

## Résumé du mémoire...

L'étude s'inscrit dans la continuité du projet européen SCENIC (Scenario of aircraft emissions and Impact studies on chemistry and Climate), dont le but est d'analyser l'impact des émissions liées au transport aérien sur la chimie de l'atmosphère, ainsi que sur le climat. Les effets de l'aviation supersonique représentent en particulier un objectif majeur du projet. L'étude se base sur les différents scénarios de flottes aériennes proposées par AIRBUS pour les années 2050.

Les simulations sont réalisées avec le modèle de chimie-transport de Météo-France, MOCAGE, en mode forcé (impact de la thermodynamique sur la chimie). Dans tous les cas, le modèle montre clairement une production d'ozone troposphérique ainsi qu'une destruction d'ozone stratosphérique, avec une modulation plus ou moins importante selon le scénario envisagé. Les résultats des simulations sont analysés afin de connaître les impacts relatifs de chaque scénario d'émissions. Il s'agit en particulier de déterminer les critères de vols supersoniques engendrant les conséquences les plus néfastes sur l'environnement.

## Mémoire Prix AAM 2005 : Simulations de l'impact chimique et climatique des émissions par le transport aérien avec MOCAGE...

Il existe actuellement des préoccupations grandissantes liées au risque de voir les activités humaines affecter sensiblement et durablement notre environnement, aussi bien dans sa composante climatique (le temps « sensible »), que dans sa composante chimique (pollution de l'air). En particulier, dès le début des années 1970, la flotte aérienne, en continuelle expansion, est apparue comme l'un des facteurs pouvant conduire à des changements globaux de l'équilibre de l'atmosphère. En effet, malgré les progrès techniques, la croissance du trafic s'est accompagnée d'une augmentation globale des émissions d'effluents par les moteurs d'avion. Or, ces effluents (oxydes d'azote, vapeur d'eau, monoxyde de carbone, aérosols) sont actifs sur la chimie atmosphérique ainsi que sur le bilan radiatif de la Terre et, par conséquent, peuvent induire des modifications climatiques.

### I - Le projet SCENIC

De nombreux travaux ont été menés à ce sujet, depuis les années 1970. L'étude réalisée ici s'inscrit dans la continuité du projet européen SCENIC (Scenario of Aircraft emissions and Impact Studies on chemistry and Climate), dont le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques) est un des participants. Son objectif est d'analyser l'impact chimique et climatique des émissions de flottes aériennes, selon différents scénarios, à l'horizon 2050 et ce, en utilisant MOCAGE, le modèle de chimie-transport tridimensionnel de Météo-France.

### II - Les données d'étude et les scénarios de flotte

Les données d'émissions utilisées sont fournies par AIRBUS et correspondent à différents scénarios de flottes aériennes pour 2050. Ces données sont réparties sur une grille relativement précise pour ce genre d'études (résolution horizontale de 1° x 1° et verticale de 1000 ft). Pour chaque scénario, les données fournies contiennent la consommation totale de fuel, les émissions d'oxydes d'azote, de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures, en kg/an. Les effets de l'aviation supersonique représentent un des objectifs majeurs du projet SCENIC. En effet, comme l'illustre la figure 1, les perturbations liées aux avions subsoniques (dans la haute troposphère, entre 9 et 13 km d'altitude) et supersoniques (dans la basse stratosphère, entre 17 et 20 km d'altitude) se produisent dans des couches de l'atmosphère aux caractéristiques thermodynamiques et chimiques différentes.

