L'avion de transport supersonique

Journée d'étude à l'ONERA
6 avril 2000

Synthèse des exposés et discussions

Annexes : - La reprise des vols de Concorde en novembre 2001
- Quelles vitesses pour le transport aérien intercontinental ?

ONERA

Dossier n°19 2002

Teknea

203 avenue de Fronton
31200 Toulouse
Tél : (33-0)5 34 26 01 20 - Fax : (33-0)5 34 26 01 21
teknea@teknea.com
Internet : http://www.Teknea.com

Académie Nationale de l'Air et de l'Espace

Ancien Observatoire de Jolimont

1 Avenue Camille Flammarion

31500 Toulouse

tél : 33-(0)5 34 25 03 80 - fax : 33-(0)5 61 26 37 56

e-mail : a.n.a.e@wanadoo.fr - internet : http://assoc.wanadoo.fr/anae

© ANAE, 2001 - Tous droits réservés

ISBN 2-913331-17-3
ISSN 1147-3657

Dossiers déjà parus :

n° 1 **Les équipements aérospatiaux civils**, 1989

n° 2 **Recommandations sur la formation des jeunes pilotes de l'aviation civile de transport**, 1991
Recommendations on the training of young pilots in commercial aviation, *1991*

n° 3 **L'avion de transport à haute vitesse**, 1991
Future high speed air transportation system, *1991*

n° 4 **Principes de déontologie applicables aux pilotes professionnels**, 1991
Principles of Ethics applicable to professional pilots, *1991*

n° 5 **Le contrôle de la circulation aérienne**, 1992
Air Traffic Control, *1992*

n° 6 **Les apports de la conquête spatiale à l'humanité**, 1992

n° 7 **La sécurité de l'aviation légère**, 1994
Safety in light aviation, *1994*

n° 8 **Principes de déontologie applicables aux pilotes privés et aux sportifs aériens**, 1994
Principles of Ethics applicable to private and aerobatics pilots, *1994*

n° 9 **L'avenir de l'aviation de transport de fret**, 1994
The future of air freight transport*, 1994*

n° 10 **Les études et recherches dans le domaine aérospatial face à la compétition internationale**, 1995

n° 11 **Le retour d'expérience dans l'aviation civile de transport**, 1996
Feedback from experience in civil transport aviation*, 1996*

n° 12 **Évolution des industries aérospatiales**, 1998

n° 13 **Impact des avions et des lanceurs spatiaux sur l'environnement atmosphérique et le climat**, 1998
Impact of aircraft and space launchers on the atmosphere and the climate*, 1998*

n° 14 **Assistance médicale aux passagers aériens**, 1998
Medical assistance to aircraft passengers*, 1998*

n° 15 **Médias et sécurité dans le transport aérien**, 2000
Media and safety in air transport*, 2000*

n° 16 **Horizon 2020, Société humaine et activités aérospatiales**, 2000

n° 17 **La formation des ingénieurs au XXIème siècle,** 2002

n° 18 **La gestion de la circulation aérienne en Europe**, 2002
Air traffic management in Europe, 2002

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos 7
Jacques Plenier, président de l'ANAE

1 - Accueil et Introduction 9

1.1 - Accueil : Allocution de Jean-Pierre Marec, ONERA
1.2 - Introduction : Supersonique ? Allocution de Jean Calmon, ANAE

2 - Quel marché pour les avions supersoniques ? 12
Président de session : Robert Espérou, ANAE

2.1 - Les programmes militaires - Colonel Jean-Paul Paloméros, EMAA
2.2 - Le transport public - Jean-Luc Bersat, Airbus Industrie
2.3 - Le transport supersonique d'affaires - Joseph Maestrati, Dassault Aviation
2.4 - Discussion

3 - Technologies nouvelles exploitables 17
Président de session : Paul Mathé, ANAE

3.1 - La présentation des enjeux - Georges Ville, ANAE
3.2 - L'avion de transport supersonique futur - Dominique Gentili, Aerospatiale-Matra
3.3 - Les recherches et les technologies à l'ONERA - Christiane Michaut, ONERA
3.4 - Les nouveaux concepts de moteurs supersoniques - Marius Goutines, Snecma
3.5 - Discussion

