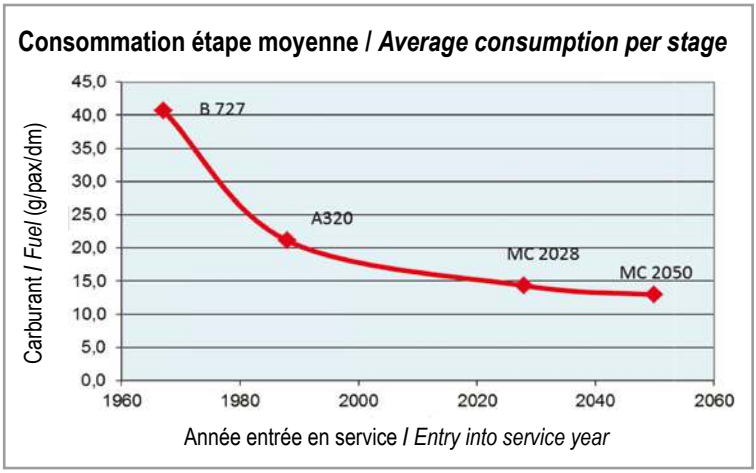

Figure 7 : Tendance asymptotique des améliorations des aéronefs

Par ailleurs, l'incorporation des améliorations ne se fera pas de façon identique, uniforme et simultanée pour tous les segments, seuls les programmes complètement nouveaux bénéficieront du total des gains cumulés en aérodynamique, propulsion et masse ; il y aura des cas de remotorisations et des cas de versions d'avions simplement améliorées d'un modèle existant, donc ne bénéficiant que de gains partiels. Il en résulte que la consommation moyenne des avions de la flotte 2050 ne sera pas représentative du standard technologique de 2050, dont l'application ne sera que partielle.

7.2.3. Les solutions non conventionnelles

De nombreuses études exploratoires et activités de recherche ont été, sont menées depuis de nombreuses années ou vont l'être, par les constructeurs, les organismes de recherche et les universités. Elles portent sur des solutions non conventionnelles, couvrant à la fois de nouvelles configurations et l'utilisation de nouvelles énergies dans le but de réduire de façon significative la consommation de carburant (ou d'énergie) et/ou le bruit induit.

Leur introduction n'est envisageable que si les critères de sécurité, de performances techniques, de coûts opérationnels, de compatibilité environnementale et le volume de l'offre sont compatibles avec la demande du marché. La relaxation de certains critères de coûts opérationnels et de volume de l'offre pourrait permettre l'apparition de nouvelles technologies sur des niches ayant peu d'impact sur les performances de la flotte.

La plus connue des configurations non conventionnelles ou nouvelles est relative à l'aile volante et ses dérivés, objets de nombreux projets de recherche en Europe et aux États-Unis, offrant des améliorations aérodynamiques très significatives (originellement estimées à plus de 15 % pour le facteur d'efficacité aérodynamique M*L/D (produit du nombre de Mach par la finesse), principalement lié à la réduction de la surface mouillée) et des gains de bruit appréciables (dus surtout à l'effet de masque de la configuration). Cependant les limitations (contrôle longitudinal, aspects structuraux et devis de masse) et les risques identifiés (acceptation par les passagers, certification) contrebalancent significativement ces gains potentiels et ne permettent pas, au stade actuel des connaissances, de considérer l'utilisation de telles configurations pour le transport de passagers, quelles que soient la distance et la capacité considérées. La seule application envisageable à terme dans le domaine civil pourrait être le transport de fret, sous réserve que des essais en vraie grandeur soient effectués et qu'une première application militaire à grande échelle entre en service.

D'autres configurations non conventionnelles sont étudiées par les organismes de recherche (BauhausLuftfahrt, EREA) mais la maturité et le degré de validation de ces concepts n'ont pas encore atteint un niveau permettant d'envisager une utilisation pratique significative pour le transport aérien à l'horizon 2050. Il faut néanmoins continuer à étudier de nouvelles configurations "innovantes", comprenant une propulsion intégrée plus efficace.

Pour ce qui concerne les énergies nouvelles, l'hydrogène est depuis longtemps considéré comme un candidat séduisant dans la mesure où pour la même énergie il nécessite 3 fois moins de masse. Malheureusement il nécessite 4,2 fois plus de volume que le kérosène, et ce volume doit être maintenu dans une ambiance cryogénique. D'un point de vue énergétique et en retenant les estimations les plus favorables, le bilan énergétique incorporant

la phase de production, est nettement défavorable. Du point de vue des effets locaux sur la qualité de l'air et globaux sur le réchauffement climatique, l'utilisation de l'hydrogène comme combustible ne produit pas d'hydrocarbures, d'oxyde de carbone, de gaz carbonique, ni de particules, mais un peu d'oxyde d'azote, et surtout beaucoup de vapeur d'eau, d'où un impact potentiel important sur l'effet de serre induit, et par conséquent un bilan environnemental très douteux par rapport au kérosène.

Avec l'hydrogène, la technologie actuelle de motorisation pourrait être maintenue, mais nécessiterait de sérieuses améliorations en ce qui concerne la production, le transport, le stockage et l'avitaillement de grandes quantités de molécules très réactives, au sol comme en vol. Dans ces conditions, l'utilisation de l'hydrogène apparaît incompatible avec les objectifs de sécurité et compte tenu en outre du prix vraisemblablement largement supérieur de l'énergie embarquée, on ne peut pas considérer ce combustible comme un produit de remplacement du kérosène à l'horizon 2050.

L'utilisation de l'énergie électrique à partir de cellules photovoltaïques ou de batteries est souvent évoquée. Malheureusement, la faiblesse des rendements des cellules photovoltaïques nécessite des surfaces alaires incompatibles avec les avions commerciaux actuels, sans même considérer le surcroît de masse, et les progrès envisageables de ces cellules ne suffiront pas à les rendre compatibles en 2050.

Pour ce qui est des batteries électriques, si l'on considère que le court-courrier à turbopropulseur (CC TP) est le meilleur candidat potentiel pour être équipé de batteries, avec des batteries offrant 150 Wh/kg, la masse des batteries représenterait 3 fois la masse maximale au décollage de l'avion de référence. Pour maintenir la charge marchande actuelle sur la même mission, il faudrait une technologie des batteries 50 fois plus efficace en termes de Wh/kg, les moteurs électriques embarqués devant eux-mêmes par ailleurs produire 3 KW par kilogramme. Ces objectifs techniques tout comme économiques semblent hors de portée à l'horizon 2050.

Le marché pourrait aussi évoluer en ouvrant certains domaines avec des demandes nouvelles, comme entrevu ci-dessous.

La desserte intérieure des mégalopoles devrait faire appel à des appareils adaptés ; sous réserve de l'intégration dans le contexte urbain ce marché pourrait devenir significatif, même si c'est a priori le domaine du rail à grande vitesse.

La grande ou très grande vitesse, répondant à un besoin de productivité et de gain de temps, constitue un domaine de recherche malgré les contraintes économiques et environnementales. Le supersonique est toujours à l'étude : il faut une double aptitude (sub- et supersonique), résoudre les problèmes de bruit et de bang sonique, s'intégrer dans le trafic et obtenir des droits. En tant qu'émergence possible, le transport commercial supersonique pourrait réapparaître en fin de période, lorsque les recherches pourraient converger, mais avec un déploiement d'ampleur limitée, et vraisemblablement après une période "probatoire" sur des avions d'affaires supersoniques.

L'hypersonique présente un fort attrait pour les grandes distances (transpacifique), ou pour permettre un aller-retour dans la journée. Le processus implique une motorisation

multiple et des technologies encore peu applicables à des appareils certifiés pour le transport aérien civil.

En résumé :

- **Les solutions non conventionnelles devront continuer à faire l'objet d'une analyse critique approfondie, mais n'apparaissent pas pouvoir contribuer de façon substantielle au transport aérien en 2050**
- **L'avion de 2050 sera équipé de moteurs utilisant un carburant à base de kérosène et de carburants alternatifs aux propriétés identiques, aura une architecture générale classique, mais offrira des performances améliorées.**

7.2.4. Projection sur la période 2010-2050

Le tableau ci-dessous présente les projections de l'AAE élaborées à partir des analyses de la flotte 2010 et des hypothèses adoptées en termes de gains technologiques.

FLOTTE 2050								
AVION		CC TP	CC TF	MC	LC	VLA	Flotte AAE (# OACI)	K 2050/ 2010
Technologie EIS		2025	2041	2028	2034	2029	2050	
Nombre A/C		6505	7766	19077	7379	1401	42128	2,07
Npax	C1	54	74	193	358	482	188	1,32
Rmax km		2420	4840	6667	12964	15186		
Rmoy km	R1	567	937	1250	4426	6719	1961	1,06
Vcr kt TAS		300	446	454	473	482		
Block time h		1,37	1,6	1,96	5,53	8		
Utilisation HB/an		2684	2975	2809	3442	4363		
Flight / year		1956	1854	1435	623	545		
Block fuel kg:vol		567	1377	3554	24006	58739	4658	
g/Pax/km		18,6	19,8	14,7	15,2	18,2	15,7	0,65
LF		0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	1,09
Pax*10^6		580	907	4496	1398	313	7694	2,91
Capacité moyenne	C2	54	74	193	358	482	151	1,25
PKT*10^9		329	850	5618	6187	2102	15086	3,09
Distance globale 10^6 km		7216	13491	34216	20344	5135	80401	2,17
Vols AB*10^6 calcul		12,7	14,4	27,4	4,6	0,8	59,9	2,14
Billet $/vol		120	144	164	367	510	209	1,17
Recette 10^9 $		70	130	737	513	160	1610	3,4
Dilution		1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1
$/PAX/KM		0,212	0,154	0,131	0,083	0,076	0,107	1,1
Fuel/PKT g/km/pax		25,3	27	20	20,6	24,7	21,4	0,6
Fuel 10^9	Dil	8,34	22,91	112,44	127,49	51,87	322	1,85

Tableau 4 : Caractéristiques et performances des avions de la flotte 2050

Cette projection peut se résumer ainsi : il faut deux fois plus d'avions pour satisfaire la demande en PKT, avions plus gros et allant en moyenne un peu plus loin. L'étape maximale a été augmentée pour répondre à la tendance actuelle des demandes des compagnies aériennes, mais avec un pourcentage diminuant avec la longueur de l'étape nominale. En effet, la définition d'avions capables d'étapes, peu nombreuses, de plus de 16 000 km, est pénalisante en consommation et en économie d'exploitation pour l'ensemble de la famille.

Le segment long-courrier a la plus forte contribution aux PKT et à la consommation, le moyen-courrier restant cependant le plus efficace. Il faut signaler que les avions de la flotte 2050 ont des caractéristiques (Npax, Rmax) répondant strictement à la demande et ne sont plus contraints par des limitations technologiques.

La consommation au niveau de la flotte prend en compte la "pyramide des âges" de chacune des 5 catégories d'avions, supposée identique à celle de la flotte 2010, chaque avion moyen bénéficiant des améliorations résultant de 40 années de progrès.

L'amélioration globale de consommation au niveau de la flotte moyenne, résultat des gains technologiques, de l'augmentation de capacité et de la recomposition de la flotte, est de 35 % en termes de consommation par passager, et par kilomètre, sans les effets favorables du taux de remplissage et de la nouvelle gestion du trafic aérien.

La consommation totale est multipliée par 1,85, pour une augmentation d'un facteur 3,1 des PKT.

Une étude de sensibilité des résultats pour la consommation, à iso PKT, en faisant varier les paramètres opérationnels (R1 et C2) montre que les résultats sont robustes ; la consommation étant finalement quasi proportionnelle aux PKT.

En ce qui concerne le bruit, le cumul des niveaux de bruit pour les trois points de certification, s'améliorera de 15 à 20 EPNdB pour les avions équipés de turbofans. Cette amélioration se fera au prix d'une moindre réduction de la consommation pour les turbofans. L'installation éventuelle de moteurs à hélices contrarotatives se ferait avec un niveau de bruit supérieur de 10 EPNdB par rapport aux turbofans de la même génération.

La principale conclusion est donc : la satisfaction de la demande du marché spécifiée par le thème "Volume du marché", avec des PKT multipliés par 3,1 peut être réalisée avec une flotte de 42 000 avions consommant 1,85 fois la consommation de la flotte 2010 (20 331 avions). La longueur de l'étape moyenne varie peu, la capacité et le taux de remplissage augmentent (+25 % et +9 % respectivement).

L'économie d'exploitation résultant de ces nouvelles caractéristiques et performances, sans pression sur les prix de vente, permet de limiter l'augmentation des prix des billets (+10 %) malgré une probable augmentation nette (facteur de 2 à 3) sur le prix du carburant.

7.3. LES CARACTÉRISTIQUES DE L'INDUSTRIE DE CONSTRUCTION AÉRONAUTIQUE ET LA PRÉSERVATION DE LA PLACE DE L'EUROPE

7.3.1. Points caractéristiques de l'industrie de construction

L'industrie de construction aéronautique exerce, pour le transport aérien, un rôle qui comporte plusieurs facettes :

- mener les recherches nécessaires, développer de nouveaux modèles et de nouvelles versions ainsi que les modifications appliquées aux avions à livrer et obtenir leurs certifications ;
- livrer les avions ainsi que les documentations associées (opérations et maintenance...) ;
- apporter le soutien en exploitation, soit pour répondre aux exigences de navigabilité, soit pour résoudre les problèmes en service, soit pour répondre aux besoins exprimés par les compagnies aériennes.

Ce rôle est assuré par une entreprise étendue, aujourd'hui internationale, qui comprend l'avionneur et les fournisseurs, de plus en plus sous-systémiers, avec des responsabilités directes en après-vente.

En face de ce rôle, nous avons retenu les facteurs majeurs d'évolution future de l'industrie aéronautique suivants :

- la volonté politique de certains pays d'être présents ;
- la croissance prévue de la flotte en service ;
- le dépassement technologique rapide, en particulier avec la place grandissante de l'électronique (l'approche systémique de l'aviation s'impose de plus en plus du fait des interactions entre fonctions) ;
- l'évolution des exigences et, en particulier, l'application aux avions en service ;
- l'adaptation des compétences aux évolutions. Cela conduit, avec le respect des règles de l'OMC, au niveau mondial :
  - à une vision plus mondialisée de l'industrie en 2050 avec deux segments :
    - en dessous de 150 places, avec plusieurs avionneurs en concurrence, et une entreprise étendue basée sur le partenariat ou la mise en concurrence ;
    - au-dessus de 150 places, un nombre limité d'avionneurs (trois au maximum) avec des accords de coopération et une entreprise étendue basée sur la mise en concurrence, mais respectant les accords de coopération ;
  - à un développement des activités relatives aux avions en service :
    - activités de maintenance dans des structures spécifiques ;
    - activités de suivi en service et de retrofit partagées entre structures spécialisées et avionneurs/entreprise étendue, ces derniers conservant les compétences nécessaires ;
  - à une vision d'un besoin de compétitivité, généré par la concurrence dans un contexte d'opportunités technologiques et d'attentes des clients (compagnies

aériennes et passagers), ce qui justifie la conduite d'études et de recherches et le développement de nouveaux produits innovants.

7.3.2. Maintien de l'industrie européenne

L'industrie de construction aéronautique européenne tient une place de premier plan dans l'industrie mondiale par la situation de ses avionneurs et sa présence dans les différents domaines de l'entreprise étendue. Elle joue un rôle majeur dans la vie économique et sociale de l'Europe. La vision 2050 est un maintien de cette situation grâce à la mise en œuvre des recommandations suivantes.

Le maintien d'une position mondiale éminente et des effectifs imposent de préserver les compétences de conception et de production de la construction aéronautique européenne.

Dans un contexte d'un marché ouvert il est important d'agir au niveau mondial via l'OMC et l'OACI en imposant des règles rigoureuses :

- **pas de concurrence déloyale**, ce qui sous-entend le respect des mêmes règles concernant le support éventuel des États ;
- **application de standards communs** de haut niveau garantissant la sécurité, le confort des passagers, etc.

Au niveau européen, cela implique :

- **concevoir et fabriquer les meilleurs produits**, à des coûts acceptables répondant mieux que la concurrence à la demande du marché ;
- **préserver la connaissance**, le savoir-faire et la transmission de l'expérience, et pour cela, offrir des métiers attractifs pour les étudiants ayant suivi un enseignement et une formation de haute qualité et, par ailleurs, sur le plan industriel, retenir un minimum de capacité de production stratégique ;
- **améliorer les technologies actuelles** permettant un gain potentiel important en consommation de carburant (comme on le verra, de l'ordre de 40 %, grâce aux améliorations : aérodynamique, masse, propulsion) ;
- **continuer à étudier de nouvelles configurations "innovantes"**, comprenant en particulier une propulsion intégrée plus efficace ;
- **augmenter l'utilisation des automates** en vue d'améliorer le niveau de sécurité, avec intervention humaine du type managérial couvrant les conditions exceptionnelles (par exemple un nouveau type de pilotage : un ingénieur pilote à bord et une capacité au sol apte à suivre et aider, voire à reprendre les vols qu'elle suit) ;
- au niveau européen il est important de **faire le meilleur usage des ressources** en faisant porter les efforts sur les voies les plus prometteuses.

