

# L'AVION DE TRANSPORT SUPERSONIQUE, LA POLITIQUE, LA STRATOSPHERE ET L'ENVIRONNEMENT: UNE PAGE D'HISTOIRE

C. Muller

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique

## Le contexte aéronautique.

Il y a cinquante ans, au début des années soixante, l'industrie du transport aérien prévoyait une croissance rapide du transport aérien à longue distance. Deux solutions étaient possibles : augmenter la capacité des avions à réaction en conservant le même profil de vol que celui du Boeing 707 ou passer à la vitesse supersonique en volant dans la stratosphère en permanence. La seconde solution correspondait à une rotation plus rapide de la flotte et paraissait être rentable pour une clientèle d'affaires et de première classe. Les avions géants développés aussi à l'époque devaient donc être limités au fret, au tourisme et aux flux migratoires.

Les vols stratosphériques n'avaient auparavant jamais été discutés du point de vue de l'environnement. Les traînées d'avion observées à la fin de la deuxième guerre mondiale avaient amené à des études de la vapeur d'eau dans la stratosphère. Ces études avaient confirmé que la stratosphère était bien un milieu sec avec une fraction molaire de l'eau de  $3 \times 10^{-4}$ . Le vol dans la stratosphère des bombardiers avait à l'époque essentiellement une fonction de protection vis-à-vis de chasseurs conçus pour voler plus bas. Les avions de transport n'atteignirent les mêmes altitudes qu'avec l'avènement du moteur à réaction où le profil de vol à haute latitude amenait à de longues incursions au-dessus de huit mille mètres, donc dans la stratosphère. La principale considération d'environnement

concernait l'air des cabines, provenant d'air extérieur comprimé, l'ozone n'était pas perçu comme toxique à l'époque et même des sources d'ozone étaient utilisées pour combattre les odeurs et en particulier celles liées à l'usage du tabac par les passagers. Les zones non-fumeurs n'apparurent qu'en 1970 lorsque sur le premier avion civil de très grande capacité, le Boeing 747, on découvrit des points où la fumée s'accumulait sans pouvoir être évacuée.

Le Boeing 747 avait été développé dans le cadre d'une étude militaire subventionnée dont le gagnant avait été le projet concurrent, le Lockheed C 5-A, un avion de taille équivalente à aile haute permettant un chargement et un déchargement très rapide par une porte arrière. L'aile haute éloignait aussi les réacteurs de la piste et les protégeaient donc dans le cas d'opérations à partir d'aéroports mal préparés. Les deux avions conjuguèrent un grand rayon d'action et une consommation élevée de carburant en altitude. Aucune étude d'environnement n'avait été associée à ce projet. Du côté russe, le choix se porta aussi sur des modèles à aile haute, plus lents à turbopropulseurs et volant plus bas mais cependant capables d'emporter des charges plus lourdes et d'atterrir et de décoller sur des pistes boueuses ou neigeuses.

Ce schéma de développement n'était pas possible pour l'avion supersonique civil car déjà à l'époque les missions de bombardements militaires demandaient

des avions très agiles en vol mais requéraient un minimum de souplesse à l'atterrissage, les bombardiers étant sensés revenir à leur base de départ. Ils étaient munis de sièges ou de cabines éjectables si le retour devenait impossible, l'impact de ces flottes de bombardier sur l'environnement était aussi perçu comme négligeable par rapport à celui des incendies et des contaminations radioactives liées aux bombardements. Cependant, un de ces bombardiers, le Convair B-58 conduisit de 1960 à 1969 des opérations de vol proches de celles d'un avion de transport supersonique. Son abandon a été lié au développement de missiles anti-aériens pour lequel il était devenu une cible facile et à son coût d'opération très élevé. Ses deux équivalents russes connurent un nombre très élevé de perte incompatible avec un usage civil. Par contre, le bombardier stratégique léger français Mirage IV vola en opération de 1965 à 1996 et une version de reconnaissance en était encore active en 2005. Son profil de vol était aussi très similaire à celui d'un avion de transport supersonique. Les pilotes étaient explicitement prévenus qu'après une mission de bombardement stratégique, il n'y aurait plus d'aéroports capables de les recevoir et que l'éjection serait la seule solution. Là aussi, il n'y a pas de traces d'une étude d'environnement.