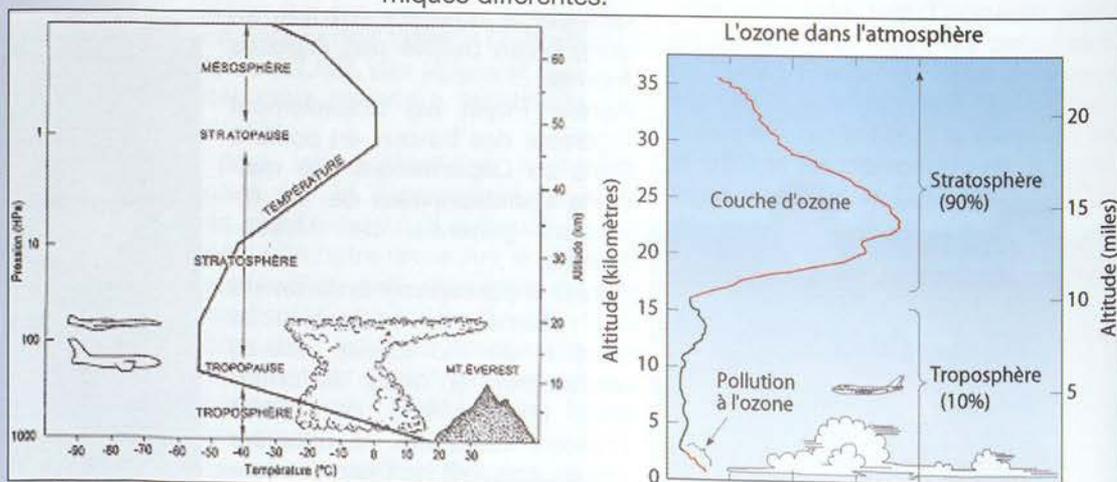


Figure 1 : structure verticale thermodynamique et chimique de l'atmosphère, et niveaux de vol subsoniques et supersoniques

Par conséquent, afin d'évaluer l'impact respectif de ces deux types de vol, AIRBUS propose plusieurs scénarios de flotte mixte, une flotte mixte étant composée d'avions subsoniques et supersoniques. Seuls les scénarios suivants ont été retenus :

- le scénario de référence,
- trois scénarios perturbés par rapport à celui de référence, modifiant respectivement :
  - la taille de la flotte supersonique : 500 aéronefs au lieu de 250 ;
  - la vitesse supersonique (et donc l'altitude de vol) : 1,6 Mach au lieu de 2 Mach ;
  - l'altitude de croisière supersonique : 20 km au lieu de 18 km.

### III - La répartition géographique des émissions

La distribution méridienne des émissions reste globalement identique d'un scénario à l'autre et est conforme à la figure 2, présentant la répartition méridienne du rapport de mélange massique des oxydes d'azote émis par la flotte de référence.

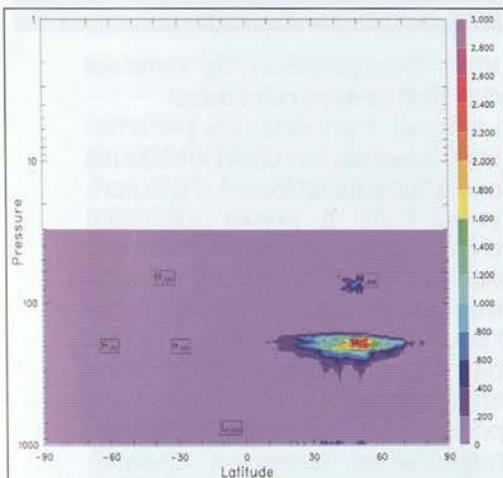


Figure 2 : distribution méridienne du rapport de mélange massique des oxydes d'azote émis par unité de temps (en  $10^{-15}/s$ ), par la flotte de référence, en moyenne annuelle.

D'après la figure 2, les émissions ont lieu principalement dans l'hémisphère nord (maximales vers 45°N) et se répartissent sur 3 niveaux :

- les basses couches (zones de décollage et d'atterrissage) ;
- un niveau subsonique, identique pour tous les scénarios, vers 200 hPa (12 km) ;
- un niveau supersonique, variable selon le scénario.

Concernant les routes aériennes (voir figure 3), les routes subsoniques restent inchangées d'un scénario à l'autre et relient majoritairement l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie orientale. Les émissions maximales se produisent

majoritairement au-dessus de l'Europe. Quant aux routes supersoniques, elles apparaissent principalement au-dessus des océans, afin d'éviter les nuisances sonores. Elles couvrent principalement l'Atlantique Nord (corridor Nord Atlantique) et le Pacifique Nord.