Remarque importante : le marché chinois est sans nul doute très important et on ne peut pas ne pas coopérer avec la Chine. Mais la coopération doit se faire de façon équitable, donc il faut préserver nos savoir et savoir-faire, et **ne délocaliser que le strict nécessaire**.

8. NOTE RELATIVE AUX HÉLICOPTÈRES

Les solutions relatives aux hélicoptères n'ont pas été abordées faute de données suffisantes d'une part et que d'autre part les solutions envisageables ne devraient pas bouleverser les grandes orientations du transport aérien vues ci-avant du fait du poids des solutions concernant les avions.

Cependant il est bon de noter que les hélicoptères permettent de se dispenser de pistes longues et donc constituent un complément idéal de l'avion pour certains secteurs ainsi que pour certaines missions spécifiques. Par ailleurs le recours à des aéronefs à voilure tournante utilisant des procédures d'approche ségréguées et des aires d'atterrissage spécifiques est de nature à faciliter l'accessibilité des aéroports. Toutefois la coexistence avions-hélicoptères sur les grands aéroports reste à organiser.

Toutefois, tout comme les concepts à décollages et atterrissages courts, ces appareils ne représenteront pas une offre de transport quantitativement significative du fait de leur trop forte consommation d'énergie et de leur taille moindre. Enfin les niveaux de bruit produits dans certaines phases de survol et près du sol devraient être notablement améliorés pour autoriser la multiplication des liaisons en milieu urbain. Le développement du milieu social aisé dans certains pays, et en particulier les émergents, associés aux automatismes possibles facilitant le pilotage conduit à penser que le marché ira croissant avec un taux certainement supérieur au taux de croissance du transport public par avion.

De nouveaux concepts (mixtes) sont actuellement en gestation ; aussi des études complémentaires seront-elles nécessaires pour apprécier leurs propriétés et leurs chances de succès, au sens de la capture d'un marché important à terme.

9. ÉNERGIE

Les participants au thème “Énergie” se sont focalisés sur l’objectif de vérifier la disponibilité de la quantité de kérosène aéronautique nécessaire à l’horizon 2050. Cette évaluation utilise les résultats des autres thèmes parmi lesquels le thème “Développement du marché” (hypothèse de base : la croissance du PIB mondial sera de 2,8 % par an, le prix marché retenu du “*jet fuel”* de 250 $ le baril, (en dollars 2010, taxes incluses) et le thème “Construction aéronautique” (progrès technologiques) qui prévoient pour 2050 une taille de flotte et une répartition des avions proches de celles prévues par les constructeurs (Airbus et Boeing) en 2030. Le couplage du thème “Énergie” avec le thème “Environnement” est particulièrement étroit, l’émission de CO_2 en particulier étant proportionnelle à la consommation de jet fuel. Aussi, les carburants de substitution au jet fuel conventionnel devront nécessairement amener une réduction significative des impacts environnementaux de l’aviation. Le résultat de cet exercice a été double :

- le développement prévu de l’aviation amènera à doubler en 2050 la consommation de carburant aéronautique après intégration des améliorations prévues par l’industrie, pour atteindre 450 à 500 Mt (Mégatonnes) par an ;
- les carburants conventionnels issus de ressources fossiles seront vraisemblablement rares et chers, ce qui justifie une attention particulière à porter dès maintenant aux carburants alternatifs.

En conséquence, les recommandations émergentes sont les suivantes :

- **Les incertitudes touchant la production de pétrole et la consommation de l’aviation sont telles que la sécurisation des approvisionnements doit être étudiée et suivie de très près.**
- **Le jet fuel conventionnel pourrait satisfaire jusqu’en 2030-2040 les besoins du transport aérien, sous réserve d’un élargissement techniquement possible de la tranche de raffinage du pétrole en jet fuel (passage de 6 à 10 %). Cette évolution supposerait une diminution des tranches essences et diesel et se ferait donc au détriment d’autres secteurs économiques. Le passage à 10 % ne suffirait pas pour atteindre l’objectif 2050, ce qui encourage à étudier dès maintenant des carburants alternatifs, dont la production devra atteindre environ 100 millions de t par an vers 2050.**

Le recours à d’autres types de combustible (hydrogène) ou de propulseurs (moteurs électriques) paraît aujourd’hui devoir être repoussé dans la seconde moitié du siècle ; ces

solutions exotiques se heurtent en effet encore soit à des questions économiques (coût élevé de l'hydrogène par unité d'énergie, associé à l'absence de moyens de production massive et à la nécessité de concevoir des avions spécifiques), soit à des verrous technologiques (le stockage de l'hydrogène, lorsqu'on inclut les masses des réservoirs et des systèmes associés, et celui de l'électricité ne permet pas les énergies et puissances massiques requises par l'utilisation aéronautique). Enfin, pour l'hydrogène, des solutions pratiques visant à supprimer tout risque d'accident en exploitation seraient à développer.

9.1. DISPONIBILITÉ DU JET FUEL CONVENTIONNEL

Le jet fuel conventionnel est l'un des produits de la distillation du pétrole brut. La proportion actuelle de produit type jet fuel par rapport au pétrole varie suivant les auteurs ; ces données ne sont pas forcément contradictoires car il existe une fraction de kérosène non aéronautique.

La disponibilité du jet fuel dépendra de la disponibilité du pétrole brut, ce qui conduit à s'intéresser à la prospective pétrolière et plus généralement à la prospective énergétique.

On demande par ailleurs à l'aéronautique commerciale de réduire fortement son impact environnemental sur le climat et la qualité de l'air, ce qui sera partiellement permis par les progrès technologiques dans les différentes disciplines (aérodynamique, structures, propulsion, gestion de la circulation aérienne) mais ne suffira pas. C'est à ce niveau que les biocarburants peuvent apporter le complément de progrès souhaité, dans la mesure où la croissance de la biomasse utilise le gaz carbonique atmosphérique. Il sera observé plus loin que l'avantage environnemental des biocarburants doit être soigneusement pesé.

La production de pétrole au cours des prochaines décennies a fait l'objet de nombreuses prévisions, pour des horizons variés, par les organismes internationaux et nationaux, par les compagnies pétrolières et par différentes associations ou "think tanks". Les résultats sont très dispersés ; par exemple, la production de pétrole prévue en 2030 se situe dans une large fourchette allant de 65 Mbl/j (65 millions de barils par jour ou 3,0 Gt par an) à 140 Mbl/j (environ 6,5 Gt par an), la production actuelle étant 86 Mbl/j (4,0 Gt par an). Certains prévoient donc un déclin de la production de pétrole, d'autres une poursuite de la croissance modérée de cette production. Derrière ces divergences se cachent probablement des hypothèses différentes, certaines prévisions ne prenant en compte que le pétrole conventionnel, d'autres intégrant les condensats de gaz naturel, voire les pétroles non conventionnels (pétrole extra-lourds, sables bitumineux, etc.). Une hypothèse moyenne consiste à tabler sur un plafond de production s'établissant à 90-100 Mbl/j entre 2030 et 2040. Ce qui implique dès cette période des difficultés pour faire croître la production de jet fuel à la hauteur de la croissance de la demande, d'une part, et très probablement des tensions sur le prix du jet fuel, d'autre part. La production de 2050 serait de 80 à 95 Mbl/j (3,5 - 4,4 Gt par an).

Il existe deux types de possibilité pour faire face à la carence de jet fuel, soit en utilisant plus les ressources fossiles, soit en développant l'utilisation de ressources renouvelables.

9.2. UTILISATION ACCRUE DES RESSOURCES FOSSILES

Quelle que soit la stratégie adoptée, le choix a été fait par la communauté aéronautique du concept “drop-in”, c’est-à-dire de carburants alternatifs très comparables dans leurs propriétés essentielles au jet fuel conventionnel, ceci afin d’entraîner le minimum de modifications des avions en service ou en développement dont la durée de vie est de plus de 50 ans entre la certification du premier avion et le retrait du dernier avion d’un même type. Ces propriétés essentielles sont d’ordre énergétique (pouvoir calorifique inférieur), physique (domaine d’existence de l’état liquide entre la température de figeage et la température de décomposition), thermo-physique (viscosité). Un point particulier à signaler est la teneur en aromatiques du carburant, qui joue sur son pouvoir de lubrification et sa compatibilité avec les joints, mais qui inversement a un impact sur l’émission de suies, dont les aromatiques sont les précurseurs. Il a été constaté que les agro-carburants de première génération (éthanol ou ETBE et biodiesel) sont inadaptés à l’utilisation aéronautique.

Une possibilité très aérocentrée a été développée par Gérard Théron[7], elle consiste à élargir jusqu’à 10 % la fraction jet fuel du pétrole, ce qui semble ne pas poser de problème technique insurmontable dans les raffineries pétrolières existantes. Cette augmentation permettrait de limiter le déficit de jet fuel à environ 100 Mt en 2050. Toutefois, puisque le kérosène est produit entre les essences et les gazoles, cela nécessiterait un arbitrage en faveur du jet fuel, au détriment des essences et gazoles et donc au détriment du secteur routier principalement. Cet arbitrage ne peut être réalisé que de deux façons : soit par l’intermédiaire des prix, soit par une réglementation gouvernementale.

La figure suivante compare la production de kérosène à partir du pétrole une fois le taux de 10 % atteint et la consommation prédite par la CP, prévision faible par rapport à celles de l’industrie.

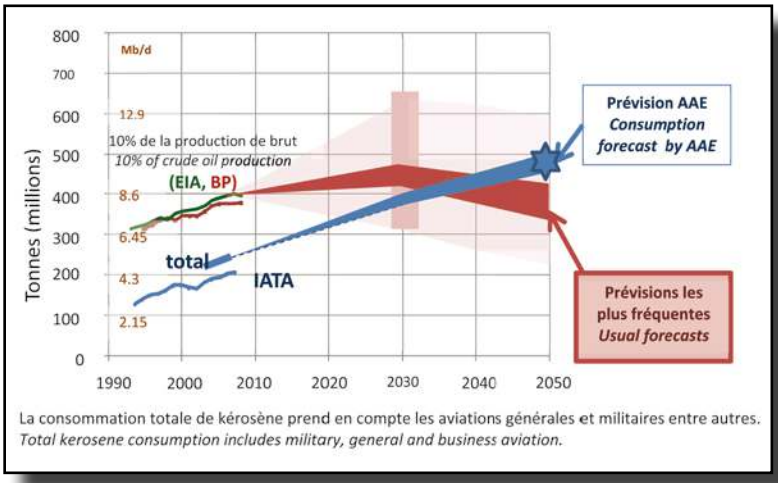

Figure 8 : Prévision de consommation de jet fuel

7 *Les présentateurs des différents exposés sont identifiés ainsi dans ce chapitre :*
[1] Xavier Montagne, Sources d’énergie pour le transport aérien, Introduction
[2] Gérard Théron, Sources d’énergie pour le transport aérien, vue de la CP
[3] Jim Hileman, Carburants de l’aviation en 2050, vue de la FAA
[4] Jean-François Garnier, Les biocarburants, Total Aviation Fuel Department

Un hydrocraquage profond d'autres coupes du pétrole permettrait d'arriver jusqu'à 15 %, sous réserve d'une production d'hydrogène gazeux adéquate et corrélativement d'une augmentation du prix. En outre, cette approche ne permet pas de répondre à l'objectif environnemental de réduction importante de l'émission de CO_2 du transport aérien. **"En définitive, l'option 10 % ne permet pas de satisfaire la demande en 2050, l'option 15 % le permettrait peut-être mais repousse les problèmes vers les technologies de raffinage et les demandes concurrentes".**

Une seconde possibilité est d'utiliser d'autres ressources fossiles comme le charbon et le gaz naturel. Le charbon a l'avantage d'être relativement abondant sur Terre (un peu moins en Europe) puisque le rapport réserve/production est voisin de 400 ans. La transformation de charbon en carburant synthétique est une technologie bien maîtrisée depuis les années 1930 (procédés Bergius et Fischer-Tropsch) ; la firme SASOL (Afrique du Sud) fabrique aujourd'hui un CTL (Coal To Liquid) certifié par les organismes internationaux. Malheureusement les émissions de CO_2 dans une analyse de cycle de vie (ACV) WTW (Well To Wake) sont en valeur relative, à peu près 2,5 fois supérieures à celle du jet fuel conventionnel, ce qui ne remplit pas l'objectif environnemental. Une façon de ramener les émissions de CO_2 du CTL au niveau de celui du jet fuel conventionnel [1], repose sur la capture-séquestration du carbone (CCS) produit par la transformation ; néanmoins cette technologie n'est pas encore mature et nécessitera des investissements importants. Pour information, la production de 100 Mt par an de CTL, nécessiterait l'utilisation de 8 % de la production actuelle de charbon.

Le gaz naturel serait plus intéressant comme source fossile puisqu'il est déjà un mélange d'hydrocarbures, avec une forte proportion de méthane. Sa transformation en carburant synthétique SPK (Synthetic Paraffinic Kerosene) est un procédé bien maîtrisé (Shell, Qatar, ENI-IFP) et d'un rendement beaucoup plus intéressant que le charbon : approximativement 5 tonnes de charbon sont nécessaires pour obtenir 1 tonne de CTL, seulement 2 tonnes de gaz naturel pour 1 tonne de GTL (Gas To Liquid). L'ACV WTW indique que sans CCS, les émissions de CO_2 sont 15 % supérieures à celles du jet fuel conventionnel et, avec CCS au niveau du jet fuel conventionnel. Le GTL pourrait être un excellent carburant de transition pour prendre le relais du jet fuel conventionnel mais il n'amène aucun progrès environnemental et se heurtera probablement à une forte concurrence d'usage, en particulier avec deux secteurs économiques : la production d'électricité et le chauffage domestique. La prospective pour le gaz naturel n'a pas été réalisée et ce manque sera à combler ultérieurement ; pour information, la production de 100 Mt par an de GTL, nécessiterait l'utilisation de 8 % de la production actuelle de gaz naturel.

On constate sans surprise que seul le recours aux biocarburants peut potentiellement répondre aux différents défis environnementaux auxquels l'aéronautique civile doit faire face d'ici à 2050 et au-delà, dans la mesure où les biocarburants, par nature renouvelables ("renewable"), peuvent aussi être durables ("sustainable") : ils pourraient en effet simultanément compenser la déplétion des ressources fossiles et autoriser un gain environnemental

9.3. LES BIOCARBURANTS

Les quatre présentations [1] à [4] ont fait état des développements entrepris sur les biocarburants, [4] étant entièrement consacré au sujet. Les biocarburants sont fréquemment annoncés comme la seule solution d'avenir mais comme le précise [4], il s'agit trop souvent de communication optimiste ou d'approche marketing. Il convient donc d'aborder la problématique des biocarburants avec un esprit critique, sans laisser dans l'ombre les questions encore ouvertes qu'elle pose.

Les biocarburants routiers de première génération sont des agro-carburants c'est-à-dire des biocarburants issus de cultures terrestres telles que colza et tournesol pour la France, soja et maïs ailleurs ; par exemple 40 % du maïs produit aux États-Unis est transformé en éthanol. L'analyse du cycle de vie de ces agro-carburants démontre un gain environnemental médiocre à négatif et ils induisent clairement une concurrence d'usage entre production de nourriture humaine ou animale et production de carburant renouvelable. La communauté aéronautique, instruite par l'expérience des biocarburants routiers de première génération, base son approche "drop-in" sur biocarburants de nouvelle génération, renouvelables par nature et durables.

Diverses possibilités de production ont été étudiées et ont fait l'objet de vols de démonstration réussis, notamment par Lufthansa pendant six mois ; il reste néanmoins à vérifier la compatibilité des biocarburants avec les moteurs et les avions pendant près de 100 000 heures dans des conditions de température et de pression extrêmes. La classification de ces possibilités peut être réalisée de différentes façons, en particulier en partant des procédés [4]. Les principaux procédés en développement sont les suivants :

- fabrication d'un gaz de synthèse à partir de la biomasse, transformation du gaz de synthèse en hydrocarbures par le procédé Fischer-Tropsch, raffinage des hydrocarbures pour parvenir à un bis jet fuel : c'est la voie FT-SPK ou HEFA-SPK, produisant un BTL (Biomass To Liquid) ou un WTL (Waste To Liquid) ;
- hydrogénation d'une huile : c'est la voie HEFA-SPK ou HRJ ("Hydrotreated Renewable Jet"). Une huile peut aussi être produite par pyrolyse de la biomasse ;
- fermentation de sucres et de biomasse : c'est la voie FRJ ("Fermentation Renewable Jet"). La fermentation produit de l'alcool ensuite transformé en hydrocarbures ATJ ("Alcohol To Jet").