Le développement du Mirage IV avait commencé en 1955 et lors de son premier vol public en 1959 au salon du Bourget, le président français, Charles de Gaulle, ap-



*Fig. 1: Tombe d'Andrei Nicolaïevitch Tupolev au cimetière de Novodevichy à Moscou. Son fils Alexei Andreïevitch fut le chef de l'unité de design du Tupolev 144 et fut par la suite le designer principal de Bourane, la navette soviétique. La tombe représente un groupe de Tupolev 144 en vol.*

prouva le développement d'un avion de transport supersonique national : la Super-Caravelle. Comme le Mirage, c'était un avion à aile delta. Il évolua durant les années pour devenir un projet franco-britannique sous le nom de Concorde utilisant l'expérience acquise par l'Aérospatiale et British Aerospace en aéronautique militaire. La conception spécifique de l'aile et du nez en faisait néanmoins un avion très original. A son premier vol en 1969, il était clair que Concorde pouvait remplir son contrat : transporter environ cent passagers au-dessus de l'Atlantique à la vitesse de Mach 2.

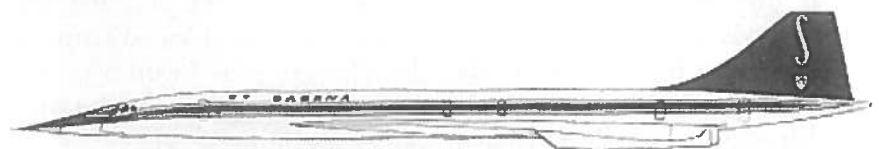
## Les avions supersoniques américains et russes.

Les projets russes et américains étaient plus ambitieux. Ils envisageaient des avions à très long rayon d'action, volant à Mach 3 et donc à une altitude supérieure : 24 km par rapport à Concorde à 16 km. Le projet américain fut dès l'élection du président Nixon en 1968 victime de turbulences politiques. Le sénateur Proxmire du Wisconsin lança une campagne contre le financement sur fonds de prestige dispendieux. Pour la première fois, il avança aussi des arguments d'environnement, le premier lié au bang sonique, bien connu suite aux vols réguliers du B-58, le second lié au bruit au décollage et le troisième lié au climat :

l'éjection par l'avion de particules de suie à 24 km provoquerait une couche permanente de poussière restreignant le rayonnement solaire arrivant dans la troposphère et donc susceptible de provoquer un refroidissement climatique et donc de conduire à un nou-

vel âge glaciaire. L'escalade des coûts de développement conforta ces arguments et le Congrès emporta une victoire décisive en 1969 en arrêtant le financement du projet. Le sénateur Proxmire durant sa longue carrière attaqua de nombreux projets fédéraux et supprima entre autres tous les subsides publics du projet SETI (recherche de l'intelligence extraterrestre). La biographie du sénateur Proxmire ne manque pas d'intérêt. Démocrate conservateur, il mena une longue carrière marquée par la courtoisie et la frugalité. Il alla même jusqu'à déclarer des frais de campagne inférieurs à 200 \$ et refusait l'usage de limousines de fonction. Il avait été élu en 1957 lorsque son prédécesseur, le très conservateur républicain Joseph McCarthy décéda des conséquences de son alcoolisme. Lors de la présidence de Richard Nixon de 1969 à 1974, il fut l'un de ses opposants les plus zélés. Il plaçait la morale au-dessus de tout et intervint plus de trois mille fois au Sénat pour faire ratifier une convention internationale sur le génocide, ce qu'il obtint après 25 ans d'effort.