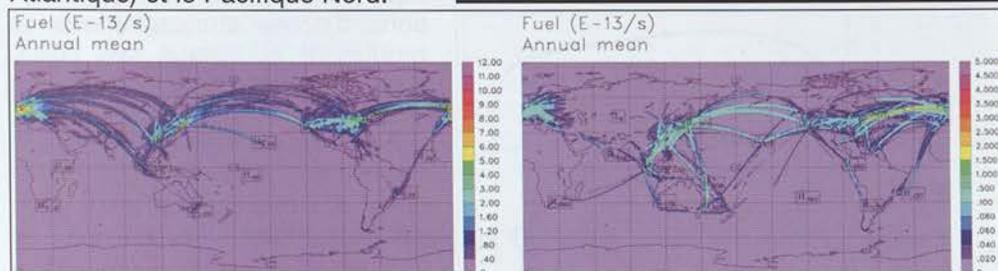


Figure 3 : distribution géographique du rapport de mélange de fuel consommé par unité de temps (en  $10^{-13}/s$ ) moyenné entre 9 et 13 km d'altitude (routes subsoniques) à gauche, et entre 13 et 20 km d'altitude (routes supersoniques) à droite, par la flotte de référence, en moyenne annuelle.

### IV - Présentation des simulations

Les simulations tridimensionnelles sont réalisées à l'aide de la version climatique du modèle MOCAGE, afin de déterminer l'impact relatif de chaque scénario. Les simulations utilisent les forçages météorologiques provenant des analyses opérationnelles du CEPMMT, entre le 01/01/2001 et le 31/12/2004. Elles intègrent également les émissions. Le schéma chimique employé est le schéma RELACS, prenant en compte les chimies stratosphérique et troposphérique de manière détaillée. La complexité de ce schéma implique des temps de calculs relativement longs et justifie une période d'étude de quatre ans. L'innovation de ce travail réside justement dans l'utilisation d'un tel schéma et l'intérêt repose sur l'appréhension du comportement du modèle en intégrant les émissions aériennes. Afin d'étudier l'impact net des émissions aériennes, une simulation est effectuée pour chaque scénario de flotte.

### V - Les perturbations en moyenne méridienne

La figure 4 présente la distribution méridienne des anomalies relatives (en %) engendrées par l'ensemble de la flotte à altitude maximale d'une part, et sa partie supersonique d'autre part, sur le champ d'oxydes d'azote en moyenne annuelle. D'après la figure 4, les perturbations (toujours positives) maximales se retrouvent aux niveaux d'injection subsoniques, dans la troposphère. D'autre part, l'anomalie troposphérique (du même ordre de grandeur pour tous les scénarios) se propage principalement dans l'hémisphère nord alors que la perturbation stratosphérique (liée aux aéronefs supersoniques) gagne l'hémisphère sud.

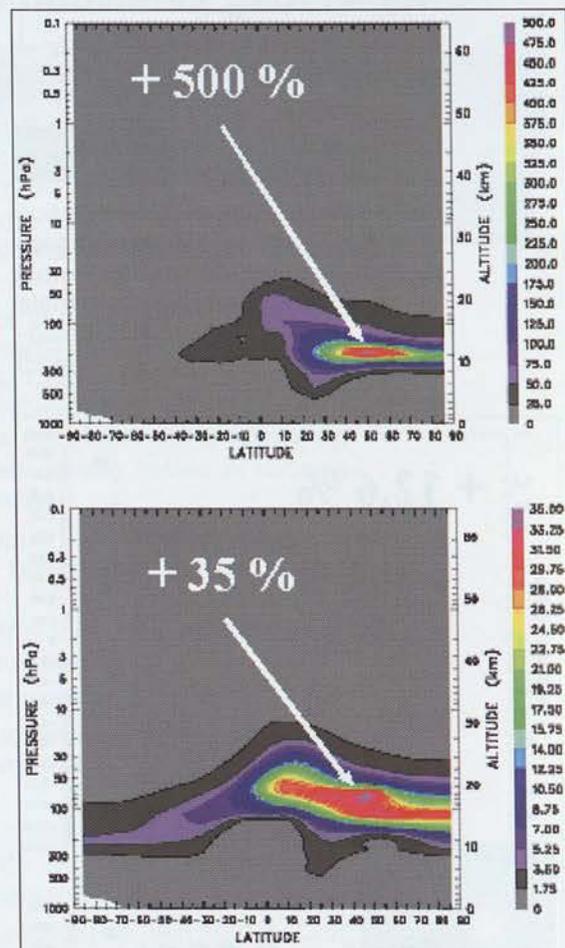


Figure 4 : distribution méridienne des anomalies relatives (en %) engendrées par l'ensemble de la flotte à altitude maximale en haut, et par sa partie supersonique en bas, sur le champ d'oxydes d'azote, en moyenne annuelle.