Les problèmes encore ouverts pour passer à la production de masse sont nombreux. Ne sont donnés ici que les principaux :

- **Caractère durable et gain environnemental des biocarburants produits.** Des objectifs ambitieux ont été fixés tant en Europe (réduction de 60 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux carburants fossiles) qu'aux États-Unis (réduction de 50 à 60 % de l'émission de CO_2). La preuve du gain environnemental ne peut être obtenue qu'au travers d'analyses de cycle de vie détaillées. Certains résultats présentés sont très optimistes ; ainsi [4] indique un gain de 65 % pour le bio-SPK issu du jatropha curcas et un gain de 82 % pour le bio-SPK issu de la cameline, alors que [1] mentionne que pour atteindre 60 %, on ne peut utiliser que les herbes et les taillis

et que [3] met plutôt en exergue le palmier, la cameline, le switchgrass et les micro-algues. Derrière ces divergences se cachent deux explications : d'une part, les analyses de cycle de vie (ACV) n'intègrent pas toutes les mêmes postes d'émission, en particulier le changement direct et indirect des sols, d'autre part, la productivité, exprimée par exemple en litres/ha/an pour les huiles est fortement dépendante des intrants utilisés ; on peut augmenter la productivité par des engrais et l'irrigation mais ce sera en augmentant les émissions et détériorant le bilan ACV.

- **Disponibilité de la biomasse**. Cette disponibilité suppose pour les cultures terrestres celle de surfaces. Là aussi se pose le problème de la productivité des surfaces qui est très dépendant des conditions géographiques et climatiques, ainsi que du type d'agriculture mise en œuvre, intensive ou artisanale. Une étude a été menée sur le sujet distinguant les cultures de plantes terrestres dédiées (jatropha curcas, cameline, salicorne), les utilisations de biomasse brute et de déchets de biomasse et la culture de microalgues. La production de 100 Mt de bio jet fuel à l'horizon 2050 n'apparaît pas impossible si l'on raisonne sur les terres mondiales cultivables non cultivées, pourvu que le recours à une agriculture intensive soit adopté. Toutefois, deux arguments montrent que cette possibilité est loin d'être réaliste : la priorité ira très probablement dans les pays en voie de développement à la production de nourriture et la biomasse sera l'objet de concurrences. Le concept de bio-raffinerie est de plus basé sur la valorisation optimale de la biomasse et il est à craindre que la production de carburants, routiers et aéronautiques, ne constitue pas une priorité. C'est pourquoi la notion d'un mix énergétique semble devoir s'imposer : on devra utiliser simultanément et en complément différentes ressources.
- **Prix des "Synthetic Paraffinic Kerosene" (SPK).** Une synthèse a aussi été effectuée. Le prix du pétrole sera un facteur déterminant pour la viabilité des biocarburants. [3] annonce 110 à 120 $ par baril en 2030. Les biocarburants sont encore plus chers que le jet fuel conventionnel, surtout ceux issus des micro algues. Leurs coûts dépendront beaucoup de la demande globale de la biomasse disponible et de la concurrence entre les divers utilisateurs potentiels. Les investissements à réaliser pour les installations de production de masse susceptibles de faire face à une demande de biocarburants de l'ordre de 100 Mt par an se chiffrent en centaines de milliards de dollars. Une approche de [4] pour limiter les investissements nécessaires serait de rechercher des synergies avec les installations pétrolières existantes, pour le raffinage, la logistique et le marketing.

9.4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Pour accompagner le développement de l'aviation commerciale d'ici à 2050, il faudra soit augmenter la part de jet fuel extraite du pétrole, soit fabriquer des carburants alternatifs à partir d'autres ressources fossiles, en séquestrant le CO_2 produit lors de leur transformation, soit recourir à la biomasse, mais là aussi les exigences environnementales devront être satisfaites. Les carburants ainsi produits devront répondre au concept "drop-in".

Le prix des carburants alternatifs ne deviendra compétitif vis-à-vis de celui du jet fuel conventionnel que si les voies de production sont optimisées, les coûts des énergies

primaires (charbon, gaz et biomasse) maîtrisés et si des investissements considérables sont faits en temps utile. Il a été estimé que le prix d'équilibre du jet fuel (fossile ou durable) résultant devrait être compris entre 200 et 250 $ le baril (indiqué en introduction). Cette dernière valeur, majorante, a été retenue par les autres thèmes et le "Volume du Marché" en particulier. Il est jugé qu'un prix inférieur à ce niveau conduirait à une augmentation de la demande avec risque d'apparition de crises.

Une concurrence sévère entre utilisateurs se dessine, tant pour les ressources primaires que pour les produits, ce qui pourrait amener une guerre des prix et/ou des arbitrages des États.

L'analyse et la prise des décisions nécessaires à la sécurisation du transport aérien ne pourront se faire qu'à travers un organisme comprenant toutes les parties concernées, producteurs d'énergie, acteurs du transport aérien et administrations, de façon à aboutir aux arbitrages nécessaires entre les diverses destinations des énergies disponibles, en fonction des impacts globaux, en particulier celui de l'aviation sur l'économie et sur la société. Les représentants du transport aérien devront veiller à ce que l'importance de son rôle socio-économique soit mesurée à sa juste valeur.

Il sera noté par le lecteur qu'en matière d'énergie l'exploitation récente et en expansion des gaz de schistes peut avoir une incidence sur la disponibilité du pétrole pour sa transfomation en kérosène aéronautique. Cet effet devra faire l'objet d'une évaluation ultérieure compte tenu de restrictions possibles à venir sur cette exploitation (stabilisation à quel niveau ?).

10. STRUCTURES D'EXPLOITATION ET PRIX DU BILLET

10.1. RAPPEL DES HYPOTHÈSES

La demande, exprimée en nombre de passagers-kilomètres, sera triplée entre 2010 et 2050, tandis que le nombre des vols des avions commerciaux sera doublé (multiplié par 1,2 en Europe, par 1,6 en Amérique du Nord et par 2,9 dans le reste du monde), avec un emport moyen qui passera de 96 personnes par avion en 2010 à 128 en 2050 et un trajet moyen un peu plus long.

Le nombre d'avions va donc doubler entre 2010 et 2050. La taille maximale des avions restera limitée à 80m de long x 80m de large à l'horizon 2050.

La part des avions à décollage vertical ou court restera marginale. Les aéroports comporteront des pistes aussi longues en 2050 qu'actuellement et resteront implantés hors des agglomérations[8].

Les déplacements pour motif personnel (tourisme, famille), déjà majoritaires, augmenteront plus vite que les déplacements professionnels[9].

Nous prenons comme hypothèse qu'en 2050, les passagers du transport aérien continueront à payer tous les services fournis et l'essentiel des infrastructures utilisées.

10.2. PRIX DE VENTE DU BILLET D'AVION

Le prix de vente du "billet moyen" d'une compagnie aérienne est défini comme le résultat de la division du chiffre d'affaires (CA) "transport aérien de passagers" par le nombre de passagers transportés.

Ce prix de vente était en moyenne mondiale pour un trajet de 178 US$ en 2010 (CA "passagers" de toutes les compagnies du monde hors suppléments 463 G$ divisé par 2,6 milliards de passagers), soit **9,7 c$ par km** avec un trajet moyen de 1 833 km selon les sources OACI (rapports annuels du conseil 2011 et années précédentes)[10].

---

8 AAE Dossier 33: "Les Aéroports face à leurs défis", novembre 2010

9 Oxford Economics, Amadeus, "Gold rush 2020, Profitability trend in the travel sector", octobre 2010

10 Sites internet des compagnies aériennes, aéroports, OACI, IATA, AEA, ACI, ADPI, etc.

Le tableau ci-dessous établi d'après les comptes d'une quinzaine de grandes compagnies traditionnelles donne la composition du prix du "billet moyen" vendu en 2010 et son évolution en 2050 avec les hypothèses suivantes :

- gain de **productivité de 1% par an** entre 2010 et 2050, soit un coefficient arrondi à 0,7 appliqué à tous les postes, sauf à celui des aéroports, dont les gains de productivité seront compensés par la croissance des charges de sûreté, et à celui du carburant ;
- **prix du carburant fixé à 250 US$ TTC** le baril en 2050 (3,125 fois le prix moyen de 80 US$ en 2010), charges environnementales incluses : compte tenu de l'accroissement de l'efficacité énergétique (estimé à +35%), le poste carburant serait donc multiplié par 3,125 x 0,65 = 2,03 entre 2010 et 2050. Ce coût est choisi parce qu'à ce prix-là, on saura fabriquer du kérosène à partir de diverses sources autres que le pétrole fossile.

Les postes "entretien", "prestations en escales" et "frais commerciaux et généraux" ne comprennent pas les frais du personnel des exploitants qui sont regroupés dans la rubrique "personnel".

Cette évaluation montre qu'avec ces hypothèses, le prix du "billet moyen" en monnaie constante pourrait n'augmenter que d'un peu plus de 6 % entre 2010 et 2050, pour la même distance.

Composition du **prix de vente du billet** (d'après les comptes de diverses compagnies aériennes)	**2010 fourchette (%)**	**Billet moyen 2010 vendu** 100 unités (u)	**Billet 2050** (même distance qu'en 2010)
Avion + entretien	14 à 20%	17 u	11,2% 11,9 u
Carburant	22 à 28%	**25 u**	**47,8% 50,75 u**
Personnel	**12 à 32%**	22 u	14,5% 15,4 u
Redevance navigation aérienne	3 % à 4%	3.5 u	2,3% 2,45 u
Prestations en escale et armement (catering)	6 à 12%	9 u	5,9% 6,3 u
Aéroports (domanial, environnement et sûreté)	8 à 11%	9.5 u	9,0% 9,5 u
Frais commerciaux + généraux+ Marge	10 à 18%	14 u	9,3% 9,8 u
Total	100%	**100 u**	**106,1 u**

Tableau 5 : Composition du prix de vente du billet

La fourchette des dépenses de personnel est particulièrement large compte tenu des salaires et surtout des charges sociales et des temps de travail très différents selon les compagnies et les pays.

- L'hypothèse de gain de productivité de 1 % par an pendant 40 ans est la continuité des pratiques du secteur dans son ensemble depuis 40 ans. Cela peut sembler optimiste du fait des dépenses supplémentaires à prévoir pour l'environnement et la sûreté. Un gain de 0,75 % au lieu de 1 % par an donnerait une augmentation du prix du billet d'environ 10 %, au lieu de 6,1 %.
- Il en est de même (augmentation du prix du billet de 10 %) si le gain d'efficacité énergétique des avions n'atteignait que 30% au lieu de 35%, toutes choses égales par ailleurs.

On constate par ailleurs une **tendance d'alignement des prix des billets pour les court/moyen-courriers des compagnies traditionnelles avec ceux des low-cost** surtout si l'on ajoute au prix du billet moyen les recettes annexes liées au voyage ("ancillary revenues" : bagages enregistrés, prestations à bord, modifications de réservations, … voire parfois des subventions de certaines collectivités locales pour les attirer sur leurs aéroports). Ces recettes, encore marginales pour les compagnies traditionnelles, atteignent jusqu'à 25 % des recettes des transporteurs low-cost[11].

Conclusion : **même si le prix du carburant triplait avec un pétrole brut à 250 US$ le baril en 2050, le prix moyen du billet par km en monnaie constante augmenterait seulement de 10 % entre 2010 et 2050.**

Cette prévision rompt cependant avec la décroissance du prix de vente moyen du billet par kilomètre constatée jusqu'en 2000[12]. La ligne brisée entre 2010 et 2050 signifie que l'évolution comportera bien sûr des soubresauts essentiellement du fait des variations du prix du pétrole, l'évolution du prix hors carburant, droite verte, étant plus régulière.

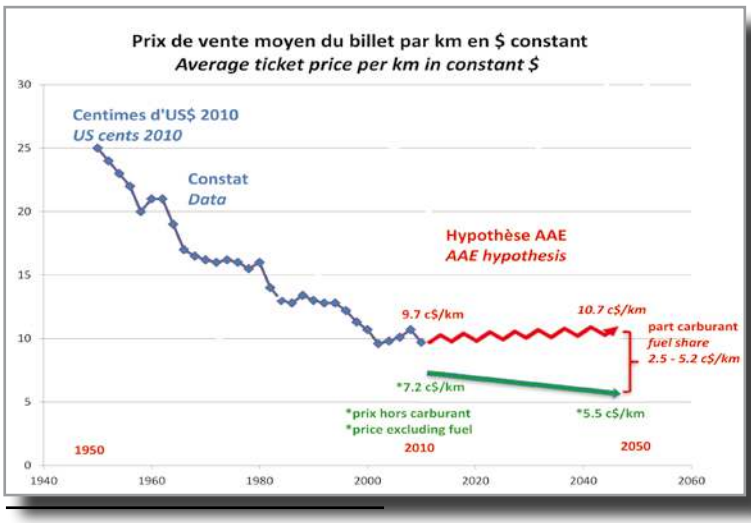

Figure 9 : Prix de vente moyen du billet

11 Oxford Economics, Amadeus, "Gold rush 2020, Profitability trend in the travel sector", octobre 2010.

12 Stanford University, "Evolution of average fare by air transportation", 2006.

10.3. LES DROITS AÉRIENS ET LE DÉVELOPPEMENT DU TRANSPORT AÉRIEN

Conformément à la convention de Chicago (1944), les droits de trafic appartiennent aux États qui désignent les exploitants des liaisons aériennes au départ de leurs territoires. Pour les vols domestiques, la désignation s'effectue en principe entre des opérateurs nationaux, c'est-à-dire exploitant des flottes immatriculées dans l'État avec des équipages disposant de licences nationales. Pour les vols internationaux, des accords bilatéraux entre États désignent, en principe à égalité d'offres, les transporteurs de chacun des deux États pour les exploiter.

La dérégulation américaine a supprimé à partir de 1978 la désignation pour les vols intérieurs des États-Unis tout en les réservant aux exploitants américains. Puis l'Europe a fait de même en 1986/92 pour les vols intérieurs à l'Union européenne et les exploitants européens. Enfin les États-Unis et l'Europe se sont entendus (accord "ciel ouvert" de 2007) pour appliquer la dérégulation aux vols transatlantiques entre États européens et États-Unis. L'Europe a aussi passé des accords globaux avec le Maroc en 2006, le Canada en 2009 et avec quelques autres pays. L'effet de ces dérégulations a été une augmentation de l'offre de transport et une baisse des tarifs assez nette, ainsi qu'une nouvelle répartition des compagnies avec une part croissante prise par les "low-cost" au détriment des compagnies traditionnelles.

Mais la majorité des vols intercontinentaux est encore régie par des accords bilatéraux entre États et l'évolution de cette réglementation appartient à chaque couple d'États. La tendance générale est à la dérégulation à l'intérieur des zones de libre échange. Depuis 10 ans, le nombre d'accords "de dérégulation" a triplé et concernait 32 % des liaisons aériennes correspondant à 57 % des vols en 2011 d'après l'OACI[13]. Les décisions de dérégulation "internationale" que des États pourraient encore prendre ensemble auraient des conséquences majeures sur l'avenir de leurs exploitants lorsque les différences de charges entre les pavillons sont importantes. Il y a donc lieu de **veiller à ce que ces éventuelles dérégulations ne se fassent pas n'importe comment** (cf.§10.6).

10.4. LES COMPAGNIES AÉRIENNES

Il y a **plus de mille compagnies aériennes** "régulières" dans le monde, dont les plus grandes (230) font partie de l'IATA, hors compagnies à bas coûts. Les compagnies traditionnelles se regroupent fréquemment en "alliances" pour rationaliser leurs offres et offrir aux passagers les choix d'un réseau mondial. Les **trois alliances "globales"** Oneworld, SkyTeam et Star Alliance regroupent les deux tiers du volume du transport aérien. On note par ailleurs le développement continu des compagnies "low-cost".

De grandes compagnies aériennes comme TWA, Sabena et bien d'autres ont disparu. En 2010 les plus grandes étaient Lufthansa Group (chiffre d'affaires de 34,5 milliards de US$, 34,5 G$) avec 744 avions, United + Continental AL regroupées en 2010 (34 G$, 700

13 Sites internet des compagnies aériennes, aéroports, OACI, IATA, AEA, ACI, ADPI, etc.

avions), Delta AL 31,8 G$, Air-France-KLM 30,3 G$, American 22,2 G$, IAG (British Airways+Iberia), Emirates 16 G$, Southwest 12,1 G$, premier low-cost, etc. Notons que les compagnies chinoises grimpent rapidement dans les classements mondiaux.

En termes de résultats, le classement est très différent, avec Emirates en tête (bénéfice de 1,6 G$ en 2010) et plusieurs "low-cost" bien placées. Depuis très longtemps, les compagnies aériennes affichent un **manque de rentabilité chronique** : le CEPS[14] note que le retour sur les capitaux investis n'a jamais dépassé 7 % malgré un marché en expansion. Depuis 10 ans, les compagnies ont connu de fortes pertes et peu d'années bénéficiaires et beaucoup d'inquiétudes pour leur avenir[15], ce qui n'empêche pas certains États ou autorités d'instituer, en Europe ou en Inde par exemple, diverses taxes spécifiques.

Les compagnies aériennes sont des **sociétés de services très sensibles à tous les événements du monde** avec **peu de "barrières d'entrée"** et de "clientèle captive" : l'acquisition d'un avion en leasing est relativement simple, il y a souvent des pilotes et autres professionnels disponibles, le nombre de routes aériennes a beaucoup augmenté et tous les voyageurs comparent les offres facilement sur internet. **La concurrence est donc particulièrement vive[16].**

Le système des accords bilatéraux de droits de trafic maintient l'équilibre de l'offre quantitative entre deux États, mais ne garantit évidemment pas l'équilibre des recettes. Ajouté à la règle de limitation des parts de "capitaux étrangers", aux exigences sur les licences des personnels et sur l'immatriculation des avions, il joue dans une certaine mesure un rôle de protection des exploitants non compétitifs, mais contribue aussi au maintien de faibles niveaux de rentabilité par la fragmentation du marché qu'il génère en rendant très difficile la fusion de deux compagnies "étrangères". Il faudra pourtant trouver un moyen (cf. §10.6) de rationaliser le marché et de permettre à un nombre raisonnable de compagnies (nettement plus faible qu'aujourd'hui) de fournir leurs services dans des conditions économiques acceptables.