4 - Contraintes d'environnement et d'exploitation 31
Président de session : Jean Carpentier, ANAE

4.1 - Le point de vue des opérateurs - Franck Debouck, Air France
4.2 - L'impact sur l'environnement atmosphérique - Richard Ramaroson, ONERA
4.2 - Le bruit et les émissions des moteurs - Marius Goutines, Snecma
4.3 - Discussion

5 - Rentabilité du projet 37
Président de session : Georges Ville, ANAE

5.1 - La rentabilité pour le constructeur - André Dubresson, ANAE
5.2 - Le point de vue de l'opérateur - Franck Debouck, Air France
5.3 - Discussion

6 - Vision des pouvoirs politiques et industriels 40
Président de session : Pierre Sparaco, ANAE et Aviation Week

6.1 - Le point de vue de l'industrie - Jean-Marc Thomas, ANAE et Aerospatiale-Matra
6.2 - Le point de vue de l'administration - Jean-Philippe Duranthon, DGAC
6.3 - Discussion

7 - Résumé de la journée et conclusions 44

7.1 - Résumé de la journée : Jacques Plenier, vice-président de l'ANAE
7.2 - Conclusions : Jean Calmon, président de l'ANAE

8 - Annexe 1 47

La reprise des vols du Concorde
Henri Perrier, ancien directeur des essais en vol de l'Aerospatiale

9 - Annexe 2 55

Quelles vitesses pour le transport aérien intercontinental : du transsonique au supersonique ? (Lettre de l'ANAE n°29).
Philippe Poisson-Quinton, ANAE et Georges Ville, ANAE

Lexique des abréviations 60

AVANT-PROPOS

Avec la participation de l'ONERA et des grandes sociétés françaises d'aéronautique, l'Académie Nationale de l'Air et de l'Espace a organisé le 6 avril 2000 une journée de réflexion sur les perspectives du transport supersonique. Au cours de cette manifestation, ont été abordés successivement le marché, les spécifications d'un éventuel programme, les problèmes à résoudre et les contraintes économiques à remplir de manière à voir quelles conclusions on pouvait en tirer. La synthèse des exposés et des discussions qui ont suivi est l'objet du présent dossier.

La parution a été retardée par l'accident du Concorde, le 25 juillet 2000 à Roissy : en effet, il a paru peu opportun de publier un papier sur ce sujet dans le climat émotionnel suivant cet événement et avant de connaître la position du Bureau Enquêtes Accident ; en outre, plusieurs membres de l'Académie chargés de la rédaction du présent dossier ont été sollicités pour s'exprimer ou participer aux travaux de l'enquête et aux actions autorisant la remise en vol de l'appareil. L'atmosphère est aujourd'hui plus sereine pour présenter les résultats de cette journée d'étude.

Il a semblé utile de compléter cette présentation par une postface d'Henri Perrier, sur la reprise des vols du Concorde : cet exposé fait un point complet sur les conséquences de l'accident et montre que les exposés et conclusions de la journée du 6 avril 2000 restent toujours d'actualité.

Jacques Plenier
Président de l'ANAE (2002)

1 - ACCUEIL ET INTRODUCTION

1.1 - Accueil

(Allocution de **Jean-Pierre Marec**, directeur scientifique général à l'ONERA)

L'organisation de cette journée d'étude de l'ANAE répondait au souci d'une part de faire un point d'avancement dix années après la tenue en novembre 1989 à Strasbourg du symposium sur l'avenir du transport supersonique et d'autre part de se poser la question : les recommandations formulées à l'époque dans le dossier ANAE n°3 restaient-elles toujours d'actualité ? Depuis, il nous faut reconnaître une évolution de la situation marquée d'un côté par un enrichissement de l'expérience opérationnelle et du savoir-faire technologique et de l'autre par l'arrêt de la plupart des études américaines engagées dans le domaine.

Aussi, avec l'objectif de préciser cette nouvelle donne, le président de l'ANAE proposa-t-il en juillet 1999 de tenir une journée d'étude sur le thème de l'avion supersonique. Le sujet était dans l'air, puisqu'en septembre de la même année le ministre de l'Éducation et de la Recherche confiait une mission de réflexion sur ce même sujet au professeur Sébastien Candel.