Du côté russe, malgré une excellente connaissance des plans et des problèmes de développement rencontrés par Concorde, la société Tupolev persista dans ses efforts de développer un avion supérieur : le Tupolev 144. Les essais furent simultanés à ceux du Concorde mais le résultat fi-



*Fig 2. : La SABENA prit des options sur deux Concorde en 1965. Ce dessin correspond à la livrée prévue à l'origine (<http://www.concordesst.com/history/orders.html>). La SABENA renonça à ses options en 1973.*

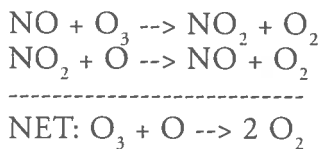
nal fut inférieur à la fois en rayon d'action et en nombre de passagers transportés. La vitesse finale n'était même pas supérieure à celle de Concorde. Le Tupolev 144 n'entra jamais réellement en service commercial. Un exemplaire fut utilisé par la NASA pour des tests entre 1995 et 1999 mais ne put sortir de Russie car certains de ses nouveaux équipements auraient pu informer l'étranger des performances réelles du nouveau bombardier Tu-160. Ni l'opinion publique russe ni l'Académie des Sciences n'ont jamais mis en doute à l'époque ce projet, marque de la supériorité nationale.



Fig. 3: Décollage d'un Concorde lors d'un vol commercial, l'échappement montre clairement une traînée rouge due à la transformation instantanée du monoxyde d'azote en dioxyde d'azote à la surface. Cette production élevée d'oxyde d'azote reflète le très haut rendement des réacteurs OLYMPUS de Concorde. (Image par Philippe Noret).

### Concorde et l'environnement.

En 1969, les essais de Concorde permettaient déjà d'identifier des lignes commerciales possibles et plusieurs grandes compagnies américaines confirmaient leurs options au vu de l'arrêt du développement du Boeing 2707, l'avion supersonique américain. Ce fut à ce moment que le milieu stratosphérique intervint sous la forme d'une campagne basée sur des travaux du Professeur de l'Université de Berkeley Harold Johnston : les oxydes d'azote éjectés par les réacteurs OLYMPUS de Concorde dans la stratosphère pouvaient affecter l'ozone par un cycle catalytique :



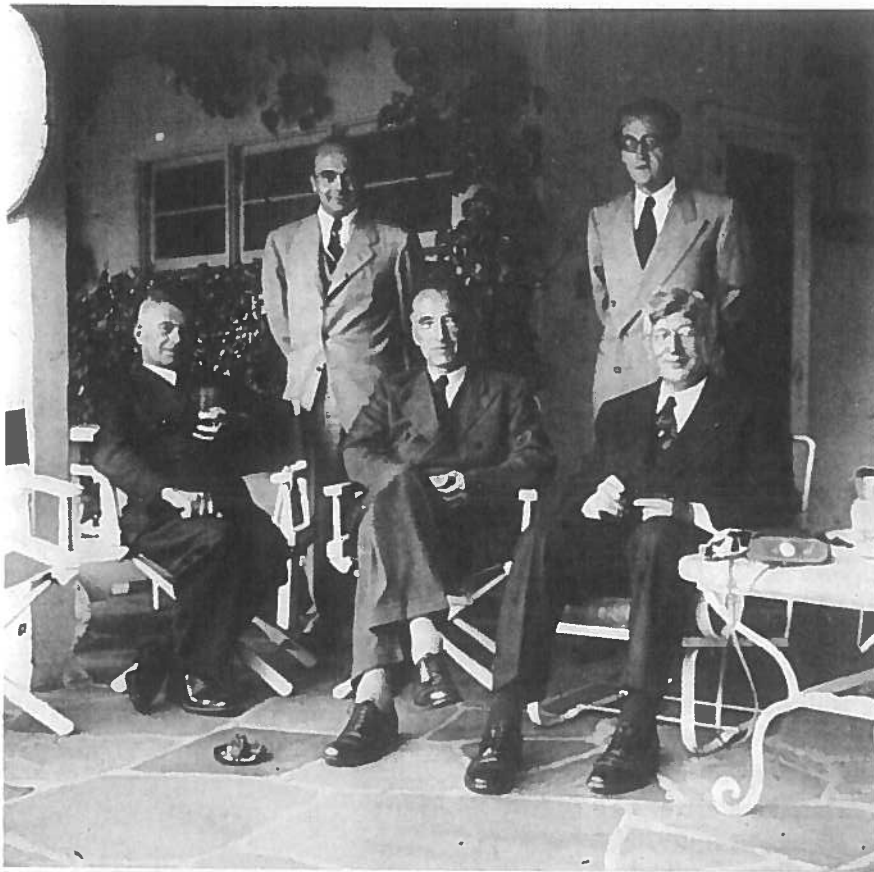
Si on suit littéralement ce cycle, une molécule de NO pourrait détruire toute la couche d'ozone. L'ozone filtre efficacement les UV-C (entre 200 et 280 nm) et limite fortement les UV-B (entre 280 et 320 nm). La première conséquence en serait donc d'augmenter l'incidence du cancer de la peau chez l'homme, sui-