Le court/moyen-courrier sera traité par tous les exploitants comme le font aujourd'hui les compagnies "low-cost", avec l'objectif d'une plus grande rapidité des rotations en escale et la diminution des frais généraux. Beaucoup de compagnies traditionnelles créent d'ailleurs des filiales low-cost et leur cèdent parfois toutes leurs liaisons "point à point", comme vient de le faire Lufthansa avec Germanwings fin 2012 en dehors de ses "hubs" de Frankfort et de Munich (pour l'instant ?).

Le **long-courrier** surveillera bien sûr aussi ses coûts et fera payer certaines options (modification des réservations par exemple) même si les initiatives "low-cost " long-cour-

---

14 CEPS Centre for Study and Strategic Prospective, Arthur D. Little, "Is air transport activity a profitable business model?", 8/02/2012

15 AAE conférence, Toulouse, mai 2012, "Comment volerons-nous en 2050", avec des présentations notamment de :
- *Gilles Bordes-Pages "Quelle vision les compagnies aériennes ont-elles de leur futur?"*
- *André Deistler "Les Aéroports en 2050",*
- *Marc Noyelle "Aéroports compagnies et coût du billet."*

16 Henri Gueusquin "la concurrence économique dans le transport aérien", 2005.

rier ne perdurent pas (comme Air-AsiaX qui vient de fermer sa liaison Paris Kuala-Lumpur ouverte il y a moins de 3 ans).

10.4.1. Les flottes commerciales

En 2010, il y avait environ 21 000 avions commerciaux (non compris 2 000 avions cargos) en exploitation régulière : 15 % long-courriers (LC), 50 % moyen-courriers et 35 % court-courriers.

La certification d'un avion autorise une durée de vie de plusieurs dizaines d'années, et les flottes des compagnies traditionnelles sont (et seront sans doute) composées d'avions d'âges très différents. Les compagnies "low-cost" ont généralement des flottes homogènes avec des appareils souvent jeunes, ce qui simplifie l'entretien et aide à optimiser l'utilisation de leurs avions.

Le temps de vol moyen annuel des avions était en 2010 de 2 500 heures pour les court- et moyen-courriers (plus pour les "low-cost"), et supérieur à 4 000 heures pour les long-courriers. Il sera plus élevé en 2050 pour les court et moyen-courriers avec une rotation plus rapide des avions, grâce à un traitement plus rapide au sol et des immobilisations moindres pour la maintenance.

Pour répondre à la demande, **le nombre d'avions commerciaux doublera d'ici à 2050 (42 000 hors avions-cargos).**

10.4.2. Les *"hubs"*

La recherche de productivité et de nouveaux trafics a conduit à l'organisation de **plates-formes de correspondances (*hubs*)** sur lesquelles sont cadencées en plusieurs vagues journalières, les arrivées de tous les court- et moyen-courriers du réseau avant les départs des long-courriers de la vague, pour mieux les remplir. Il y a environ 40 "hubs" principaux et une centaine de "hubs" secondaires[17]. Il convient de réduire au maximum les temps de correspondance entre les derniers court/moyen-courriers qui arrivent et les premiers long-courriers qui partent. Mais cette réduction drastique du MCT ("minimum connecting time") coûte cher à l'aéroport qui doit notamment s'équiper de moyens de transfert des bagages très performants, et à la compagnie qui garantit le voyage de bout en bout et doit faire face à tous les aléas.

Notons qu'à Dubaï (hub LC/LC), le temps de transfert est au contraire souvent supérieur à 3 heures, pour pousser les voyageurs en transit à acheter dans les commerces toujours ouverts, ou à utiliser les chambres des hôtels intégrés dans les immenses et magnifiques halls d'embarquement.

L'optimisation des réseaux des exploitants autour de hubs est une caractéristique pérenne car elle seule permet les gains de productivité et d'efficacité environnementale apportés par des gros porteurs. **La croissance des grands "hubs" sera donc sensiblement plus forte que la moyenne**[18]. Ils commencent d'ailleurs à attirer certaines "low-cost" qui peuvent aussi alimenter les long-courriers. Il est possible qu'un nombre très restreint

17 BCG, Boston Consulting Group, "Airports – Dawn of a new era", 2004.

(nettement moins de 10) de nouveaux grands “hubs” soient créés pour mieux optimiser les réseaux d’ici à 2050 (voir §10.5.1).

10.5. LES AÉROPORTS

10.5.1. Combien d’aéroports commerciaux en 2050 ?

Capacité aéroportuaire

La capacité d’un aéroport dépend de **quatre facteurs**[18] : deux “côté pistes” (pistes et emport des avions), et deux “côté ville” (capacité des terminaux et environnement) :

- La capacité théorique[19] d’une **piste** est actuellement voisine de 250 000 mouvements (mvt) annuels. La capacité réelle dépend des horaires d’ouverture, de la géographie locale, du climat (les séparations entre avions doivent augmenter par mauvais temps), du type de demande (pointes de trafic) et de la taille des avions (le vortex créé par un gros porteur nécessite une séparation plus grande avec l’avion suivant).

  Ainsi par exemple, Paris-CDG avec 4 pistes a aujourd’hui une capacité de programmation (fixation des horaires) de 120 mvt par heure qui permet par beau temps nettement plus de mouvements effectifs. Avec 500 000 mvt par an, CDG est loin d’être saturé, bien que la pression de la demande à certaines heures soit très forte. Londres/Heathrow traite 475 000 mvt par an sur 2 pistes seulement avec une météo plus rude et des avions plus gros en moyenne.
- **L’emport moyen** était seulement de 96 passagers par avion en 2010, plus bas aux États-Unis[20] que dans le reste du monde du fait du nombre considérable de vols régionaux d’emports limités[21] : 75 passagers par avion à Chicago/O’Hara, 115 à CDG, 150 à Heathrow et proche de 200 à Jakarta, Dubaï ou Tokyo/Haneda dont les pistes sont très souvent saturées.

  L’emport moyen augmente assez rapidement et pourrait être de **128 passagers par avion en 2050**.
- Coté “terre”, le nombre de passagers que l’aéroport peut accueillir dépend du nombre de terminaux (**aérogares**), de leurs surfaces, du nombre des portes équipées de passerelles et de la **suppression des goulets d’étranglement** qui évoluent selon la taille des avions et les réglementations de sûreté et de contrôle aux frontières. Cela **nécessite d’investir** pour s’adapter constamment aux besoins des passagers : système de tri et de tapis de livraison des bagages, aubettes de police, postes de douanes et de contrôle de sureté, **avec des effectifs suffisants disponibles au bon moment.**

---

18 Marc Noyelle « Les aéroports du futur », Aéroports de Paris 2007 and CEAS October 2011

19 Richard de Neufville and Amedeo Odoni, “Airports systems”, McGraw-Hill 2005.

20 R. John Hansman, MIT, ICAT International Center for Air Transportation, “Airline Industry Trend Update », 2012.

21 NASA, Purdue University, “Metropolex Operations », 2008.

L'organisation de tous les services coté terre et côté air (maintenance des avions, nettoyage, avitaillement, chargement) dimensionne aussi bien sûr la capacité de l'aéroport[22].

- La capacité dépend enfin de **l'environnement avec ses deux aspects : desserte terrestre efficace et maîtrise de l'urbanisation** (pour limiter l'impact du bruit). Le § 10.6 donne des recommandations sur ces sujets.

Nombre de plates-formes

Il y avait en 2010 dans le monde près de 4 000 "aéroports" ouverts au trafic commercial régulier et 10 fois plus de "terrains d'aviation" civils ou militaires, mais seulement un peu plus de **1 600 aéroports avec un trafic supérieur à 10 000 passagers/an**, dont 600 en Amérique du Nord, 400 en Europe, un peu plus de 200 en Asie/Pacifique, 200 en Amérique latine et 200 en Afrique/Moyen Orient.

En 2010, **500 aéroports avaient un trafic de plus de 1 million de passagers**, dont 175 en Europe, 120 en Amérique du nord, 95 en Asie/Pacifique, 65 en Amérique latine et 45 en Afrique/Moyen-Orient.

Près de 30 % du trafic mondial est concentré sur les 30 aéroports les plus importants. Le classement de ces aéroports évolue rapidement : Atlanta reste en tête avec moins de 100 millions de passagers (Mpax), Pékin-Capital est passé du 8e rang en 2008 au 2e rang en 2010 avec près de 20 millions de passagers supplémentaires en deux ans. Dubaï figure maintenant au 12e rang avec 50 Mpax alors qu'il en comptait quatre fois moins il y a 10 ans. Jakarta, Hong-Kong, Singapour, Guangzhou, Shanghaï, Kuala-Lumpur et Istanbul sont aussi en très forte croissance parmi ces grands aéroports.

En analysant chacun des **150 aéroports de plus de 10 Mpax dans le monde**, on constate que la plupart pourraient accueillir 2, 3, parfois 4 fois plus de vols d'ici 2050, ou être dédoublés (utilisation d'autres aéroports proches, nouveaux ou non).

Quelques régions poseront des problèmes particulièrement ardus comme Tokyo Haneda (mais Narita pourra peut-être être étendu). Hong Kong devra rapidement construire une troisième piste, Jakarta, et Bombay rechercher des sites pour un aéroport supplémentaire comme Istanbul vient de le trouver. Les cinq aéroports de Londres sont tous trop petits et une solution reste à trouver (dans l'estuaire de la Tamise par exemple) pour assurer une bonne desserte de Londres d'ici à 2050.

En pratique, **le nombre d'aéroports commerciaux augmentera dans certaines parties du monde** comme en Chine qui construit actuellement plusieurs dizaines de nouveaux aéroports (en complémentarité avec un programme exceptionnel de voies ferrées dont plus de 20 lignes TGV) !

En Europe et aux États-Unis, le nombre d'aéroports est, à quelques exceptions près, suffisant pour répondre à la demande prévue d'ici à 2050, mais **de gros investissements devront être réalisés dans beaucoup d'aéroports existants et autour de ceux-ci** (accès, extensions et parfois nouvelles pistes), ainsi que l'aménagement de

22 FAA, Fact 2, "Future Airport Capacity Task", 2007.

moyens de transports terrestres efficaces pour permettre à certains aéroports de fonctionner en réseau. Ailleurs dans le monde, il faudra construire près de 200 nouvelles plates-formes aéroportuaires[23] en plus de l'adaptation des aéroports existants pour répondre à la demande en 2050.

Le nombre d'aéroports commerciaux avec plus de un million de passagers par an devrait donc passer de 500 en 2010 à environ 700 en 2050.

10.5.2. Évolution des services fournis dans les aéroports

Un aéroport doit fournir les services attendus par ses 3 catégories de clients : les compagnies aériennes, les passagers et les nombreux locataires utilisateurs de ses espaces.

Les services aux passagers évoluent constamment. Rappelons que la qualité des services rendus est de plus en plus mesurée, "notée", et figure dans les contrats d'objectifs des exploitants d'aéroports[24].

La sûreté

La sûreté est devenue essentielle, mais elle induit une perte de temps, de confort, voire de dignité pour les passagers. Les dispositifs mis en place dans les aérogares - séparation des flux, PIF (postes d'inspection filtrage) performants, etc. - ont nécessité entre 2000 et 2010, un **besoin de surfaces supplémentaires de 15 % par passager**, ce qui est déjà considérable et va sans doute continuer.

La sûreté est une **activité "régalienne" coûteuse**. Son coût est cependant entièrement à la charge des passagers en Europe, ce qui n'est pas le cas dans certains États (États-Unis par exemple) ou pour les autres moyens de transport. Elle représente déjà plus du tiers des dépenses d'exploitation strictement aéroportuaires.

Il faut à la fois augmenter le travail de dissuasion en amont, rendre les actes de malveillance plus difficiles en aéroports et les contrôles extrêmement fiables et acceptables par les passagers.

De nouvelles technologies seront disponibles avec, par exemple des grands scanners pour effectuer les contrôles des passagers avec leurs bagages dans un couloir équipé de capteurs très fiables, sans que la personne contrôlée s'arrête (sauf interception justifiée bien sûr).

Le traitement des bagages

Le traitement des bagages comprend l'enregistrement, les contrôles de sureté, le tri et le chargement puis le déchargement et la livraison de plusieurs dizaines de milliers de bagages par jour dans les grands hubs dont les deux tiers sont en transit. Il génère un travail considérable et coûte très cher. Beaucoup d'aérogares existantes manquent cruellement de place pour améliorer la situation tout en respectant les nouvelles normes de sûreté.

---

23 Marc Noyelle «Les aéroports du futur », Aéroports de Paris 2007 et CEAS octobre 2011.

24 Dossier AAE 33: "Airports and their Challenges", November 2010

L'objectif est d'augmenter le débit du système ainsi que sa performance avec un temps de livraison de tous les bagages en moins de 20 minutes après l'arrivée de l'avion à son poste (*block*) pour les passagers à destination, et de transfert entre les soutes des avions en moins d'une heure pour les bagages en correspondance. Il faut aussi augmenter la fiabilité et diviser par trois le nombre de bagages mal routés, pour atteindre moins de 1 % d'erreur. L'IATA estime que les erreurs d'acheminement coûtent chaque année 3,3 G$ à ses seuls adhérents[25] et encourage les "BIP" ("Bagage Improvement Programs"). On pourrait par exemple intégrer dès leur fabrication, une puce RFID ("Radio Frequency Identification") dans toutes les valises et sacs de voyage destinés au voyage aérien.

Autre point : la nécessité d'installer davantage d'aides mécaniques à la manutention des bagages pour limiter sa pénibilité comme cela a déjà été testé à l'aéroport de Nice et en Suède, voire la complète automatisation comme dans le nouveau SBH ("South Bagage Hall" mis en service fin 2012) d'Amsterdam/Schiphol. Cela nécessitera encore de la place dans les bâtiments aéroportuaires.

Les autres services

L'information des voyageurs sera particulièrement soignée grâce à l'attention de tous les acteurs et par l'utilisation systématique des téléphones portables géo-localisés et autres terminaux portables. Pour l'enregistrement, les e-services des transporteurs se développent très vite. Pour les contrôles aux frontières, l'utilisation de la biométrie pour simplifier l'identification des personnes se généralisera probablement.

Beaucoup de services deviennent optionnels et donc payants. En plus des services traditionnels, comme le parking des voitures (avec plusieurs offres selon la durée, la possibilité de réserver sa place, etc.), les boutiques nombreuses et bien pourvues (les revenus liés à ces commerces peuvent représenter près du tiers de ceux de l'aéroport et bien plus en terme de bénéfices), les restaurants pour tous les goûts (sans oublier les spécialités locales), les salons, les accueils personnalisés de personnes ou de groupes, etc., bien d'autres services "premium" sont ou pourront être proposés[26] :

- abonnement "coupe-files" ("fast track" ou "fast travel") ;
- aide personnalisée aux personnes à mobilité réduite ;
- zone de détente et, en zones de transit, hôtellerie tarifée à l'heure comme cela existe déjà par exemple à Dubaï, Singapour ou Paris-CDG ;
- services internet, secrétariat ;
- zones de jeux ou de sports, spa, massages et soins divers, bibliothèques, etc. ;
- voituriers, conciergeries, etc.

Les **concessions commerciales génèrent une part de plus en plus grande** des revenus aéroportuaires. La pratique de la "double caisse" isole parfois ces revenus au bénéfice des seuls aéroports : une certaine répartition de ces bénéfices et une convergence des missions devront être assurées à l'avenir entre l'aéroport qui investit (mais

25 Sites internet des compagnies aériennes, aéroports, OACI, IATA, AEA, ACI, ADPI, etc.

26 Marc Noyelle "Les aéroports du futur", Aéroports de Paris 2007 et CEAS octobre 2011.

bénéficie d'un monopole territorial) et les compagnies aériennes qui "apportent" leurs clients.

Ville aéroportuaire ou "aerotropolis"[27]

Comme tous les grands carrefours de moyens de transport, l'aéroport génère une activité économique qui va bien au-delà de sa simple fonction de transfert de personnes ou de marchandises.

Il n'accueille pas seulement les compagnies aériennes, passagers et accompagnants, taxis, loueurs de voiture et autres moyens de transport, mais aussi beaucoup de sociétés de services pour les passagers et les avions comme pour le fret et la poste, et bien d'autres bureaux, hôtels, entreprises d'import-export, centres de congrès, commerces, etc., qui trouvent intérêt à cette localisation "aux frontières".

L'aéroport n'est plus considéré seulement comme un lieu de passage et de nuisances pour le voisinage au profit "d'étrangers", mais comme une cité, dynamique source de richesses et d'emplois, ce qui facilite son acceptation locale.