Le vol à Mach 2, par les défis qu'il pose, implique des axes prioritaires de recherche avec des promesses d'avancées profitables à l'ensemble des applications aéronautiques (rappelons que sans le savoir-faire acquis avec Concorde, Airbus n'aurait pu mettre en œuvre les avancées techniques à l'origine de ses succès commerciaux).

L'ONERA étant toujours à la pointe du progrès technique et depuis l'origine impliqué sur ce sujet auprès des industriels concernés, il était naturel de tenir cette journée dans ses locaux.

Dans l'établissement du programme de la journée, il a semblé intéressant d'élargir le débat, au-delà du transport public, à l'utilisation du vol supersonique dans les domaines militaires et de l'aviation d'affaires.

1.2 - Introduction : Supersonique ?

(Allocution de **Jean Calmon**, président de l'ANAE - 2000)

Concorde est entré en service en 1976. Depuis plus de 22 ans, Concorde relie quotidiennement Paris et New York ainsi que Londres et New York en 3 heures 30 minutes, avec des statistiques d'exploitation extrêmement bonnes.

Concorde est une exceptionnelle réussite technique et pourtant son utilisation est restreinte à deux lignes. Pourquoi ?

Pour des raisons écologiques, de nuisances sonores ou d'émissions polluantes parfois évoquées ? Impossible de juger aujourd'hui tant l'impact du transport supersonique est faible. Des progrès techniques considérables ont été faits depuis 1975, date de la certification : sont-ils suffisants pour accepter l'avion du futur et quelles doivent être les caractéristiques limites de cet appareil ?

- En conséquence de faits économiques ? La crise pétrolière de 1973 d'abord, le rayon d'action limitant la liaison directe à quelques lignes ensuite, ont brisé l'essor commercial pour en réduire l'usage à un petit nombre de passagers pressés et prêts à en payer le surcoût. L'avion de demain devra offrir des possibilités d'utilisation beaucoup plus variées. Quel sera le prix du siège/km ? Combien de passagers seront tentés par le gain de temps ?

- Des réponses à ces questions dépendront le type d'appareil et le nombre d'avions à produire, avec pour résultat la quote-part d'amortissements des coûts de développement dans le prix de vente. Or, les sauts technologiques à accomplir par rapport à Concorde sont tels que les montants de recherches et développements seront élevés. Comment les financer ? Quelles sont les conditions de rentabilité du programme ?

L'Académie Nationale de l'Air et de l'Espace avait organisé en novembre 1989, à Strasbourg, un symposium international sur "l'Avenir du transport aérien à haute vitesse". Les débats ont été analysés et nous en avons déduit des recommandations formulées dans le Dossier n°3 publié au début de 1991.

Dix années ont passé, les recommandations ci-dessus sont toujours aussi pertinentes, au moins qualitativement, mais les connaissances scientifiques se sont affinées, le savoir-faire technologique s'est enrichi. Enfin, la passion

des professionnels de l'Air et de l'Espace pour le vol supersonique ne s'est pas démentie. Aussi, ai-je proposé, en juillet 1999, la tenue d'une journée "Supersonique".

L'été dernier était particulièrement favorable à la reprise de ce thème puisqu'en septembre, le ministre de l'Éducation et de la Recherche confiait une mission de réflexion sur l'avenir de l'avion de transport supersonique au professeur Sébastien Candel, qui nous fait l'amitié d'être parmi nous aujourd'hui. Il est indéniable que, par les défis qu'il pose, le vol à M=2.0 déclenche des axes prioritaires de recherches, avec des promesses d'avancées profitables à l'ensemble des applications aéronautiques. Par conséquent, il était naturel de tenir la journée "Supersonique" à l'ONERA et je remercie l'ingénieur général Jean-Pierre Rabault, président directeur général de l'Office, d'avoir bien voulu nous accueillir aujourd'hui.

2 - QUEL MARCHÉ POUR LES AVIONS SUPERSONIQUES ?