vie de conséquences sur la végétation et les animaux avec pour résultat extrême la stérilisation de la surface terrestre. Le succès de cette théorie auprès des étudiants activistes américains fut immédiat et une campagne visant à interdire l'atterrissage de Concorde aux Etats-Unis s'étendit vite à tout le territoire à commencer par les côtes Est et Ouest. Harold Johnston était à l'époque doyen du département de chimie de l'université de Berkeley et avait acquis une notoriété publique en 1954 en quantifiant la théorie de Haagen-Smit du brouillard photochimique de Los Angeles. Dans le brouillard photochimique, le monoxyde d'azote produit par les moteurs à explosions réagit avec des précurseurs présents dans la troposphère en présence de rayonnement solaire en finissant par produire de l'ozone. Ce processus implique un grand nombre de réactions et en particulier celles des oxydes d'azote  $\text{NO}_3$  et  $\text{N}_2\text{O}_5$  de même que les acides  $\text{HNO}_2$  et  $\text{HNO}_3$ . En 1966, il publia un ouvrage théorique : « *Gas phase reaction rate theory* », ce livre l'amena à entrer en contact avec tous les chimistes atmosphériques car un grand nombre de réactions n'avaient jamais été mesurées ou avaient été étudiées

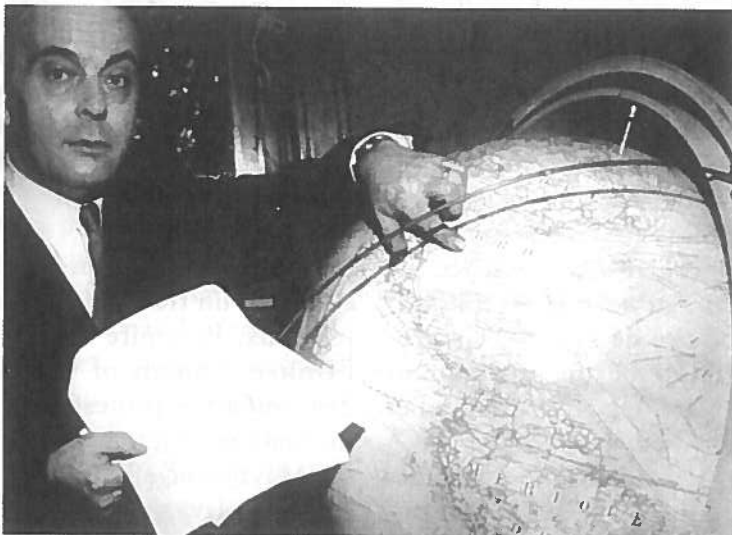
dans des conditions sans rapport avec l'atmosphère.

Harold Johnston était donc un scientifique extrêmement réputé et non l'activiste illuminé que se représentait l'administration Nixon. Il décéda en novembre 2012 après que l'université de Berkeley eut recueilli ses souvenirs précis sur son implication dans l'affaire du transport supersonique ([http://digitalassets.lib.berkeley.edu/roho/ucb/text/johnston\\_harold.pdf](http://digitalassets.lib.berkeley.edu/roho/ucb/text/johnston_harold.pdf)). Son lien avec le sénateur Proxmire vint de Joe Hirschfelder, un professeur à l'université de Wisconsin qui introduisit les effets biologiques de la réduction d'ozone dans les comités américains.