Ainsi, le site de Roissy/Charles de Gaulle génère environ 100 000 emplois sur place dans plus de 1 000 entreprises et deux fois plus d'emplois induits[28], alors que ce site était presque désert il y a 40 ans. **Ces "villes aéroportuaires", créatrices de richesses locales, continueront à se développer.**

Nouveaux concepts d'aéroports

Pour assurer l'interface entre les avions (le ciel) et les passagers (la terre), le concept d'aéroport a évolué depuis 100 ans[29] pour mieux répondre à la **demande de liaisons faciles et "sans couture" et de lieux agréables**[30]. Ces divers concepts peuvent se classer en trois catégories :

1. "Pas d'aéroport" : rêve onéreux et limité aux utilisateurs d'hélicoptères ou de petits avions hors du champ de cette étude.
2. "Décentralisé" avec deux variantes :
   - "terminal au centre ville" et transport en commun dédié et rapide vers l'aéroport proprement dit, avec des services (enregistrement des bagages, contrôles, etc.) dans ce "transport dédié". On peut aussi se libérer de ses bagages dans ce terminal au centre-ville, voire à son domicile. Mais ce concept séduisant se heurte à des **problèmes de sécurisation encore mal résolus** ;
   - "véhicules automatiques" PAS = Passenger Airport Shuttle, pour aller du point d'arrivée sur l'aéroport vers une des salles d'embarquement réparties sur l'aéroport, et réaliser les "formalités" pendant ce trajet. Ce concept nécessite cependant beaucoup d'espace et n'a pas encore prouvé sa faisabilité.

---

27 Kasanda John D., "Global Airport Cities" [Aerotropolis] 2010.

28 Sites internet des compagnies et des aéroports, OACI, IATA, AEA, ACI, ADPI, etc.

29 Hugh Pearman "Aéroports, a century of architecture", Seuil 2005.

30 EU, "Flight Path 2050" 2011 and EU "External Aviation Policy Package", octobre 2012.

3. "Compact" : l'idée de base est de réaliser dans un même bâtiment à plusieurs étages, avec des **distances de marche à pied aussi réduites que possible**, toutes les fonctions de l'aéroport, depuis les parkings et terminus des transports publics jusqu'à l'embarquement. Mais un terminal semble ingérable au-delà d'une certaine taille (40 millions de passagers par an ?), ce qui nécessite dans les très grands aéroports plusieurs terminaux bien reliés entre eux ("*people mover*") avec éventuellement des satellites. Une variante très intéressante a été réalisée à Dubaï, avec les bâtiments principaux enterrés : seules les immenses salles d'embarquement ("*concourses*") dépassent le niveau des pistes.

La multiplication des aéroports desservant une même région n'est souvent pas pratique car ils ne peuvent fonctionner de façon optimale que s'ils sont très bien reliés entre eux, ce qui est rarement possible.

10.6. RECOMMANDATIONS

Le dossier "Les aéroports face à leurs défis" publié fin 2010 par l'AAE donne 10 recommandations que la CP reprend à son compte en insistant sur quatre d'entre elles reformulées comme suit :

1. Veiller à ce que les plans d'urbanisme permettent le développement des aéroports qui devront eux-mêmes tout faire pour être harmonieusement intégrés au tissu local. La valeur ajoutée par les emplois créés autour de l'aéroport (Aérotropolis) ainsi que les taxes locales qu'ils génèrent devraient y contribuer.

2. Veiller à ce que les accès terrestres (voies ferrées, routes, parkings, taxis et autres transports publics) soient bien dimensionnés, pratiques et d'un coût raisonnable. En particulier, une liaison rapide et confortable en transport en commun (fer si possible) vers le centre ville ainsi que de bonnes liaisons avec les réseaux des trains à grande vitesse sont indispensables pour les grands aéroports.

3. Revoir tout le processus "bagage" : place dans les avions, systèmes de traitement plus efficaces, etc. Mettre en place un système international de repérage des bagages, fiable, économique et interopérable (RFID par exemple comme le recommande l'IATA). Ces puces RFID pourraient d'ailleurs être incluses dans tous les bagages "aéronautiques" dès leur fabrication.

4. Les aérogares devront être construites suffisamment vastes (surface disponible par passager) et adaptables pour répondre aux exigences grandissantes de la sûreté, pour permettre d'offrir les nouveaux services attendus et pour améliorer sensiblement la qualité de service perçue par chaque passager et chaque utilisateur à chaque instant.

La CP ajoute 4 autres recommandations pour permettre la compétitivité et la juste concurrence du transport aérien :

5. Ne pas envisager des contraintes environnementales qui ne soient mondiales : pas de charges supplémentaires “régionales” comme cela avait été envisagé en Europe pour les échanges de permis d’émission de CO_2…

6. Généraliser à l’échelon mondial (ou au minimum, européen) l’équivalent du “chapitre 11” américain pour les compagnies aériennes en raison de leur sensibilité particulière à la conjoncture tant mondiale que locale.

7. S’assurer que les charges sociales, la législation (sur le temps de travail notamment) ainsi que les taxes et autres redevances appliquées sur les liaisons à déréguler et sur leurs réseaux d’alimentation permettent une concurrence équitable avant d’envisager toutes nouvelles dérégulations internationales.

8. Permettre une prudente, mais saine, consolidation du secteur en révisant la législation en vigueur qui limite la fusion entre compagnies de nationalités différentes du fait des exigences des États en matière de nationalité des immatriculations et des licences professionnelles pour l’exploitation de leurs droits de trafic, ainsi que des clauses restrictives sur la proportion de parts détenues par des propriétaires étrangers.

11. ENVIRONNEMENT

11.1. LE CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

Les questions environnementales (bruit, émissions locales et qualité de l'air, émissions de gaz à effet de serre et changement climatique), sont imbriquées avec les problématiques scientifique, énergétique, géopolitique, économique et sociale, avec des interactions multiples à travers d'innombrables facteurs et acteurs, et sont très évolutives. D'où **de fortes incertitudes** à l'horizon 2050. Les enjeux sous-jacents croissent rapidement, et des efforts correspondants sont indispensables pour les affronter, réduire les incertitudes, prendre les mesures et apporter des solutions efficaces.

Dans les domaines technique et opérationnel, les efforts doivent être renforcés et équilibrés : entre disciplines, entre recherches amont et aval.

Des expertises doivent être développées pour mieux appréhender les aspects **transverses et interdisciplinaires** propres au domaine environnemental.

La mise en œuvre de solutions, y compris pour aider à résorber ou faire tolérer dans certaines limites, la croissance des émissions de CO_2 du transport aérien, doit être réglementée et affinée en visant une **optimisation globale**, respectant **l'équité** et préservant la **viabilité** du secteur.

Une **approche globale** devrait faciliter la prise en compte des problématiques couplées, en évaluant besoins, atouts et interactions.

Enfin, la **communication** sur les questions environnementales liées au transport aérien doit être développée tout en restant objective et professionnelle, afin d'en protéger la robustesse, la cohérence et la crédibilité.

11.2. LE BRUIT

Le bruit est protégé par un cadre réglementaire solide et éprouvé au niveau national et international (norme OACI[31]), qui a stimulé les progrès techniques, lesquels ont fortement atténué les nuisances sonores (75 % de réduction du bruit perçu, bruit cumulé, contours

31 OACI - Convention relative à l'aviation civile internationale - Annexe 16 - Volume I - Bruit des aéronefs. OACI - Manuel technique environnemental (Doc 9501 - vol. I)

et surfaces d'exposition réduits). La sévérité de la norme est accrue et les procédures de certification affinées périodiquement.

La tendance générale devrait se poursuivre grâce au renouvellement de la flotte par des avions toujours plus performants acoustiquement, malgré la croissance du trafic. Ainsi, **l'énergie sonore totale pourrait diminuer de 15 à 20 %** entre 2010 et 2050 selon les prévisions de trafic et sur la base des hypothèses d'améliorations technologiques de la CP. Le découplage entre bruit et trafic paraît ainsi accessible même sur les catégories d'avions équipés d'hélices contra-rotatives plus bruyantes (voir figure 10 suivante). Une réduction analogue est prévisible pour les aéronefs à voilure tournante.

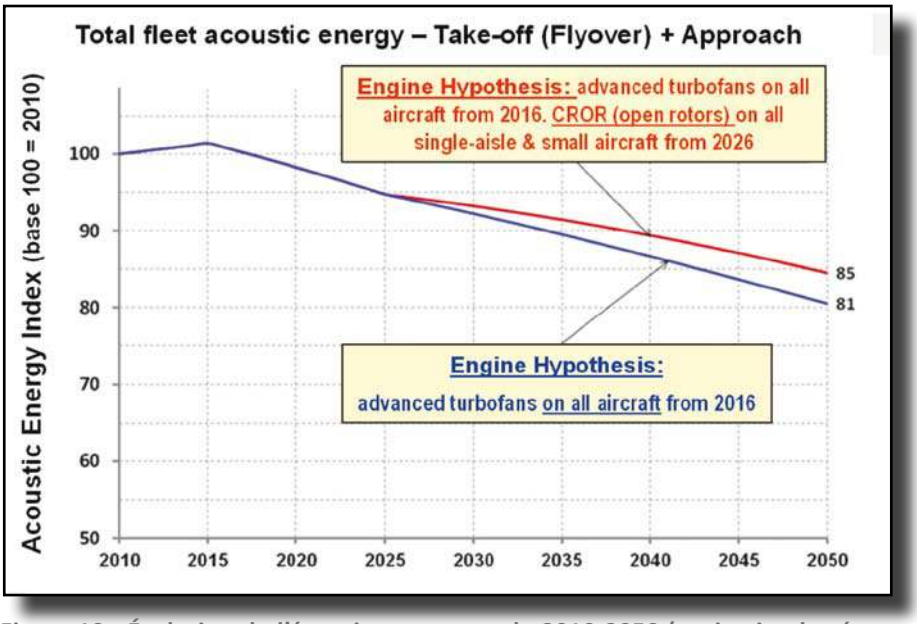

Figure 10 : Évolution de l'énergie sonore totale 2010-2050 (projection basée sur estimations CP)

Ces résultats laissent entrevoir une marge côté bruit dans les compromis entre bruit et CO_2 (voir ci-dessous). Toutefois, ces résultats ne prenant pas en compte les situations locales doivent être impérativement mis en perspective. En effet, sur certaines plates-formes potentiellement critiques à fort trafic, le bruit restera un enjeu majeur, et devra être surveillé, en **prenant en compte dans les analyses et dans le cadre réglementaire, tous les éléments contributifs de la gêne acoustique, notamment** :

- **les caractéristiques du spectre acoustique pouvant affecter la perception du bruit au voisinage de l'aéroport, et éventuellement en route ;**
- **le risque de nuisance sonore provoquée par un événement isolé[32]** ;
- **les effets aggravants induits par des événements concentrés/répétés.**

32 La limite de la zone de construction autorisée - avec isolation – devra être ajustée de telle sorte que l'avion récurrent le plus bruyant du trafic ne dépasse pas le niveau d'intensité sonore acceptable.

La zone Asie se présente différemment par rapport à l'Europe et aux États-Unis, compte tenu de l'augmentation plus forte de son trafic, accompagnée toutefois de l'augmentation du nombre d'aéroports pour lesquels il est encore temps de prévoir des mesures préventives.

Le principe OACI de **l'approche équilibrée**[33] doit être appliqué partout, pour résoudre efficacement les problèmes de bruit autour des aéroports, tant sur le plan environnemental qu'au niveau des coûts, en considérant les quatre piliers principaux : réduction du bruit à la source, aménagement des sols, procédures de moindre bruit et restrictions opérationnelles.

La réduction du bruit à la source, pilier fondamental de cette approche, suppose la poursuite des efforts de recherche et développement technologiques intensifs, avec des ressources adaptées[34].

Il est essentiel pour profiter des bénéfices de la technologie et des mesures opérationnelles, de désigner et renforcer chaque fois que nécessaire, une autorité responsable du contrôle de l'urbanisation et de l'application de l'ensemble des règlementations[35], empêchant toute implantation d'habitation intempestive.

11.3. ÉMISSIONS LOCALES ET QUALITÉ DE L'AIR

11.3.1. NOx

La situation globale des oxydes d'azote (NOx) se rapproche de celle du bruit, dans la mesure où les émissions totales sont relativement stables entre 2010 et 2050 selon nos estimations d'augmentation du trafic, des réductions unitaires de consommation de carburant et d'émissions de NOx grâce aux améliorations technologiques dédiées. Ceci justifie une norme dont la sévérité et les procédures de certification moteur sont périodiquement mises à jour (OACI[36]).

Comme pour le bruit, il faut veiller aux situations locales concernant les émissions de NOx à basse altitude, notamment là où les limites réglementaires de qualité de l'air sont parfois atteintes, sous l'effet de diverses causes, car bien que l'aviation contribue peu par rapport à la desserte aéroportuaire terrestre, le problème peut devenir contraignant pour développer un aéroport (cas de Londres Heathrow). Il faut veiller aussi à ce que recherche et développement apportent les gains attendus.

---

33 ICAO - Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management (Doc 9829 AN/451- 2nd Edition - 2008).

34 Si la croissance de la flotte mondiale devait dépasser significativement les prévisions de la CP, la contrainte de limitation de bruit pourrait stimuler une refonte de la flotte (avions plus gros, limitation des fréquences, application plus radicale de technologies ou procédures anti-bruit).

35 Les mesures appropriées d'aide à l'isolation phonique, voire à la climatisation, pourraient être sous le contrôle de cette autorité.

36 OACI - Convention relative à l'aviation civile internationale - Annexe 16 – Volume II – Émissions des moteurs d'aviation. OACI - Manuel technique environnemental (Doc 9501 - vol. II)

Les réductions de NOx émis à basse altitude par des procédures opérationnelles ne peuvent être que minimes, les procédures couramment utilisées minimisant déjà les puissances moteur utilisées, donc les émissions de NOx[37].

11.3.2. Particules

Les particules émises par les avions/moteurs sont l'objet d'une **préoccupation croissante**, du fait de leur impact sur la qualité de l'air et la santé humaine

En aéronautique, les connaissances scientifiques et les moyens de mesure, quantification et évaluation d'impact des particules sont encore limités ; **la recherche**, active, **devrait être intensifiée**, pouvant aboutir à une norme OACI dans les prochaines années. La compréhension du rôle des particules dans les formations nuageuses en altitude, encore très mal appréhendé, est tributaire des progrès de la science.

Les quantités de particules émises et leurs effets bénéficieront des réductions de consommation de carburant et des progrès dans la compréhension des phénomènes en jeu. Cependant, la combinaison de leur impact et des quantités croissantes émises, feront des particules une **question majeure du futur**.

11.4. EFFET DE SERRE ET RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

11.4.1. Émissions globales de CO_2

La consommation de carburant des avions et les émissions de CO_2 ont bénéficié de réductions spectaculaires dans le passé (plus de 70 %), fruit d'efforts permanents d'amélioration des performances des moteurs et des avions, en réponse aux besoins de mobilité associés aux effets d'un marché exigeant et concurrentiel.

L'industrie aéronautique et l'OACI affichent depuis quelques années des objectifs très ambitieux[38]: 1,5 % par an d'augmentation d'efficacité en consommation de carburant jusqu'en 2020 (2 % pour l'OACI), croissance neutre en carbone à partir de 2020, et émissions totales de CO_2 divisées par 2 en 2050 par rapport à 2005 (industrie seulement). Ces objectifs se fondent sur un fort soutien gouvernemental, des progrès technologiques, une optimisation des opérations, de la circulation aérienne et des infrastructures, la commercialisation de nouveaux carburants renouvelables, enfin des instruments économiques.

La CP a évalué les différents facteurs jouant sur la consommation de carburant et les émissions de CO_2 entre 2010 et 2050, et a estimé les gains cumulés suivants, en consommation par passager/km : 25 % liés à la technologie et aux nouveaux avions introduits, 31 % avec les améliorations de gestion du trafic et des opérations, 37 % avec l'augmen-

37 La corrélation entre les émissions de NOx à basse altitude et en montée et croisière fait que les effets bénéfiques de la réglementation et des gains à basse altitude se répercutent aussi sur les émissions totales de NOx.

38 Air Transport Action Group (ATAG) - www.atag.org.

tation du facteur de remplissage. À cela, s'ajoutent des effets de réduction de CO_2 : 40 % (cumulés) avec les biocarburants, 47 % avec diverses formes de compensation carbone.

Le trafic augmentant à un rythme supérieur à celui des améliorations (facteur 3,1), la consommation totale de carburant double, et les émissions totales de CO_2 sont multipliées par 1,6 (cf. figure 11).