(Président de session : **Robert Espérou**, ANAE)

2.1 - Les programmes militaires

(Exposé du Colonel Jean-Paul Palomeros, État-major de l'armée de l'Air, BEPG)

En s'appuyant sur un exposé historique, l'orateur a mis en lumière les apports incontournables amenés par la capacité de vol supersonique dans le domaine militaire, en particulier pour les activités de combat, de bombardement et de reconnaissance. En ce qui concerne le transport militaire, le besoin de rapidité existe mais il ne justifie pas, pour des raisons de coût - efficacité, le développement de produits propres ; en revanche, il est clair que le transport militaire serait prêt à tirer parti des évolutions civiles dans ce domaine.

Les deux derniers paragraphes de la présentation reproduits ci-dessous résument la vision de l'orateur sur l'avenir du supersonique militaire :

- Après la phase initiale euphorique des années 50 et la course aux performances, le supersonique s'est imposé dans l'aviation de combat tant pour les missions de défense aérienne que pour les missions offensives, y compris pour les bombardiers lourds : en France, le Mirage IV constitue à ce titre un succès inégalé. A l'aube du XXI^{ème} siècle, la capacité supersonique demeure essentielle dans l'emploi de l'arme aérienne, en revanche les hautes performances ne doivent pas être obtenues au détriment d'autres qualités tout aussi essentielles : l'endurance et le rayon d'action. C'est certainement dans ce sens que doivent se poursuivre les recherches sur le supersonique militaire de manière à trouver le meilleur compromis entre les possibilités techniques et les exigences opérationnelles : ceci exige un dialogue permanent entre le monde de la recherche, les états-majors et la DGA.

- Le supersonique n'a que 50 ans : que lui réserve le prochain siècle ? Il est clair que certaines superpuissances poursuivront leurs efforts en vue de se doter de vecteurs hypersoniques couvrant l'ensemble de la gamme des missions opérationnelles, telles la maîtrise de l'air (voire de l'espace), l'acquisition du renseignement et le transport à très grande vitesse. Le véritable challenge pour l'Europe sera de ne pas décrocher dans cette course technologique ; vu les enjeux techniques et financiers, une coopération étroite est indispensable : les programmes civils, à l'image du Concorde, peuvent nous montrer la voie. Il s'agit d'un véritable enjeu de puissance et d'indépendance.

2.2 - Le transport public

(Exposé de **Jean-Luc Bersat**, Airbus Industrie)

La présentation comportait trois parties précisant une position réservée d'Airbus Industrie sur le sujet :

1 - En premier lieu, le rappel des études de marché spécifiques à une exploitation supersonique permet de situer son importance relative dans l'évolution du besoin global de trafic ; la dernière étude de l'International Group, datée de 1997, prenant en compte les résultats d'une enquête d'opinion auprès des passagers, peut se résumer dans les points suivants :

- étude basée sur une sélection de 524 étapes susceptibles d'être accomplies en vol supersonique ;
- besoin total estimé à 576 avions en 2025 ;
- niveau de surcoût acceptable pour le passager de l'ordre de 30% en moyenne par rapport au vol subsonique et ceci quelle que soit la classe.

2 - D'une manière générale les études de marché à 20 ans menées par Airbus Industrie (GMF ou Global Market Forecast) n'intègrent pas dans leur projection la mise en service d'un produit supersonique ; cette position s'explique par les longs délais avant toute mise en exploitation d'un tel produit et par la faible part de marché qui lui est associée ; en revanche dans toutes ses analyses, Airbus Industrie prend en compte et privilégie la part de trafic exploitable par les très gros porteurs de la taille du projet A3XX[1].

3 - La diminution du temps de vol fait partie des progrès que l'industrie doit rechercher ; même si les obstacles actuels, techniques et environnementaux ne permettent pas d'envisager une intégration rapide du supersonique, Airbus Industrie réfléchit à long terme sur trois scénarios possibles :

- le premier, sans mise en service d'un produit supersonique, correspond au prolongement des tendances actuelles ;
- le deuxième, édifié sur la base de la mise en service d'un supersonique "opérationnellement coûteux" (comme l'a été Concorde par rapport aux avions subsoniques), conduit à un impact faible sur le marché en limitant son exploitation à quelques liaisons adaptées et aux passagers de 1ère classe ;
- le dernier, mettant en œuvre un supersonique "compétitif" pourrait entraîner une substitution progressive des subsoniques dans les missions *ad hoc* et prendre ainsi une part significative du marché.