Proxmire et Johnston avaient en commun un très fort engagement religieux. Proxmire appartenait à l'United Church of Christ, une dénomination protestante qui remontait aux premiers Américains du Mayflower et qui avait combattu l'esclavage par des méthodes parfois illégales (réseaux d'évasion d'esclaves). Johnston appartenait à une branche de l'église méthodiste qui s'était opposée à l'injustice faite aux indiens Cherokees de Géorgie au milieu du 19<sup>e</sup> siècle. La désobéissance civile leur



*Fig.4: Photographie de 1950 montrant à Caltech (Pasadena, Californie) Sidney Chapman, auteur de la première théorie de l'ozone stratosphérique, Marcel Nicolet, David Bates, auteur du premier article reprenant les sources et les pertes du méthane et du N<sub>2</sub>O atmosphérique, autour de Lloyd-Berkner, initiateur de l'année géophysique internationale et d'un officiel de Caltech.*



*Fig.5: Marcel Nicolet en 1957 à l'époque de l'année géophysique internationale, montrant le Cap Canaveral tandis que l'inclinaison de l'orbite est celle qui sera suivie quelques mois plus tard par Spoutnik 1.*

était donc une attitude normale et pour eux l'argument d'autorité représenté par l'administration Nixon n'avait aucune valeur vis-à-vis d'une conviction morale.

En Europe, les constructeurs de Concorde, l'Aérospatiale et British Aerospace étaient consternés. Toute discussion sur le sujet d'un impact environnemental était confidentielle et les réunions de discussion étaient annoncées par des titres anodins comme séminaires franco-britanniques et surtout se tenaient loin du monde académique.

### **Rôle pionnier de l'Institut d'Aéronomie spatiale de Belgique**

Les dirigeants de l'Aérospatiale connaissaient le rôle international du Professeur Nicolet, fondateur de l'Institut d'Aéronomie Spatiale à Bruxelles. Ses propres travaux sur les oxydes d'azote étaient aussi très antérieurs aux recherches américaines. Et donc l'Aérospatiale lui confia en 1970 une mission discrète d'enquête sur le problème d'une éventuelle pollution par Concorde. En fait, le groupe belge connaissait déjà la réponse : en 1969, Ackerman et Frimout avaient identifié le dioxyde d'azote sur un spectre obtenu dans la stratosphère et donc savaient, sans pouvoir quantifier cette connaissance, qu'il existait un équilibre naturel stable entre les oxydes d'azote et l'ozone de la stratosphère. La question devenait donc : « Combien de Concorde peut-on autoriser ? » au lieu de « Faut-il interdire le Concorde ? ». Nicolet savait aussi depuis ses travaux avec Bates dans les années 1950 que l'hémioxyde d'azote N<sub>2</sub>O produit par des réactions biologiques dans les sols arrive dans la stratosphère où sous l'effet du rayonnement UV, il produit de l'azote. De nouveau, des mesures infrarouges en ballon

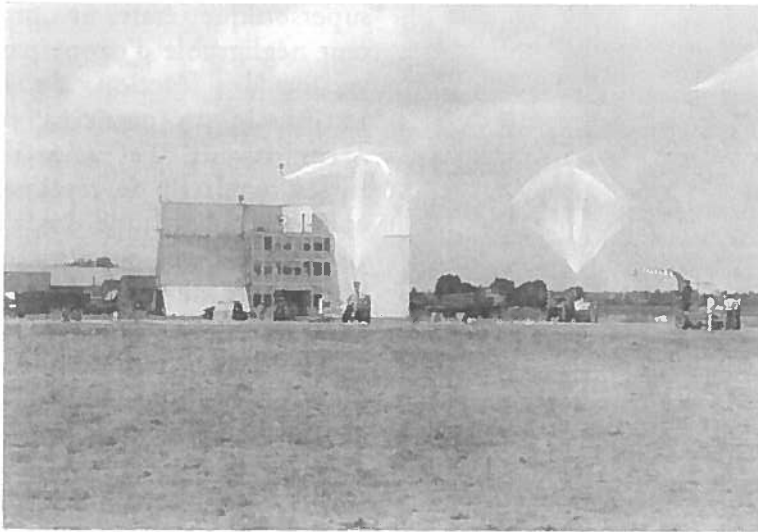


Fig.6: Préparation d'un lancement de ballon à Aire-sur-l'Adour en 1973. La nacelle est soutenue par un ballon auxiliaire.