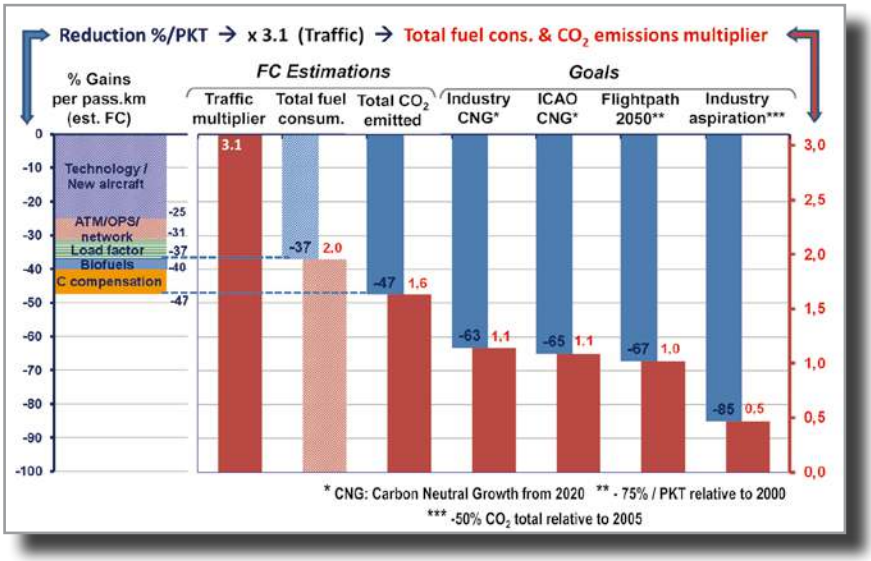

Figure 11 : Consommation Carburant & Émissions CO_2 2050 / 2010 (comparaison: projections CP / objectifs industrie / OACI / UE)

Ces résultats, comme le montre la figure 11, sont bien en-deçà des objectifs de l'industrie et de l'OACI, notamment de "croissance neutre en carbone" à partir de 2020 (incluant l'effet biocarburants), les 47 % (CP) étant à comparer à 63 %/65 % (industrie/OACI), et le facteur multiplicatif sur les émissions totales 1,6 (CP) à 1,1 (industrie/OACI). L'objectif de réduction de 50 % des émissions totales de CO_2 de l'aviation à l'horizon 2050 par rapport à 2005 suppose une réduction plus draconienne : -85 % par passager/km, compte tenu de l'augmentation du trafic. L'objectif européen de "Flightpath 2050" (-75 % de CO_2 par passager/km par rapport à 2000[39]) est proche des objectifs industrie/OACI de croissance neutre en carbone[40].

Ainsi, malgré une hypothèse de croissance de trafic nettement plus basse que celle prévue par l'industrie, il paraît **peu vraisemblable que les progrès techniques puissent combler l'écart par rapport aux objectifs affichés**. Cependant, ils restent un facteur crucial de réduction des émissions de CO_2 du secteur, qui nécessitera des efforts de

39 European Commission Europe's Vision for Aviation - Report of the High Level Group on Aviation Research.

40 -75 % par rapport à 2000 équivaut à -67 % par rapport à 2010.

recherche intensifs, notamment pour développer de nouveaux biocarburants et des technologies innovantes.

La compensation carbone[41] peut contribuer à se rapprocher des objectifs. Pour éviter des effets pénalisants sur le transport aérien, **il importe cependant que les mesures de "compensation", telles que le système d'échanges de quotas d'émissions, soient gérées au niveau mondial, en assurant : égalité d'accès, équité, absence de discrimination et de distorsion de concurrence, maîtrise des coûts et viabilité du secteur, en tenant compte du rôle socio-économique du transport aérien**[42]. Les autorités étudient d'autres formes de compensation. Dans tous les cas, il faudra combiner tous les moyens possibles, et l'OACI devrait jouer un rôle majeur.

11.4.2. Effet des traînées de condensation – Actions possibles pour l'aviation ?

L'effet direct des traînées de condensation est faible. Le seul effet indirect significatif pourrait être une contribution à la formation de cirrus, phénomène encore mal appréhendé aujourd'hui. La faisabilité et l'efficacité de mesures opérationnelles sont à confirmer, en termes d'effet de serre global.

11.5. INTERDÉPENDANCES ET EXIGENCES ENVIRONNEMENTALES

Les interdépendances environnementales et les compromis entre bruit, émissions locales et globales sont inhérents à la nature transverse du sujet et intrinsèques à toutes les phases de la conception, du choix des objectifs généraux à celui des configurations et technologies, d'intégration des systèmes propulsifs, optimisation et utilisation des moteurs. Ils apparaissent aussi au niveau réglementaire. Les compromis environnementaux sont multiples, liés à divers phénomènes physiques et facteurs en jeu, comme la température interne des moteurs, leur taux de dilution, la consommation spécifique, la traînée aérodynamique, la surface acoustiquement traitable des nacelles, avec des effets de sens variable sur le bruit, les émissions d'oxyde d'azote, la consommation de carburant et les émissions de gaz carbonique.

Ces compromis concernent chaque nouvel avion, auquel correspondent des critères adaptés aux objectifs qui lui sont fixés, en liaison étroite avec les paramètres écono-

---

41 Elle consiste à soustraire des émissions de CO_2 imputables au transport aérien, la part de quotas d'émissions achetés hors du secteur dans le cadre de systèmes d'échanges et plafonnement des quotas d'émissions.

42 C'est l'enjeu d'un différend entre l'Union européenne et quasiment le reste du monde, concernant l'entrée de l'aviation dans le système européen d'échange de quotas d'émissions de CO_2 (Directive européenne 2003/87/CE du 13/10/2003 établissant un système de quotas d'émissions de gaz à effets de serre dans la Communauté et modifiant la directive 96/61/CE du Conseil - Directive européenne 2008/101/CE du Parlement européen et du Conseil du 19/11/2008 modifiant la directive 2003/87/CE afin d'intégrer les activités aériennes dans le système communautaire d'échanges de quotas d'émissions de gaz à effet de serre). Ceci a conduit la Commission européenne à suspendre pendant un an la mise en œuvre de la directive européenne incriminée, pour les vols extra-européens (novembre 2012).

miques. Interdépendances et compromis sont difficiles à analyser compte tenu de la complexité, des incertitudes, du caractère évolutif des phénomènes considérés, des effets de nature très différente : temporels et spatiaux. Les compromis sont d'autant plus difficiles à réaliser qu'il n'existe pas de critère ou d'échelle de comparaison uniques, universels. Néanmoins, il est essentiel de connaître les coefficients d'échange en jeu.

Le niveau de raffinement technique et le rendement des composants augmentent avec le temps et se rapprochent des limites physiques ultimes. Chaque évolution apporte, au-delà des gains primaires recherchés, des effets secondaires indésirables. Les arbitrages deviennent ainsi de plus en plus difficiles, par exemple entre consommation spécifique des moteurs (donc CO_2) et émissions de NOx des moteurs, entre bruit et consommation carburant (donc CO_2) sur avion. Des choix de types et de configuration des moteurs doivent être faits, encore plus cruciaux dans le futur (comme entre "open rotor" et turbofan) en pesant les impacts sur la consommation de carburant (CO_2), le bruit et les autres paramètres-clés.

11.6. ÉMERGENCES DANS LE CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL

Si des produits innovants émergent des études de nouveaux concepts d'aéronefs, ils pourraient apporter des bénéfices environnementaux supplémentaires. De même avec la découverte éventuelle de nouveaux biocarburants performants de nième génération, même si la probabilité de progrès décisifs reste modeste.

Des émergences pourraient concerner les opérations et la circulation aérienne, avec une généralisation des "pratiques sobres" en consommation de carburant et d'énergie au niveau des compagnies aériennes et des aéroports (ex : le "roulage électrique", déjà à l'étude). Les gains potentiels d'émission de CO_2 sont toutefois limités par la faible part que représentent les opérations au sol et à basse altitude.

Des gains supplémentaires pourraient résulter d'une modélisation affinée des interdépendances environnementales, d'un couplage optimisé des normes ou d'une compensation carbone élargie.

On ne peut exclure un relâchement de contraintes environnementales, sous impératifs énergétique et économique, l'octroi de permis spéciaux ou dérogations vis-à-vis d'objectifs de réduction de CO_2 reconnus inatteignables par l'aviation, lié à la volonté de protéger le rôle socio-économique majeur et les services irremplaçables du transport aérien (valorisés par une communication idoine, s'appuyant sur la faible contribution passée et présente du secteur).

Des émergences de sens opposé sont aussi possibles, par exemple à travers une norme de CO_2 et/ou des mesures/pénalités plus sévères, ou si un effet aggravant important des traînées de condensation/nuages induits était mis en évidence. Des objectifs de recherche très ambitieux pourraient aussi influencer le cadre réglementaire[43].

43 Certaines émergences peuvent basculer dans un sens ou dans l'autre, selon les circonstances, les facteurs et les enjeux politico-économiques.

12. LES SERVICES DE LA NAVIGATION AÉRIENNE

Selon le règlement du Ciel unique européen n° 549/2004 du Parlement européen et du Conseil, les “services de navigation aérienne” [sont] :

- les services de la circulation aérienne, les services de communication, de navigation et de surveillance, les services météorologiques destinés à la navigation aérienne et les services d’information aéronautique.

Les “services de la circulation aérienne” [sont] :

- les services d’information de vol, les services d’alerte, les services consultatifs de la circulation aérienne et les services du contrôle de la circulation aérienne (contrôle régional, contrôle d’approche et contrôle d’aérodrome) ; ils se conforment aux normes édictées par l’Organisation de l’aviation civile internationale.

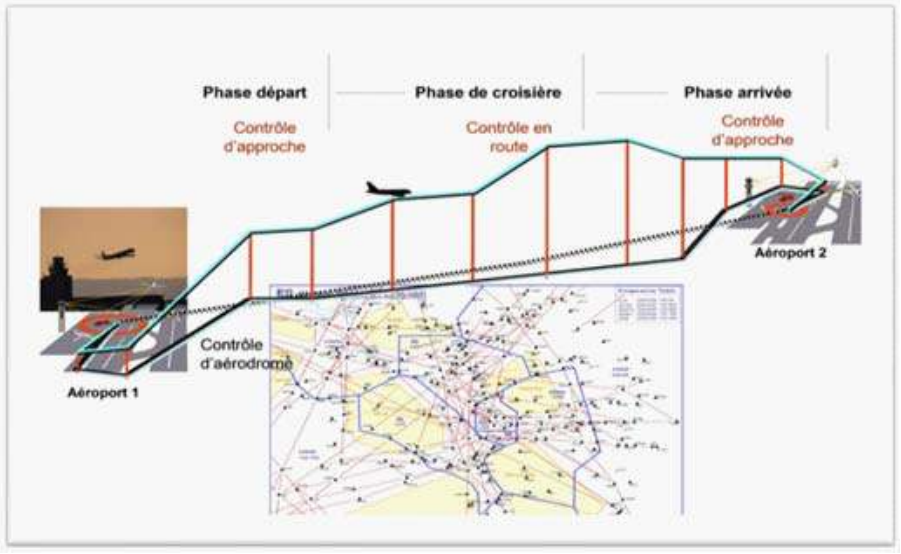

Figure 12: Zones de contrôles en fonction des phases du vol

12.1. LA RAISON D'ÊTRE DES SERVICES DE LA NAVIGATION AÉRIENNE EST LA SÉCURITÉ

Les services de navigation aérienne concourent à la sécurité. La part des accidents aériens qui leur est attribuable, due surtout à des collisions au et avec le sol, n'est que de quelques pourcents.

La sécurité est fondée sur le principe de *défenses en couches* et d'une très faible probabilité de défaillance commune. Cette démarche sécurité basée sur l'expérience rend souvent difficile la prise en compte de nouvelles procédures et technologies. Elle n'a pas été remise en cause par quelques accidents très graves, comme les collisions de Tenerife, Überlingen et Milan.

Une approche de la sécurité plus systématique, comme celle employée pour d'autres systèmes complexes, pourrait conduire à fondamentalement changer l'organisation actuelle du contrôle du trafic aérien, mais elle reste au stade d'idées initiales. Elle suppose des travaux de recherche et un vrai travail de modélisation comportant notamment une analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité. À l'horizon 2050, le principe actuel perdurera probablement.

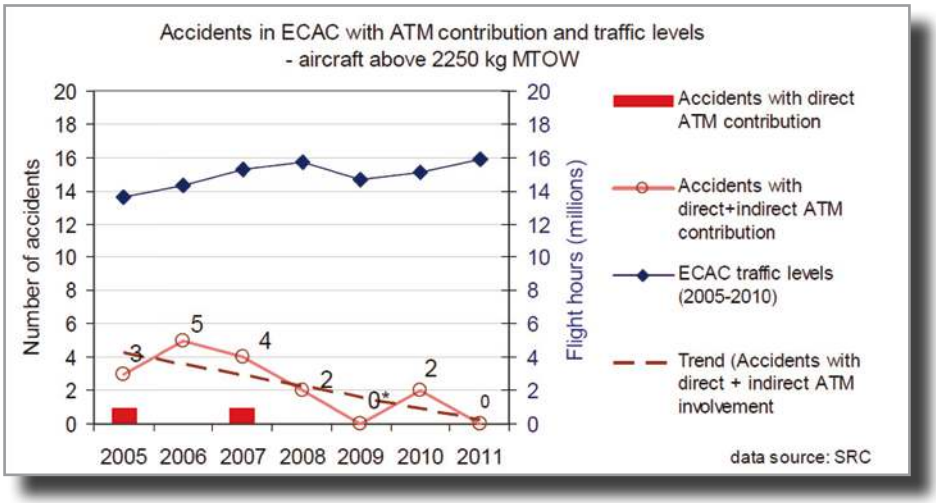

Figure 13 : Accidents CEAC avec contribution du contrôle aérien et niveaux de trafic

12.2. AVIATION COMMERCIALE : ENTRE COÛTS DIRECTS ET PERFORMANCES DU SYSTÈME

Le maintien des séparations entre aéronefs pour en assurer la sécurité a un impact négatif sur la capacité, l'économie des vols et l'environnement du fait de trajectoires non optimales.

De plus, même si le coût direct des services de la navigation aérienne ne représente qu'une petite part du coût d'exploitation des compagnies aériennes (de l'ordre de 5 à 7%), celles-ci n'acceptent de payer de nouvelles infrastructures au sol et de modifier les équipements de bord que si elles sont assurées d'un bénéfice tangible à court terme.

L'évolution du système de contrôle de la circulation aérienne devrait donc faire l'objet d'un arbitrage entre le coût de cette évolution et l'amélioration de performances attendue, mais les études coûts-avantages sont difficiles à réaliser et souvent peu crédibles, du fait, notamment, de la difficulté d'évaluer les coûts indirects du manque de performances et l'impact socio-économique. De ce fait, les choix sont fortement influencés par les aspects politiques et médiatiques.

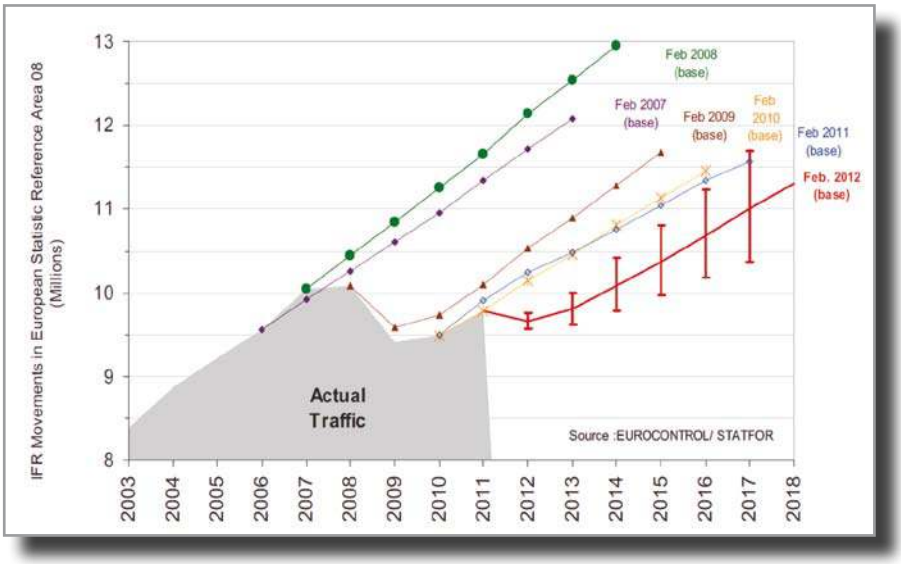

Figure 14 : Prévisions du nombre de mouvements en IFR dans la zone européenne 08

Aux États-Unis et en Europe, depuis 50 ans, la croissance du trafic aérien a été continue avec des ralentissements temporaires dus à des crises politiques ou économiques. Les ralentissements et reprises ont, au cours du temps, déplacé l'équilibre de l'arbitrage entre coût direct, pour fournir la capacité, et coût indirect des inefficacités. Dans ces régions la croissance du trafic ayant maintenant durablement ralenti, la priorité qui était donnée aux problèmes de capacité du système s'est en conséquence portée sur une réduction de la consommation de kérosène et de l'impact environnemental ainsi que sur la réduction des coûts des services de la navigation aérienne.

Le problème de capacité continuera toutefois à exister sur les grandes plates-formes aéroportuaires en Europe et aux États-Unis (et sûrement très prochainement en Chine), et nécessitera, pour pallier ce manque de capacité, de mettre en place les solutions innovantes décrites au §12.7. Les arbitrages dans ces cas sont souvent plus aisés, le nombre d'acteurs impliqués étant plus réduit et les coûts/avantages plus facilement estimables.

Dans le reste du monde le trafic devrait continuer à croître fortement encore longtemps. C'est donc le manque de capacité qui sera pénalisant. Ce problème ne nécessitera toutefois pas d'évolution technologique notable, cette croissance n'étant qu'un rattrapage par rapport aux États-Unis et à l'Europe. Il est donc nécessaire d'y augmenter la capacité, en tant que de besoin en utilisant les techniques disponibles les plus efficaces.