[1] - Devenu l'A380

2.3 - Le transport supersonique d'affaires

(Exposé de **Joseph Maestrati**, Dassault Aviation)

La présentation, couvrant à la fois l'étude du besoin et la proposition du produit, comportait les parties suivantes :

***1* - L'idée-force de Dassault Aviation** est de proposer aux utilisateurs actuels d'avions d'affaires ainsi qu'à ceux clients de Concorde une nouvelle génération d'avions d'affaires supersoniques (Super Sonic Business Jet ou SSBJ) ; ce projet répond à la fois à la flexibilité de l'avion personnel et à la réduction recherchée de la durée (et de la fatigue) des voyages. La mission retenue correspond à un Mach de croisière de 1,8 et un rayon d'action de 4000 NM permettant de couvrir le vol transatlantique en 4 heures non-stop et le vol transpacifique en 8 heures y compris une escale pour ravitaillement ; ces performances sont à comparer aux projets actuels de Gulfstream et de Bombardier visant Mach 0,8 et 6500 NM de rayon d'action (un peu court pour le transpacifique) et conduisant à des durées de vol éprouvantes entre 12 et 14 heures, du même ordre que celles rencontrées avec les avions de transport subsoniques de la nouvelle génération.

***2* -** C'est pourquoi Dassault regarde, depuis 1997, **la faisabilité d'un tel projet supersonique**, en bénéficiant de sa double expérience :

- du supersonique dans le domaine militaire, en particulier avec le Mirage IV opérationnel depuis les années 60 sur de longues étapes à Mach 2 environ ;

- des avions d'affaires avec la famille des avions haut de gamme Falcon, produits en grande série et vendus internationalement.

***3* -** Les **caractéristiques du projet étudié** correspondent à un compromis entre les performances recherchées et les contraintes technologiques :

- dans les paramètres de mission, le choix important de la vitesse de croisière s'est porté sur Mach 1,8, c'est-à-dire le double des avions actuels tout en limitant l'échauffement cinétique à des températures inférieures à 90°C compatibles avec les alliages d'aluminium et les composites commercialisés ; le rayon d'action a été fixé à 4000 NM et la capacité à 8 passagers (plus 2 pilotes et 1 hôtesse) ;

- la configuration aérodynamique est voisine de celle des projets SST deuxième génération (Europe, USA, Japon) avec une aile élancée en double delta équipée de volets de bord d'attaque et de bord de fuite et plan canard : cette configuration permet des conditions d'atterrissage (vitesse 145 nœuds et 14° d'incidence sans nez basculant mais avec une visualisation de piste) satisfaisantes compatibles avec les aérodromes "avions d'affaires" ;

- un autre choix important concernait la propulsion : d'un coté, la solution adoptée du triréacteur permet à la fois de mieux satisfaire la réglementation de sécurité en cas de panne d'un réacteur (décollage et ETOPS) et de réduire la traînée de culot (le troisième réacteur prolongeant le fuselage à l'arrière) ; de l'autre, le concept envisagé du réacteur à cycle variable autorise une bonne adaptation en vol supersonique (faible taux de dilution) et la transformation en réacteur à "mélangeur-éjecteur" aux basses vitesses de manière à ramener la vitesse des jets de 600 à 360 m/s compatibles avec les limitations de bruit imposées près des aéroports : malheureusement un tel moteur n'existe pas actuellement et, dans une première phase de démonstration de faisabilité à moindre coût, il faudrait partir du corps chaud d'un réacteur existant (réacteur militaire comme le Snecma M88 du Rafale ou le GE F414 du F18, ou turbofan civil) et le transformer en cycle variable ;

- la taille de l'avion répondant à la mission correspond à une masse au décollage de 39 tonnes ; les principales caractéristiques du projet sont rappelées dans le tableau présenté au § 3.1 ci-après.

***4* - Au plan de l'environnement,** les nuisances seront notablement réduites : l'utilisation de nouveaux moteurs avec des chambres de combustion plus efficaces limiteront les émissions polluantes ; d'un autre coté, le problème du bang sonique, interdisant à Concorde le survol des terres habitées, pourra ne pas se poser pour ce projet : en effet dans le cas du SSBJ, l'intensité du bang liée à la masse de l'avion sera réduite de plus de la moitié par rapport à celle rencontrée avec Concorde.