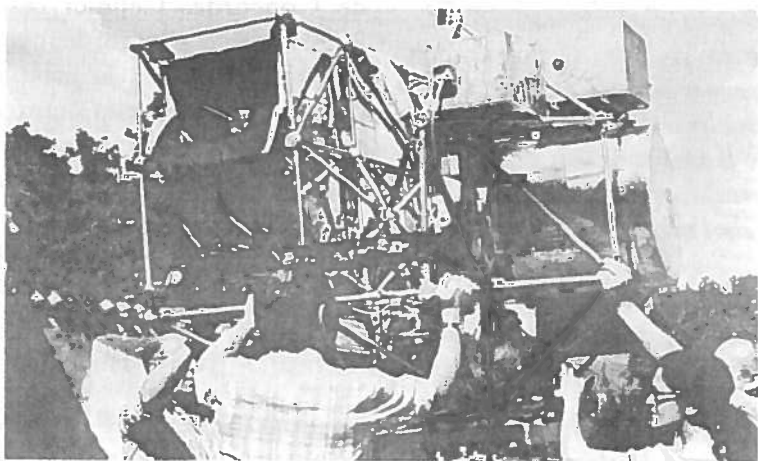


Fig.7: Nacelle stratosphérique stabilisée de l'IASB emportant le spectromètre à grille de type Girard développé en commun avec l'ONÉRA pour la mesure des oxydes d'azote stratosphériques en 1973 et 1974.

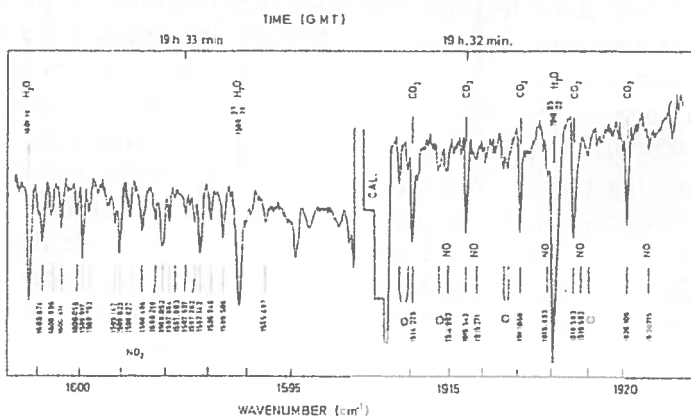


Fig.8: Un spectre de 1974 obtenu dans la stratosphère par l'Institut d'Aéronomie Spatiale et montrant les raies du dioxyde d'azote et du monoxyde d'azote ayant conduit à leur découverte dans la stratosphère.

de l'IASB montraient une décroissance des fractions molaires de  $N_2O$  dans la stratosphère alors qu'elles restaient quasi constantes dans la troposphère. Ces travaux avaient été publiés et exploités par Nicolet dans la publication de l'IASB (*Aeronomica Acta*, cette publication faisant l'objet du dépôt légal) et ont donc une antériorité par rapport aux travaux de Paul Crutzen mentionnés dans sa citation au prix Nobel en 1996. Le délai apporté par M. Nicolet à publier ailleurs était lié à des considérations internes. Il ne souhaitait pas accélérer la carrière de collaborateurs qu'il jugeait trop indépendants. En 1971, le recrutement par Nicolet de trois jeunes contractuels conjugué à l'usage des ordinateurs de l'Aérospatiale permit de quantifier ces points et même d'identifier la terminaison du cycle catalytique : la formation d'acide nitrique éliminé par les gouttelettes d'eau formées au sommet de la troposphère. Le même financement par l'Aérospatiale permit à l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique de développer un nouveau spectromètre infrarouge qui permit la découverte de NO à partir du prototype Concorde et sa vérification quasi immédiate par un vol ballon.

Ces résultats de mesure furent publiés très rapidement dans la revue *Nature* et déclenchèrent des réactions violentes dans le milieu scientifique américain : « les données spectrales étaient manipulées, les enregistrements analogiques avaient été filtrés pour faire apparaître le signal et les absorptions observées ne correspondaient pas aux molécules observées. ». Il fallut environ deux ans pour que ces controverses se dissipent au fur et à mesure que des groupes américains obtenaient des résultats comparables.