En effet, comme le montre la figure 5, cette propagation est liée au transport de grande échelle. Dans la troposphère, les émissions restent « bloquées » dans l'hémisphère nord en raison de la barrière imposée par la branche ascendante des cellules de Hadley. En revanche, dans la stratosphère, la circulation de Brewer-Dobson autorise la propagation dans l'autre hémisphère.

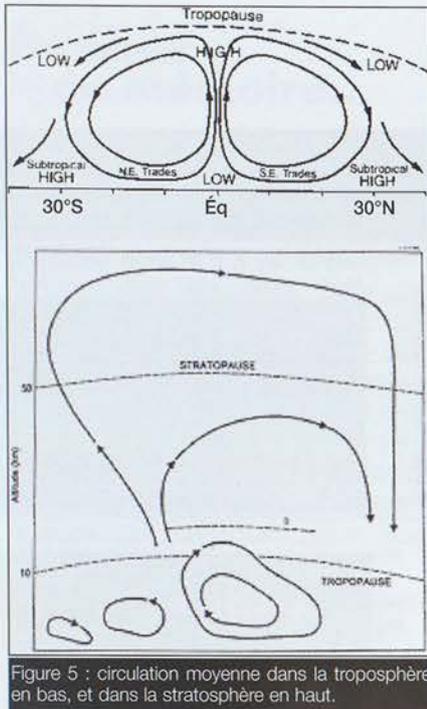


Figure 5 : circulation moyenne dans la troposphère en bas, et dans la stratosphère en haut.

La figure 6 indique la distribution méridienne des anomalies relatives (en %) engendrées par l'ensemble de la flotte à portée maximale d'une part, et sa partie supersonique d'autre part, sur le champ d'ozone en moyenne annuelle.

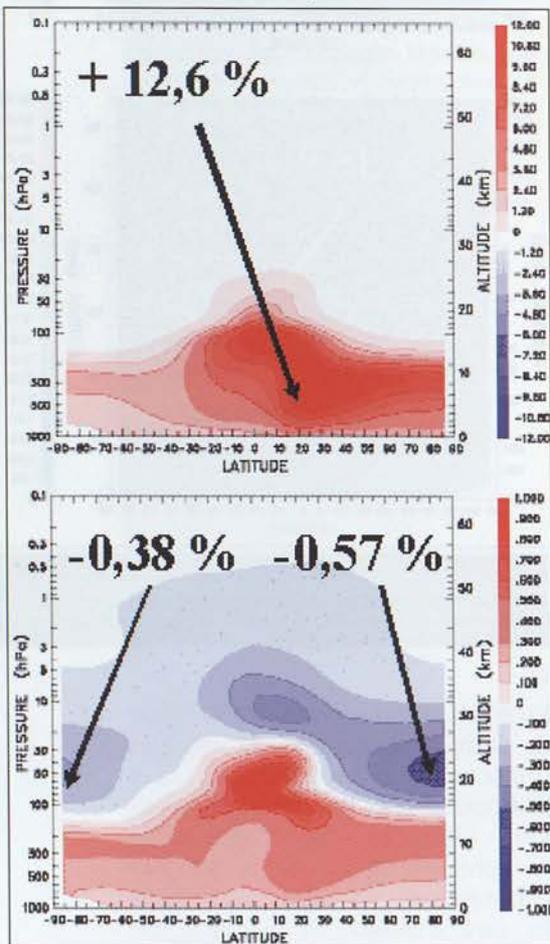


Figure 6 : distribution méridienne des anomalies relatives (en %) engendrées par l'ensemble de la flotte à altitude maximale en haut, et par sa partie supersonique en bas, sur le champ d'ozone, en moyenne annuelle.