***5* -** En conclusion, **la viabilité d'un projet d'avion d'affaires supersonique semble crédible** même s'il subsiste encore un certain nombre de points à approfondir et à confirmer :

- le choix du Mach de croisière à 1,8 est raisonnable : il permet de réduire considérablement la durée de vol des missions transocéaniques sans pour autant rencontrer les phénomènes préjudiciables d'échauffement

cinétiques de la structure ;

- le survol des territoires habités à Mach 1,8 et à une altitude de 60000 pieds devrait être possible en raison d'un bang sonique minimisé par la faible masse de l'avion ;

- les technologies disponibles à court terme devraient conduire aux rendements aérodynamiques et structuraux nécessaires ainsi que permettre la mise au point de systèmes de contrôle actifs fiables ;

- le point dur est le développement d'un moteur nouveau à cycle variable pour satisfaire aux limitations de bruit, pour atteindre des rendements acceptables en vol subsonique et pour permettre la délicate intégration avec la cellule nécessaire pour les bons rendements aérodynamiques à Mach 1,8 et 0,8.

2.4 - Discussion

(Interventions de Jean Delacarte, François Maurin, André Turcat, Jean-Pierre Marec, Jean Carpentier, Yves Michot, Serge Boudigues, Jacques Plenier)

A l'occasion de la discussion, quatre points ont été abordés :

1 **-** L'impact de la durée de vol sur l'aménagement du temps compte tenu des décalages horaires et les cycles de sommeil (cf. le contraste des utilisations de Concorde sur Paris / New York entre l'aller et le retour) ;

2 **-** La taille du produit : ne devrait-on pas aborder le transport supersonique par le bas avec un avion de 50 sièges au lieu du projet actuel de 250 sièges ?

3 **-** Les gains de consommation des moteurs en croisière supersonique : compte tenu des lois de la thermodynamique, il faudrait s'attendre au mieux à une amélioration de l'ordre de 5% par rapport à l'Olympus de Concorde.

4 **-** Comme cela avait déjà été mentionné à Strasbourg, la plage étroite d'optimisation d'un avion supersonique ne permettra pas la déclinaison habituelle de la famille d'avions comme cela se pratique pour les avions subsoniques (par exemple les dérivés A321, A319 et A318 de l'avion premier-né A320).

3 - TECHNOLOGIES NOUVELLES EXPLOITABLES

(Président de session : **Paul Mathé**, ANAE)

Avant de présenter les exposés et descriptions techniques, il a semblé utile pour la compréhension de rappeler les caractéristiques principales des produits qui seront évoqués dans les exposés :

	Concorde	ESCT Alliance	SSBJ Dassault
1 - Mission			
- rayon d'action (km)	6300	10000	7400
- capacité (sièges)	100	250	8
- Mach de croisière	2,05	2,05	1,8
2 - Avion			
- S Aile (m^2)	358	760	130
- b envergure (m)	25,6	42	16,95
- L fuselage (m)	61,7	89	32,6
3 - Masses (tonnes)			
- OWE*	75	135	16,9
- charge utile	10	25	1,4
- carburant	100	180	20,7
- décollage	185	340	39,0
4 - Performances			
- conso. (kg/siège/km)	0,10	0,05	
- OWE (kg/siège)	750	540	
- finesse supersonique	7,3	9,5	
- finesse subersonique	11,5	16,1	

*OWE : Operation Weight Empty

3.1 - La présentation des enjeux

(Exposé de **Georges Ville**, ANAE)

L'aptitude supersonique conduit à un surcoût technique élevé : par rapport à un produit subsonique de la même génération et de rayon d'action proche, tel le DC10-10, la consommation kilométrique par siège de Concorde est 4 fois plus élevée ; ce facteur 4 se retrouve en composant les détériorations des deux caractéristiques d'efficacité technique du produit :

- une masse à vide équipée par siège multipliée par 2 ;
- un facteur de rayon d'action de Breguet-Leduc (intégrant finesse aérodynamique et consommation des réacteurs) divisé par 2.

Ce surcoût technique pour Concorde a rendu, ô combien difficile, l'équilibre du devis de masse et a limité les capacités opérationnelles de rayon d'action à 6300 km, soit Paris / New York.