Cette coopération entre l'Aéros-



*Fig. 9: Rowland, Molina et Crutzen à l'occasion du prix Nobel de chimie de 1996, lié à la chimie de l'ozone. Rowland quantifia l'effet du chlore sur l'ozone grâce aux sections efficaces d'absorption UV des chlorofluorométhanes mesurées par le groupe de Molina. Crutzen après avoir travaillé sur la stratosphère développa un intérêt précoce sur le climat. On lui doit la théorie de l'hiver nucléaire et quand il initia l'instrument SCIAMACHY sur ENVISAT, il mit tout son poids dans la balance pour que la mesure des gaz à effets de serre aille de pair avec celle des gaz affectant l'ozone et la qualité de l'air. (Document comité Nobel).*

patiale et Marcel Nicolet avait aussi une base idéologique. Ce dernier, comme son chef de département Marcel Ackerman, provenait du Luxembourg belge entré en léthargie économique au 19<sup>e</sup> siècle suite à l'opposition des notables locaux au développement du chemin de fer. Ils voyaient dans le comportement des activistes américains une intention de maintenir l'Europe dans le sous-développement technologique. Les responsables de la division technique avion de l'Aérospatiale, quant à eux, montraient un intérêt réel pour l'étude scientifique de leur milieu de vol. Ils s'intéressaient notamment à l'ozone stratosphérique en tant que traceur de la dynamique afin d'optimiser les futures routes de vol de Concorde. Les responsables industriels français avaient aussi bien sûr des sentiments très nets envers la contestation exprimée par les environnementalistes américains. Il en résultait une

complicité Industrie-IASB qui ne se renouvela jamais par la suite.

### **L'étude internationale sur l'impact de l'avion supersonique.**

British Aerospace initia aussi une recherche interne encore moins documentée que celle de l'Aérospatiale. C'est dans le cadre de cette recherche que fut évoquée pour la première fois, bien avant 1974, la menace du chlore sur l'ozone. Ces efforts nationaux se fondirent à partir de 1973 dans trois grands programmes gouvernementaux : le CIAP (Climatic Impact Assessment Programme) aux Etats-Unis, le COVOS en France et le COMESA en Grande-Bretagne. Tout le programme de recherche fut divisé en étapes caractérisées chacune par des rapports. A la fin du projet en 1976, il était établi qu'à l'altitude de vol du Concorde (16 km), l'avion

supersonique était un producteur négligeable d'ozone par une version des réactions du smog. La Russie ne participa jamais à ces travaux. Les scientifiques russes tentèrent de répliquer en comparant l'attitude américaine vis-à-vis du vol supersonique à la passivité de ces mêmes autorités devant l'accroissement de la circulation automobile dont les effets nuisibles étaient avérés depuis bien plus longtemps.

Cette conclusion amena à un accord tripartite entre les Etats-Unis, la France et la Grande-Bretagne autorisant une exploitation commerciale expérimentale de Concorde. Celle-ci cessa en 2003 suite à l'accroissement des coûts d'opération, la production de pièces spécifiques étant devenue une charge trop lourde pour EADS, la société ayant succédé à l'Aérospatiale. L'accident de 2002 avait mis en évidence une fragilité fondamentale de l'avion accroissant aussi ses coûts d'assurance.

Le programme CIAP fut suivi par un autre programme américain, le HAPP (High Altitude Pollution Programme). Ce programme, conduit à l'écart des Européens, dura jusque dans les années 1990. Ici de nouveau, les mémoires de Harold Johnston donnent un éclairage original. Ce programme évaluait les impacts d'avions de transport hypersoniques volant au sommet de la stratosphère à des vitesses voisines de Mach 6. Tous les exemples traités étaient américains et auraient produit dix fois plus d'oxyde d'azote par passager que le transport supersonique américain de référence. Il n'y a jamais eu de réalisation et il n'est pas encore acquis maintenant qu'un essai de moteur hypersonique ait abouti au succès.

## Epilogue

L'arrêt des vols supersoniques en 2003 n'eut aucune répercussion économique. La signature de documents par fax était acceptée depuis déjà longtemps et la signature électronique entrainait dans les mœurs elle aussi. Le déplacement rapide des décideurs cessait donc d'être justifié et malgré l'apparition périodique de belles maquettes dans les salons aéronautiques, aucun projet ne fut réellement démarré depuis. Par exemple, le projet ZEHST « Zero Emission Hypersonic Transportation » d'EADS vole

au-dessus de 30 km au moyen d'un moteur fusée (oxygène-hydrogène), monte et atterrit en utilisant un carburant élaboré à partir d'algues pour effectuer la distance Paris-Tokyo en 2h30, pour un premier vol vers 2050.