La perturbation d'ozone induite résulte du rejet d'oxydes d'azote par les aéronefs. En effet, une introduction d'oxydes d'azote dans la stratosphère provoque une anomalie négative dans le champ d'ozone, à travers des cycles catalytiques. Les plus fortes perturbations d'ozone stratosphérique se produisent au-dessus des pôles, surtout du pôle Nord, toujours en raison du transport. En revanche, dans la troposphère, le phénomène inverse se déclenche. L'augmentation d'ozone est liée aux cycles de production d'ozone par le méthane et le monoxyde de carbone, catalysés par la présence d'oxydes d'azote. MOCAGE simule donc bien ce dipôle et met en évidence le rôle doublement néfaste des émissions : destruction d'ozone dans la stratosphère (là où il est bénéfique en nous protégeant des rayons UV) et production dans la troposphère (là où il devient néfaste en quantité trop abondante).

La production d'ozone troposphérique reste du même ordre de grandeur pour tous les scénarios, autour de 18 %. En revanche, la destruction d'ozone stratosphérique dépend de la flotte. En moyenne annuelle, elle atteint au pôle Nord :

- -0,27 % pour la flotte à vitesse réduite ;
- -0,30 % pour le scénario de référence ;
- -0,55 % pour la flotte supersonique dont la taille est doublée ;
- -0,57 % pour la flotte supersonique à portée maximale.

## VI - L'impact sur la colonne d'ozone

La figure 7 illustre l'impact relatif induit par la flotte de référence sur la colonne totale d'ozone. Elle montre ainsi que la colonne d'ozone augmente entre 45°S et 90°N (augmentation maximale, de l'ordre de 4 %, aux moyennes latitudes de l'hémisphère nord puisque ce sont là que les émissions sont les plus fortes d'après la figure 2). En revanche, elle diminue en dessous de 45°S, en raison de la propagation des oxydes d'azote dans la stratosphère, sous l'effet de la circulation de Brewer-Dobson. En moyenne globale, la colonne totale d'ozone augmente de 0,62 %, soit 2,1 Dobson.

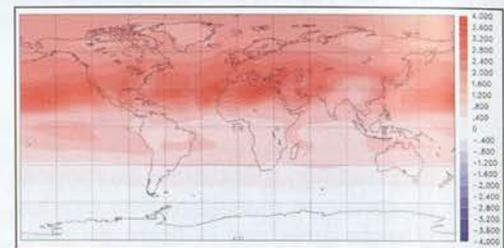


Figure 7 : impact relatif (en %) engendré par la flotte de référence sur la colonne totale d'ozone, selon la latitude.

## VII - Comparaison de l'impact des flottes supersoniques

La figure 8 présente les perturbations absolues (en ppbv) introduites par la flotte de référence d'une part, et la flotte à portée maximale d'autre part, à 17 km d'altitude. Elle illustre le dipôle production d'ozone troposphérique (au niveau de l'Equateur, où la tropopause est plus haute) et destruction d'ozone stratosphérique, au niveau des pôles (où à 17 km d'altitude, la stratosphère est largement atteinte). D'autre part, elle montre aussi le

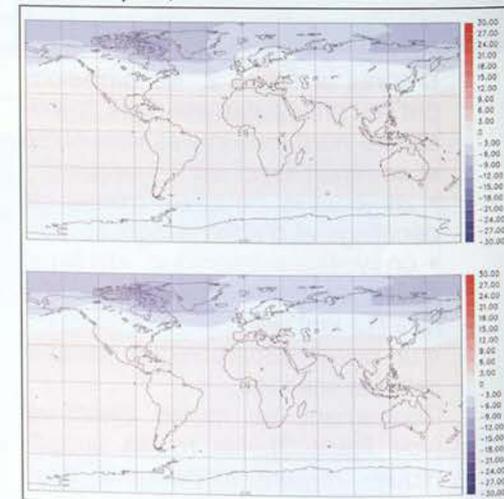


Figure 8 : répartition des anomalies absolues d'ozone (en ppbv) induites par les flottes supersoniques de la flotte de référence en haut et de la flotte à altitude maximale en bas, à 17 km d'altitude.