12.3. L'ASPECT INSTITUTIONNEL EST DÉTERMINANT DANS L'ÉVOLUTION DU SYSTÈME AU PLAN MONDIAL ET RÉGIONAL

L'analyse s'est focalisée sur les États-Unis et l'Europe mais elle pourrait sur certains aspects s'appliquer à d'autres parties du monde.

La comparaison États-Unis-Europe en 2010 est instructive : avec 35 000 personnes, les États-Unis contrôlent un trafic 70 % supérieur à celui de l'Europe qui mobilise 57 000 personnes et le coût total par vol y est deux fois inférieur.

Les principales raisons de cette différence sont :

- l'unicité de l'organisme de contrôle du trafic aérien aux États-Unis, alors qu'il y en a un grand nombre en Europe ;
- la séparation entre les budgets de la FAA (*Federal Aviation Administration*), et les recettes – ces recettes provenant pour 70 % des taxes sur les billets des passagers ou le kérosène et pour 30 % du budget fédéral – le tout soumis au contrôle du Congrès, alors qu'en Europe le financement est basé sur des redevances dont les taux sont fixés pour couvrir les dépenses ;
- aux États-Unis, l'organisme de gestion des flux a l'autorité sur la capacité des centres, ce qui n'est pas le cas pour le gestionnaire de réseau aérien européen.

C'est pour cette raison que la Commission européenne a mis en place, dans les années 2000, les deux paquets législatifs du Ciel unique européen. Force est de constater qu'au bout de 10 ans ces deux paquets législatifs n'ont pas permis d'atteindre les objectifs d'amélioration des performances et de diminution des coûts. La principale raison en est la résistance des États à la défragmentation souhaitée dans ces règlements qui impliquerait la perte de souveraineté (la défense nationale ayant été mise en avant), ainsi que celle des revenus générés par les redevances.

12.4. LA RÉDUCTION DES COÛTS

En Europe, les dépenses financées par les redevances se décomposent en 30 % pour les contrôleurs opérationnels, 20 % pour les amortissements et frais financiers, 35 % pour les autres personnels et le fonctionnement et 15 % pour la logistique et le support.

Bien que certains gains de productivité puissent être obtenus grâce à des évolutions techniques, l'objectif de ramener le coût européen au niveau du coût américain ne peut être atteint que par une rationalisation des services de contrôle de la circulation aérienne en Europe.

12.5. LA CAPACITÉ

En Europe, la capacité en route sera sensiblement augmentée en donnant au gestionnaire de réseau aérien une véritable autorité sur la définition de la structure de l'espace aérien et du réseau de routes et sur la mobilisation des ressources disponibles.

Cette seule évolution permettra d'assurer une capacité suffisante, sauf autour et sur quelques grands aéroports où il restera des limitations.

Figure 15 :

Central Flow Mangement Unit (Eurocontrol)

12.6. LA GESTION DES PRIORITÉS FACE À DES RESSOURCES RARES

La gestion des limitations de capacité, en particulier de manière temporaire lors de crises, posera la question de la mise en place de mécanismes de priorités et de régulation, différents du principe premier arrivé - premier servi (principe dont l'interprétation est déjà variable).

Il est donc nécessaire de mener des recherches tant sur l'aspect théorique que sur la mise en œuvre opérationnelle :

1. sur les aspects socio-économiques ;
2. sur l'aspect gestion de l'espace et des flux de trafic ;
3. sur la météorologie aéronautique ;
4. sur les changements de mode de fonctionnement en fonction des circonstances (trafic, météorologie, crise, panne et plan de secours/urgence) et la flexibilité du système.

12.7. LES TECHNIQUES SONT SUFFISANTES MAIS DES AMÉLIORATIONS SONT POSSIBLES

12.7.1. L'automatisation

Bien que certains imaginent la possibilité d'une automatisation complète des vols, sans préciser ce que cela recouvre, par exemple avec des opérateurs au sol mais sans contrôleur au sol et sans pilote à bord, il semble hautement probable, au moins pour des raisons

sociologiques et psychologiques, qu'il y ait toujours un pilote à bord pour le transport de passagers. Cela n'empêche pas une évolution continue des rôles des opérateurs et des calculateurs au sol et à bord.

Le transport de fret avec des avions pilotables depuis le sol paraît possible techniquement comme le montre l'utilisation actuelle des drones par les militaires. **L'acceptabilité sociétale dépendra de la démonstration de sécurité en particulier vis-à-vis des populations survolées et de la résolution des problèmes de responsabilité et d'assurance**.

12.7.2. Les systèmes de communication de navigation, de surveillance et de traitement de l'information

Pour les systèmes de communication, navigation et surveillance, depuis les années 80 la question se pose de l'utilisation de systèmes satellitaires en plus ou à la place de systèmes terrestres. Là où existe une infrastructure au sol de localisation (balises radioélectriques) et de surveillance (radars) la justification d'une nouvelle infrastructure utilisant en particulier des moyens spatiaux et de l'équipement correspondant des avions est difficile. En revanche, dans le reste du monde, si l'infrastructure au sol n'existe pas encore ou n'est pas possible (zones océaniques, désertiques ou polaires, pays émergents), une infrastructure à base satellitaire présente beaucoup d'avantages.

Les fréquences radio sont une ressource limitée et de plus en plus convoitée. Elles ont donc un prix, et elles pourraient limiter le développement des drones et de nouveaux services. Leur gestion doit faire l'objet d'une attention particulière.

Pour les **moyens de traitement de l'information**, plutôt que de continuer à acheter/développer des systèmes complets pour chaque centre de contrôle, on sera amené à les remplacer progressivement par un ensemble de serveurs de données centralisés et sécurisés, en ne laissant dans les centres de contrôle que les postes de travail.

Des recherches auront été nécessaires pour la protection de ces systèmes CNS et traitement de l'information contre les actions volontaires (cyber sécurité) et involontaires ainsi que sur les besoins et les moyens de protection des fréquences aéronautiques.

12.7.3. Les procédures opérationnelles

En matière **d'organisation de l'espace aérien**, dans les zones denses et durant les périodes chargées, il n'y aura pas de routes libres (free routes), mais au contraire des "autoroutes" hautement capacitives, non conflictuelle par construction (autoroutes séparées autant que possible minimisant les points de croisement à altitude identique) et sur lesquelles le trafic sera ordonnancé par le contrôle du trafic aérien (avec notamment la possibilité d'imposer les vitesses), et où les séparations entre avions seront assurées par les pilotes aidés par les systèmes embarqués.

La **gestion de trajectoire** complète (de bloc de départ à bloc d'arrivée), dont l'information est partagée entre tous les acteurs, sera le mode utilisé pour toutes les opérations aériennes.

Le **maintien des séparations** et l'évitement des collisions entre avions, entre avions et obstacles naturels ou artificiels, ainsi que des risques liés aux phénomènes météorologiques et aux turbulences de sillage sera assuré de façon complémentaire par le sol ou le bord, en fonction de l'endroit et de l'instant, de la densité de trafic et des services disponibles au sol.

Pour les **aéroports**, la séquence à l'arrivée sera anticipée depuis une origine temporelle, pouvant aller jusqu'au départ du bloc, et les heures d'arrivée au point d'entrée de la zone terminale requises seront définies à cinq minutes près.

Les trajectoires d'arrivée seront des descentes continues, définies avec précision en trois dimensions ; elles seront permises par des modèles météorologiques fins et des moyens de navigation horizontale et verticale qui amènent l'appareil jusqu'à la piste en prenant en compte les contraintes locales, en particulier les nuisances aux riverains.

Les aéronefs seront mis en séquence sur ces trajectoires. L'avion suivra sa trajectoire jusqu'à la piste et se séparera de l'avion précédent, le pilote utilisant ses équipements embarqués sans intervention du contrôleur. Cette séparation tiendra compte de façon dynamique de la turbulence de sillage affectant la paire d'avions (selon les types, les masses, et les configurations adoptées) et dont l'évolution sera mieux connue grâce à des modèles météorologiques à maille fine.

La précision de navigation et de surveillance ainsi qu'une meilleure connaissance des turbulences de sillage permettra de construire des pistes parallèles indépendantes plus rapprochées.

Les procédures opérationnelles prendront en compte les nouveaux véhicules, des opérations aériennes différentes (vol en formation, ravitaillement en vol, vols spatiaux), ou les nouveaux besoins (évitement de traînées de condensation).

Des travaux de recherche sont nécessaires sur :

- la séparation embarquée dans les espaces sans service de séparation (à cause du coût élevé pour un trafic faible) et comme moyen de réduire la charge des services au sol ;
- les systèmes d'anticollision basés sur une approche de sécurité systémique.

12.8. D'UNE INDUSTRIE DE DÉVELOPPEMENT DE SYSTÈMES À LA FOURNITURE DE SERVICES

Les organismes de contrôle du trafic aérien auront un champ d'activité limité aux services opérationnels (ils ne seront plus fournisseurs des services de communications, navigation, surveillance, information aéronautique et météo et systèmes d'information sur les vols) et leur activité sera répartie sur un nombre adapté, flexible mais réduit de centres en route, grandes approches et tours.

Le succès des projets en cours, en Europe et aux États-Unis, devrait permettre aux industriels de ces pays d'être plus compétitifs sur le marché des autres régions. Les coûts de R&D seront amortis par les premiers déploiements.

Certains industriels pourront à la fois développer les systèmes, les exploiter et fournir les services associés aux services du contrôle de la circulation aérienne, mais aussi à d'autres clients comme les aéroports et les compagnies aériennes.

Les industriels européens doivent se positionner pour être en mesure de proposer ces services.

De **nouveaux services**, utilisant les informations disponibles, pourraient être proposés aux professionnels de l'aéronautique pour gérer leur flotte, optimiser leurs opérations, gérer les crises et mieux traiter leurs clients (passagers).

12.9. POUR LES AUTRES AVIATIONS, LES CHOIX SONT POLITIQUES

Ces aviations comprennent l'aviation d'État (essentiellement militaire), l'aviation d'affaires, l'aviation générale et les nouveaux types d'aéronefs comme les drones. Il y aura toujours une grande disparité dans le monde en matière d'importance, de budgets et de rôle économique de ces aviations.

Les États-Unis, durablement leaders dans ces créneaux, bénéficient d'un soutien financier important et sont donc à l'origine de la plupart des évolutions techniques; comme pour les drones, ils influenceront le reste du monde. Au départ, seul le Département de la Défense américain a pu financer le développement, le déploiement et surtout la maintenance d'un moyen de localisation, le GPS. Il est seul aussi à pouvoir soutenir un système de communications numériques par satellites, comme Iridium. D'autres acteurs voient le jour, les satellites étant considérés comme des instruments de souveraineté.

L'aviation militaire posera toujours un problème particulier : l'équipement des avions nouveaux et surtout la mise à niveau des appareils anciens, s'ils peuvent paraître minimes au regard du prix des avions eux-mêmes, influent sur des budgets nationaux en diminution. De plus, pour raison d'État, les vols des avions gouvernementaux en mission seront toujours assurés en priorité, même si les avions ne sont pas correctement équipés. En outre, les équipements des avions militaires seront toujours plus onéreux à produire que les équipements des avions civils compte tenu des exigences supplémentaires liées aux missions militaires. En revanche, une partie de ces avions n'utilisent pas certaines plates-formes aéroportuaires, ce qui peut atténuer ce problème d'équipements.

Pour la **sécurité de l'aviation générale**, il faudra développer des équipements embarqués adaptés moins chers. Ceux-ci leur permettront aussi d'accéder plus facilement à certains espaces et aérodromes. La diffusion depuis le sol de la situation de trafic, des informations météorologiques et aéronautiques vers ces avions, facilitera leur circulation avec une sécurité accrue.

L'aviation d'affaires, bien équipée, effectuera des atterrissages par faible visibilité sur la plupart des aéroports grâce à des moyens satellitaires et des moyens de vision renforcée ; les avions d'affaires pourront utiliser des trajectoires optimisées pour leurs besoins, voire exercer eux-mêmes leur séparation dans des espaces à faible trafic ou à service au sol inexistant.

L'émergence des **drones** de transport passe d'abord par la résolution du problème de leur intégration dans l'espace aérien. Une première étape sera réalisée dès 2015 aux États-Unis et en 2016 en Europe. Il y aura 3 étapes : l'accommodation dans des espaces réservés, l'intégration dans un espace partagé et, beaucoup plus tard, la gestion de drones autonomes. La fonction *détecter et éviter*, extension du système anti-collision actuel sera développée pour un déploiement espéré à l'horizon 2025.

Les **hélicoptères** et aéronefs à voilures tournantes profiteront des développements de l'aviation générale et de l'aviation d'affaires pour des procédures spécifiques autour des aéroports et des aires d'accueil.

12.10. RECOMMANDATIONS POUR L'EUROPE

1. Afin de réduire les coûts il faut :
   - étudier un nouveau système de redevances et de financement des services de la navigation aérienne assurant une véritable régulation économique ;
   - mettre en place une véritable autorité en matière de capacité, de définition du réseau de routes et de mobilisation des ressources (contrôleurs) disponibles, la capacité globale étant suffisante ;
2. Afin de rationaliser la fourniture des services de la navigation aérienne, il faut :
   - regrouper les opérateurs de services opérationnels sur des zones géographiques permettant une optimisation réelle de la gestion de la circulation aérienne ;
   - séparer les prestataires de services opérationnels et les fournisseurs des services techniques ;
   - spécifier et développer un serveur virtuel d'information pour tous les organismes opérationnels ;
3. Afin d'assurer la survie des industriels européens impliqués dans le développement de ces systèmes et des services, il faut les aider à contribuer aux programmes de R&D et à la définition de normes internationales pour la sécurité et l'interopérabilité ;
4. et donc il faut promouvoir un programme de recherche dans ces domaines.

13. CONTRIBUTION DE L'ESPACE AU TRANSPORT AÉRIEN

En ce début du 21e siècle les apports du spatial à l'aéronautique deviennent incontournables dans le domaine de la navigation, du recueil de données météorologiques et des télécommunications. Bien avant 2050 d'autres services utilisant des systèmes spatiaux pourront également être mis à profit par l'aéronautique, pour améliorer ou développer des fonctions telles que : "Surveillance", "Alerte et localisation", "Assistance aux équipages" et "mise à jour des modèles numériques de terrain".

Les développements en cours dans le domaine de la navigation par satellites illustrent le rôle-clé des institutions dans la démarche d'identification des opportunités de nouveaux services à l'échelle mondiale, dans la négociation d'accords internationaux, et dans l'engagement de partenariats pour la mise en œuvre opérationnelle et l'utilisation des grands systèmes supportant ces services.

L'Europe doit mettre en œuvre ses capacités d'innovation et son potentiel technologique pour rester l'un des leaders dans le développement des infrastructures et des services aéronautiques à base de satellites au cours des prochaines décennies, et garder ainsi une place dans les développements économiques induits.

Afin d'identifier et de valider rapidement les nouvelles opportunités, l'Europe doit renforcer le dialogue "aéronautique-espace" et poursuivre les analyses de faisabilité de nouveaux

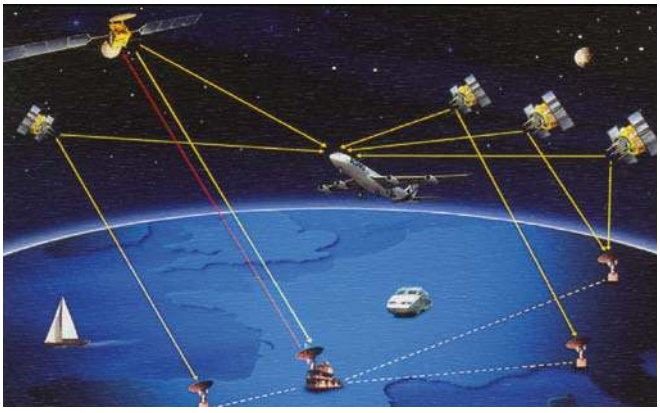

Figure 16 : Contribution de l'espace à la navigation. *© ESA*

services jusqu'à des démonstrations dans des conditions réalistes au moyen de bancs d'essais avec des éléments au sol et en orbite.

Après une brève analyse de la situation sur les apports actuels et potentiels du spatial pour chaque type de service à l'aéronautique, des recommandations sont formulées sur les actions qu'il est souhaitable de mener en Europe.

13.1. TÉLÉCOMMUNICATIONS

Les communications aéronautiques aux passagers, principalement pour l'accès à Internet, mais aussi pour la téléphonie mobile, bien qu'encore limitées à un nombre restreint d'avions et de zones géographiques, se développent rapidement depuis quelques années. Les systèmes mis en place utilisent pour la plupart des relais de communications par satellites. Les accords juridiques et commerciaux se développent avec les différents pays du monde. L'un des freins au développement des offres de services pour les "activités à bord" vient de la difficulté pour les compagnies aériennes d'anticiper les futures attentes fortement évolutives des passagers dès la construction des avions ainsi que de définir les modes de tarification et donc le niveau d'utilisation.

Les communications pour les besoins propres des compagnies aériennes tireront avantage de l'implantation d'équipements pour les communications des passagers, dès qu'un pourcentage important des avions sera équipé de terminaux de télécommunications.