Aujourd'hui, l'avant-projet ESCT (European Supersonic Civil Transport) présenté par les industriels européens a été étudié pour remplir une mission plus conforme aux besoins des utilisateurs : capacité de 250 sièges et rayon d'action de 10000 km. Les caractéristiques de l'ESCT sont rappelées en comparaison avec celles de Concorde et du SSBJ de Dassault, dans le tableau présenté en introduction du présent chapitre.

L'ambition technique d'un tel projet peut se mesurer au niveau **des gains technologiques nécessaires par rapport au savoir-faire Concorde** pour les deux caractéristiques d'efficacité technique du produit :

- diminution de 40% de la masse à vide par siège,
- amélioration de 40% du facteur de rayon d'action.

Ces objectifs fixent les enjeux techniques : les exposés qui vont suivre permettront de situer leur réalisme. Si tel est le cas, l'avion sera capable de réaliser la mission attendue ; toutefois, même si la consommation kilométrique par siège est réduite de moitié par rapport au Concorde actuel, elle demeurera encore 3 fois plus élevée que celle des avions subsoniques actuels, eux aussi en permanente amélioration.

3.2 - L'avion de transport supersonique futur

(Exposé de **Dominique Gentili**, Aerospatiale-Matra)

1 - La raison principale du regain d'intérêt pour un transport supersonique résulte de l'évolution future du marché en prolongement des tendances actuelles :

- une croissance rapide du trafic long-courrier (routes supérieures à 5000 km) passant de 2% du trafic total en 1973 à une prévision de 30% en 2005, et dont 40% proviennent de l'explosion des liaisons transpacifiques ;
- la durée de ces vols, dépassant souvent 12 heures sur les avions subsoniques, est mal supportée par les voyageurs réguliers et pressés représentant la clientèle affaires ; ces derniers constituent les premiers demandeurs d'un transport supersonique réduisant de moitié la durée du voyage, à condition de ne pas dépasser un surcoût de 20% pour le prix du billet en subsonique ;
- les études de marché des principaux avionneurs conduisent pour les 25 prochaines années à une production comprise entre 500 et 1000 avions de la classe "Mach 2 - 250 sièges".

2 - Les perspectives techniques d'une **deuxième génération de transport supersonique** se sont concrétisées dans une configuration de base appelée ESCT (European Supersonic Civil Transport) et dont les caractéristiques ont été rappelées dans le tableau présenté ci-dessus en introduction du chapitre 3. Les principales options retenues dans ce projet sont les suivantes :

- On notera que le choix d'un nombre de Mach de 2,05 voisin de celui de Concorde permet une productivité suffisante sans augmentation des problèmes structuraux liés à l'échauffement cinétique ; la température de peau de 100° C reste supportable pour l'emploi d'alliages légers et assure surtout une longue durée de vie aux composites utilisables pour des parties de la voilure, de la dérive et du fuselage ; avec le caisson central de voilure en alliage de titane, l'ensemble de ces choix conduirait à un rendement structural très supérieur à celui de Concorde.

- Un bon rendement aérodynamique à tous les régimes de vol est essentiel pour réduire sensiblement la traînée par rapport à Concorde, en supersonique, mais aussi en transsonique (vol au-dessus des terres habitées), en subsonique au cours des phases de montée, descente ou

déroutement et aux basses vitesses grâce à une hypersustentation efficace lors du décollage et de l'atterrissage avec une répercussion directe sur la réduction de bruit autour des aéroports. Le niveau actuel des programmes de calcul sur les superordinateurs et des méthodes d'essais en soufflerie permettent d'optimiser remarquablement les performances aérodynamiques qui intéressent directement le facteur de rayon d'action (finesse aérodynamique / vitesse / consommation spécifique).

- Le point dur d'un tel projet reste la propulsion sous ses deux aspects essentiels, un bon rendement de propulsion dans tous les régimes de vol et une minimisation du bruit autour des aéroports, et ceci sans oublier les risques d'émissions polluantes. Or, l'étude d'un tel moteur est actuellement au stade des analyses préliminaires ; deux concepts différents sont aujourd'hui envisagés :

    - en Europe les études de la Snecma et de Rolls-Royce sont basées sur un réacteur de base à faible dilution pour le vol supersonique et sur la mise en route en vol subsonique d'une soufflante secondaire permettant un fonctionnement en turbofan ; cette configuration nécessite des entrées d'air auxiliaires et conduit de ce fait à un grand maître couple ;
    - aux USA les études sont menées par Pratt & Whitney et General Electric autour d'un réacteur à faible taux de dilution équipé d'une importante tuyère assurant le mélange des gaz éjectés avec l'air capté en arrière des turbines.