Par contre, l'hémioxyde d'azote croît dans la troposphère en raison de l'accroissement de l'activité agricole. Il était resté stable et avait même légèrement décliné entre 1950 et 1975. Cette décroissance était due à une meilleure oxygénation des sols par l'amélioration du labourage. Cependant, l'augmentation de l'usage des

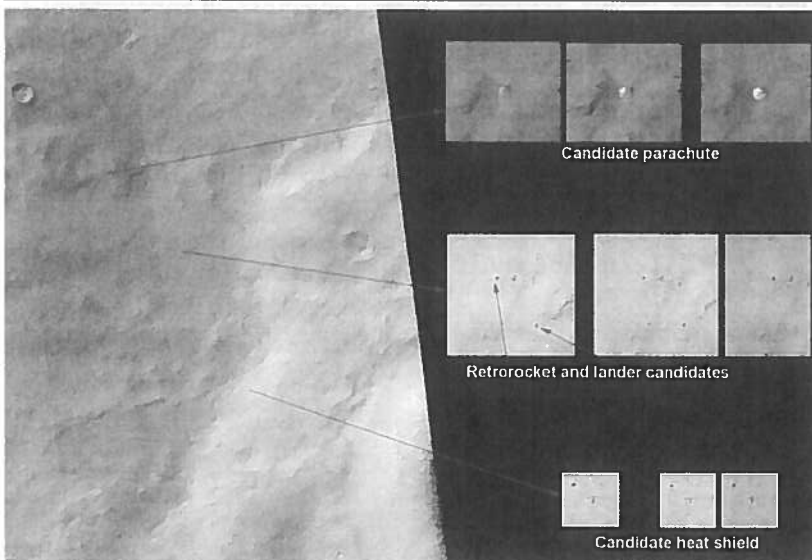
engrais azotés a fini par déséquilibrer le cycle de l'azote et  $N_2O$  croît dans la troposphère. En plus d'augmenter son rôle en tant que gaz à effet de serre, il devient la principale cause de destruction de l'ozone stratosphérique au 21<sup>e</sup> siècle.  $N_2O$  n'a pas été considéré dans le protocole de Montréal malgré quarante années de recherches sur ce sujet.

## Références

La question de l'ozone stratosphérique n'a été dépassée en termes de communications de presse que par la guerre du Vietnam entre 1970 et 1975. Un exemple d'article en français portant sur la période décrite est : Muller, C., L'ozone de l'atmosphère, La Recherche, 13, 180-189, 1982.

Un des livres les plus complets en français est : Mégie, G., Ozone: l'équilibre rompu, Presses du CNRS, 1989

Autrement, les excellents sites d'« Environnement Canada » permettent de suivre en quasi temps réel l'évolution de la problématique de l'ozone : <http://www.ec.gc.ca/ozone/default.asp?lang=Fr&n=DB5CBDE6-1>



Depuis son orbite, MRO a déjà photographié plusieurs rovers à la surface de la Planète rouge. Un communiqué de la Nasa rapporte que les membres d'un forum russe consacré au robot Curiosity ont analysé des images en haute résolu-

tion du cratère martien Ptolémée. Ce cratère fut le point d'atterrissage présumé de la sonde soviétique, Mars 3, voilà 42 ans sur la Planète rouge. Sur une image acquise par MRO lors d'un survol effectué en novembre 2007,

*ces passionnés ont effectivement découvert plusieurs taches claires qui pourraient être des restes de la mission : l'atterrisseur, son bouclier thermique, son parachute et ses rétrofusées. L'image en question comporte près de deux milliards de pixels, ce qui explique que cinq années aient été nécessaires pour débusquer des fragments de la mission Mars 3. La coïncidence entre les vestiges retrouvés et le déroulement supposé de la mission russe semble parfaite, mais il faudra de nouvelles images pour confirmer que les points brillants au fond du cratère Ptolémée sont bien les restes du premier atterrissage d'un engin sur Mars, et pas de simples rochers. Crédits : NASA, JPL, Caltech, Université d'Arizona*