Les communications par satellites pour les besoins critiques de l'aéronautique font l'objet de quelques applications au-dessus de zones océaniques, mais le niveau global d'utilisation reste encore faible aujourd'hui. Il semble que les offres commerciales de services de communications par satellites basées sur les systèmes actuels ne soient pas encore considérées comme pleinement satisfaisantes pour répondre aux fortes contraintes de fiabilité, d'intégrité et de disponibilité exigées par ce type de besoins, et qu'elles souffrent d'un manque de garantie de pérennité et d'une perception de coût d'utilisation élevé en comparaison des bénéfices attendus.

En Europe, les études en cours, notamment dans le cadre du programme SESAR, visent à définir quels moyens spatiaux pourraient être mis en place à l'horizon 2020 ou quelles adaptations seraient nécessaires pour utiliser des services commerciaux de communications mobiles par satellites à ce même horizon. Dans le même temps, certaines stratégies commerciales globales s'appuyant sur des soutiens institutionnels non européens se développent.

Pour garantir l'accès aux services et jouer un rôle de premier plan dans les infrastructures, les services et les équipements de communications aéronautiques de demain, **l'Europe doit : établir une vision à long-terme au-delà de 2020**, **renforcer les analyses de sécurité, d'intégrité et de disponibilité des communications**, **ainsi que des coûts d'implantation et d'exploitation de différents types de systèmes (existants ou prévisibles) et prendre ensuite rapidement les décisions relatives aux initiatives institutionnelles et/ou aux accords internationaux et commerciaux à mettre en œuvre.**

Par ailleurs une attention particulière doit être portée à la préservation des bandes de fréquences déjà allouées à l'aéronautique au niveau mondial, en fonction des besoins futurs.

13.2. NAVIGATION

L'utilisation de la navigation par satellites continue de se développer dans l'aéronautique grâce à la disponibilité des signaux de navigation du système GPS et à la mise en service de systèmes d'augmentations régionales et locales. En Europe, l'utilisation du service d'augmentation régionale EGNOS par l'aviation civile est rendue possible depuis mars 2011. Le développement du système de navigation par satellites "Galileo" se poursuit pour une mise en œuvre opérationnelle initiale partielle à partir de 2015.

Cependant la reconnaissance du système de navigation européen comme future référence mondiale au côté du GPS pour les applications civiles et en particulier pour l'aéronautique, est loin d'être acquise, par suite de l'existence à l'horizon 2020 de 4 systèmes à couverture mondiale (GPS, Glonass, Galileo, Beidou). Galileo a la particularité d'être le seul système sous contrôle civil ce qui est à la fois un avantage potentiel pour obtenir la confiance des utilisateurs civils et un inconvénient possible lorsque se posera la question du financement du renouvellement du segment spatial.

L'Europe doit donc : **préparer activement une mise en œuvre effective le plus tôt possible de Galileo y compris au niveau du segment utilisateur de l'aéronautique, anticiper les évolutions possibles ultérieures de ce système, et les compléments locaux visant à renforcer la résistance, notamment vis-à-vis du brouillage, du leurrage, et de la précision et enfin engager une réflexion sur ce que pourrait être une nouvelle étape dans la coopération internationale.**

13.3. SURVEILLANCE

La "surveillance dépendante coopérative" des avions au-dessus des zones océaniques désertiques ou hostiles est basée sur l'ADS-C utilisant des liaisons satellites. La fréquence des reports périodiques, faible aujourd'hui probablement pour des raisons de coût, devrait augmenter avec le développement des offres de liaisons numériques sol-avions par satellites, et avec une meilleure compréhension des avantages potentiels.

Les possibilités offertes par la connaissance précise du temps GPS/Galileo à bord des avions pour la transmission de messages courts vers des satellites en orbites basses, doivent aussi être explorées.

Une "surveillance indépendante coopérative" est utile en complément de la surveillance dépendante pour améliorer la rapidité d'alerte et d'assistance dès l'apparition d'une situation critique à bord d'un avion équipé ou non de l'ADS-C[44]. Un système utilisant les principes (avec des fréquences spécifiques) mis en œuvre pour le service de recherche et de sauvetage "Sarsat-Cospas" tel que prévu sur Galileo pourrait permettre de localiser les avions y compris en cours du vol.

---

44 ADS-C Automatic Dependent Surveillance - Contract

Une "surveillance indépendante non coopérative" sous la responsabilité de la police ou des forces de défense et de sécurité est nécessaire sur l'ensemble de "l'espace aéronautique contrôlé" afin de détecter des aéronefs non coopératifs. Elle est effectuée au moyen de radars primaires au sol au-dessus des terres émergées L'extension d'une telle surveillance à certaines zones océaniques pourra se révéler nécessaire dans le futur par suite notamment de la multiplication d'aéronefs non pilotés. L'utilisation de techniques radars mono ou multi-statiques utilisant au moins une composante spatiale peut être envisagée.

L'Europe devrait : **évaluer, sur la base de différents concepts-systèmes utilisant les ressources du "spatial", la faisabilité et les coûts de missions et de services pour les différents types de surveillance des avions.**

13.4. RECHERCHE ET SAUVETAGE

Les services de Recherche et Sauvetage (SAR) utilisant des moyens spatiaux sont opérationnels depuis plusieurs décennies. Des évolutions significatives du segment spatial sont prévues dès les prochaines années, avec notamment l'utilisation de charges utiles sur des satellites en orbites moyennes tels que Galileo. Ces évolutions devraient permettre d'améliorer sensiblement la qualité du service en rendant possible, notamment, la localisation des avions en détresse soit par triangulation soit par transmission des coordonnées de navigation établies par un récepteur Galileo ou GPS embarqué. Certaines potentialités des futurs systèmes restent encore à explorer.

Outre la préparation de la transition opérationnelle des services de localisation lors de la mise en œuvre des futurs systèmes utilisant Galileo, l'Europe doit notamment : **définir de manière urgente les utilisations potentielles de la voie retour de la fonction SAR de Galileo et s'assurer de l'adéquation des systèmes en cours de développement pour permettre ces utilisations.**

13.5. RECUEIL DE DONNÉES POUR LES SERVICES À L'AÉRONAUTIQUE

13.5.1. Les données numériques de terrain

Autour des aéroports elles sont nécessaires pour la définition des "trajectoires sûres" des avions en phases d'approche et de décollage. Une surveillance du respect des "plans de servitude" relatifs à l'occupation des sols et à la végétation est assurée le plus souvent au niveau du sol, mais une observation régulière depuis le ciel ou l'espace est une source potentielle de réduction des risques, au moins pour certains aéroports dans le monde. Un besoin accru de données numériques de terrain (rafraîchissement jusqu'à une fois par semaine) va par ailleurs apparaître d'ici à 2050, avec la mise en œuvre des techniques dites de "vision renforcée" pour l'aide aux pilotes en cas de conditions météorologiques défavorables aux abords des aéroports.

L'acquisition de données numériques de terrain par des moyens optiques et radar depuis l'espace fait l'objet aujourd'hui de services pleinement opérationnels, mais les délais

d'accès aux sites à observer et les coûts d'utilisation ne permettent pas de répondre de façon satisfaisante aux besoins ci-dessus. Cependant à l'horizon 2050 les systèmes d'observation de la Terre auront considérablement évolué.

L'Europe doit prendre en compte, dans le cadre des réflexions sur les futurs systèmes et services spatiaux d'observation de la Terre, les applications potentielles à l'aéronautique, identifier la similarité de besoins avec d'autres domaines et évaluer la faisabilité technique, la pertinence et le coût d'exploitation de systèmes d'observation correspondant à ces types d'applications.

13.5.2. Les données de météorologie et d'environnement

Accessibles grâce aux moyens spatiaux, elles sont de plus en plus abondantes et diversifiées. Un travail important est à faire sur l'évaluation et l'utilisation des moyens rendus disponibles dans les décennies en cours.

Par ailleurs, hormis pour les messages d'alerte, le transfert de données et de prévisions météorologiques aux équipages se fait encore essentiellement au sol avant le décollage. Les services aéronautiques semblent considérer que les offres de communications à large bande sont encore insuffisantes pour rendre économiquement attractifs les transferts de données pendant le vol. L'utilisation plus large de moyens de communication permettra donc d'améliorer l'information météorologique disponible à bord.

L'Europe doit : **poursuivre activement l'analyse des bénéfices à tirer d'une plus large utilisation des données météorologiques rendues disponibles grâce aux nouveaux moyens spatiaux, ainsi que d'une réduction des temps d'accès aux données d'observation par les centres de météorologie d'une part et aux prévisions météorologiques par les pilotes d'autre part.**

Une réflexion complémentaire doit être menée sur l'utilisation des **données environnementales** rendues disponibles grâce aux nouveaux moyens spatiaux.

13.6. FONCTIONS D'ASSISTANCE À L'ÉQUIPAGE ET AUX PASSAGERS

13.6.1. Sécurité, télésurveillance et assistance au contrôle de l'avion

Avec l'établissement de liaisons à haut débit, fiables, disponibles, protégées contre les intrusions, et avec des délais de quelques centièmes de secondes à quelques secondes selon les phases de vol, il devient possible d'effectuer : le transfert de données de type "boîtes noires", la télésurveillance des paramètres critiques de l'avion, l'assistance aux équipages pour le contrôle de l'avion et enfin la prise en charge d'un aéronef (drone) depuis le sol (associée à une forte automatisation à bord). Pour chacune des fonctions ainsi énumérées, des actions devraient être menées pour : **analyser les exigences applicables aux systèmes et services de communications, y compris l'équipement correspondant de l'avion, étudier les possibilités présentes et futures de répondre à ces différents niveaux d'exigence ainsi que les impacts économiques correspon-**

dants et anticiper le cas échéant les futurs besoins de développement d'infrastructures européennes.

13.6.2. Télémédecine : assistance médicale à bord des avions

Des expérimentations menées avec l'aide d'agences spatiales européennes dont l'ESA et le CNES dès le début des années 2000, ont démontré la faisabilité et l'intérêt potentiel de la téléconsultation/télémédecine à bord des avions. Les apports de ces services concernent la qualité du diagnostic de l'état médical d'un passager requérant assistance ainsi que la qualité des soins d'urgence donnés à bord et la pertinence de la décision du pilote de poursuivre le vol ou de se dérouter. Avec l'apparition des très gros porteurs pour les vols long-courriers, et l'augmentation du nombre de vols des "seniors", il est judicieux de : **ré-analyser l'intérêt d'un service de télémédecine par satellites à bord des avions et définir les aspects de formation requise pour l'équipage et l'engagement de responsabilité lors de la mise en œuvre des moyens et services de télémédecine.**

ANNEXE 1 : RÉSUMÉ DES VALEURS NUMÉRIQUES

Rubrique	2010 (meilleures données)	2050 (projections)	Commentaires
Population mondiale et taux de variation/an (milliards) Dont : **Chine** **Inde**	6,9 (+0,1/an) 1,34 (+7 millions/an) 1,22 (+17 millions/an)	~ 9,3 (~ +0,04/an) (~ +35 %) ~1,3 (-7 millions/an) ~1,7 (+6 millions/an)	Valeur médiane des projections ONU 2010
PIB annuel mondial en unités monétaires constantes 2010	Base	Facteur multipl. ~ 3,0 moyenne ~ 2,8 % l'an	
Ratio CA global des compagnies aériennes / **PIB mondial en %**	0,91	1,055	Moyenne de données diverses sources
Trafic aérien giga PKT (Pax*Km Transportés) **/an**	4960	15500 (multipl. ~ 3)	Projection 2050 déduite du CA et du prix du billet
Répartition du trafic PKT % Europe Amérique du Nord Asie-Pacifique Amérique latine Afrique Moyen-Orient	 31 31 28 5 2 3	 15 21 48 8 3 5	Pourcentages indicatifs dérivés de diverses sources (OACI, ACI, IATA), et de la modélisation du PIB pour 2050
Prix du carburéacteur US $/USG *Prix pétrole US $/Bl*	2,03 prix moyen constatée 2010 *80*	5,5 à 6,6 Facteur multipl. 2,5 à 3 *200 à 250*	hypothèse de travail de la CP tenant compte de la disponibilité du carburéacteur
Taux d'accident par millions de vols	0,5	0,12	3,5 en 1970
Prix du billet d'avion US $/km (conditions économiques constantes)	0,097	0,107(+ 10 %)	Effets renchérissement carburant et des améliorations des autres postes
Coefficient de remplissage des avions (passagers)	0,78	0,85 (+ 9 %)	Moyenne globale (sources 2010: IATA, OACI)
Nombre de pax transportés par an (milliards)	2,7	7,9 Facteur multipl. ~ 2,9	
Parcours moyen du pax (km)	1830	~ 1950	Déduit par calcul PKT/Pax
Nombre de vols commerciaux par an (millions)	29	61	Facteur multiplicatif : 2,1 pour l'ensemble du monde, dont 1,2 pour l'Europe, 1,6 pour l'Amérique du Nord et 2,9 pour le reste du monde.
Nombre d'appareils en service (milliers)	20,3 (*23 avec cargo*)	~ 42 (*48 avec cargo*) Facteur multiplic. ~ 2	Avions commerciaux > 19 pax (*ou avec cargo*)
Nombre d'aéroports commerciaux avec plus d'un million de passagers par an	500	~ 700	Augmentation attendue essentiellement hors Europe et États-Unis
Consommation moyenne de carburant avion par PKT	Base	Réduction ~ 35 %,	Avion moyen, mission moyenne
Consommation totale de carburant avion	Base	Facteur multiplic. ~1,85	Modélisée sur base conso. moyenne et renouv. flotte
Production totale de kérosène	240 à 250Mt ~ 7 à 8% du pétrole produit dont ~ 6,2% pour l'aviation civile	450 à 500 Mt ~ 10% du pétrole produit + carburants alternatifs.	Risque de concurrence d'usage avec d'autres utilisateurs
Émissions totales de CO_2 avions (flotte mondiale)	Base	Facteur multiplicatif ~ 1,6	Estimation prenant en compte l'apport des biocarburants et les efforts de compensation carbone
Émissions totales de NO*x* avions	Base	~ +7 %	Effets combinés trafic, consommation carburant et réductions de NO*x*
Énergie sonore totale avions flotte mondiale, sur la base des niveaux de bruit certifiés décollage (survol)+approche	Base	Réduction 15 à 20 %	Modélisée en fonction du nombre de vols et des niveaux de bruit (réduits en 2050)

ANNEXE 2 : PERSONNES AYANT PARTICIPÉ AUX TRAVAUX

Présidence : Alain Garcia

Animateurs-rédacteurs des thèmes :

- Société, démographie et économie : Jean-Claude Ripoll
- Volume du marché : Georges Ville
- Qualité de service : Michel Vedrenne puis Gérard Rozenknop
- Construction aéronautique : André-Denis Bord
- Énergie : Marc Pélegrin puis Gérard Théron
- Structures d'exploitation et du prix du billet : Marc Noyelle
- Environnement : Alain Joselzon
- Les Services de la circulation aérienne : Jean-Marc Garot
- Contribution de l'Espace : Jean Broquet

Avec la participation continue de *:*

- Pierre Calvet
- Xavier Champion
- Dominique Colin de Verdière
- Gérard Delalande
- Philippe Jarry
- Paul Kuentzmann
- Michel Lemoine
- Anne-Marie Mainguy
- Christiane Michaut
- Peter Potocki
- Jean-Baptiste Rigaudias
- Manola Romero
- Gérard Rozenknop
- Jacques Renvier
- Michel Vedrenne
- Jean-François Vivier
- Nicolas Zveguintzoff

Et la contribution de *:*

- Pierre Andribet
- Lionel Baize
- Alain Baudoin
- Pierre Bauer
- Olivier Colaitis
- Daniel Deviller
- Patrick Dujardin
- Daniel Hernandez
- Raymond Rosso
- Yves Trempat

ANNEXE 3 : GLOSSAIRE

AAE	Académie de l'air et de l'espace
ACV	Analyse du cycle de vie
ADS-C	Automatic dependent surveillance - contract
BEA	Bureau d'enquêtes et d'analyses
CA	Chiffre d'affaires
CC TF	Court-courrier turbofan
CC TP	Court-courrier turbopropulseur
CCNUCC	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CCS	Capture-séquestration du carbone
CE	Commission européenne
CEPII	Centre d'études prospectives et d'informations internationales
CP	Commission prospective de l'AAE
CTL	Coal to liquid
DGAC	Direction générale de l'aviation civile
EASA	Agence européenne de la sécurité aérienne
FAA	Federal aviation administration
FMI	Fonds monétaire international
GTL	Gas to liquid
IATA	Association internationale du transport aérien
ICAO	International civil aviation organisation
LC	Long-courrier
LET	Laboratoire d'économie des transports
MC	Moyen-courrier
NOx	Oxyde d'azote
OACI	Organisation de l'aviation civile internationale
OMC	Organisation mondiale du commerce
ONG	Organisation non gouvernementale
PIB	Produit intérieur brut
PKT	Passager kilomètre transporté
SAR	Search & rescue
SPK	Synthetic paraffinic kerosene
UNFCCC	United Nations framework convention on climate change
VLA	Très long-courrier à très grande capacité
WTW	Well to wake