- Les deux concepts posent des problèmes d'intégration à l'aile plus difficiles que sur Concorde en raison du plus grand maître couple du moteur. Dans tous les cas les 4 propulseurs sont séparés sous l'intrados de la voilure pour minimiser les risques en cas de rupture de turbine. Les entrées d'air profiteront directement de l'excellente conception de celles de Concorde, mais il faudra probablement y ajouter un traitement acoustique comme sur la tuyère pour réduire le bruit en phases de décollage et d'approche.

- De même que les systèmes de contrôle automatique développés pour Concorde ont aidé au développement de ceux de la famille Airbus, les plus récents systèmes de contrôle actif généralisé mis au point pour les derniers Airbus faciliteront considérablement la définition des systèmes du futur supersonique. Au-delà, les recherches portent sur :

- le concept "plus électrique" avec suppression de l'hydraulique,
- les transmissions optiques dans les commandes électriques,
- la gestion du vol adaptée à l'environnement opérationnel futur.

3 - Une **importante coopération internationale** sera nécessaire sur ce projet ambitieux pour :

- partager des coûts de développement et des risques nettement supérieurs à ceux rencontrés avec les programmes subsoniques en particulier pour la mise au point des propulseurs ;
- pénétrer le marché mondial ;
- collaborer avec les autorités officielles des pays concernés pour traiter des questions de réglementation et de certification.

Toutes les démarches entreprises dans ce contexte sont décrites ci-après au §6.1 exposant la vision des pouvoirs industriels. Rappelons ici que dès 1992 sur la base d'un même cahier des charges, des travaux menés par Aerospatiale et British Aerospace, bientôt rejoints par Deutsche Airbus ont conduit d'abord à un plan de recherche commun nommé PERS (Programme Européen de Recherche Supersonique) et ultérieurement au projet ESCT Alliance présenté ci-dessus.

4 - **En conclusion** de l'exposé, tout semble montrer aujourd'hui que le successeur de Concorde volera en croisière à Mach 2 comme ce dernier mais avec des performances largement accrues aux plans technique, opérationnel et économique. Dans le cheminement vers cet objectif, trois impératifs apparaissent fondamentaux :

- l'évolution du marché, si elle se poursuit au rythme actuel, justifiera l'entrée en service d'un avion de transport supersonique d'ici une quinzaine d'années,
- les technologies nécessaires à la réalisation d'un tel avion long-courrier ne semblent pas inaccessibles mais demandent un effort de recherche accru et programmé sur le long terme,
- un effort important est à fournir pour respecter les contraintes liées à l'environnement ; à ce sujet, une réglementation traitant des problèmes de bang et de pollution de l'atmosphère doit être élaborée et mise en place sur le plan international.

3.3 - Les recherches et les technologies à l'ONERA

(Exposé de **Christiane Michaut**, ONERA)

Depuis le début des années 1990 avec le soutien des services officiels DPAC et SPAé, l'ONERA s'est impliqué dans les recherches sur l'avion de transport supersonique futur, en étroite collaboration avec les industriels Aerospatiale et Snecma.

Ces recherches sont basées sur les avant-projets définis par les industriels :

- un avion capable de transporter 250 passagers sur 10000 km à Mach 2,05, tout en assurant respect de l'environnement et rentabilité économique ;
- des concepts de propulsion, MTF (Mid Tandem Fan) et MEM (Moteur à Ejection Mélangeur) visant à répondre aux spécifications de la mission et notamment à la réduction du bruit.

L'ONERA apporte, dans les domaines rappelés ci-dessous, ses compétences au développement des technologies, des outils de calcul et des méthodes ainsi que ses moyens d'essais :

- l'aérodynamique,
- les structures,
- les matériaux,
- les systèmes,
- l'environnement (bruit, bang sonique, émissions, impact sur la stratosphère).

1 - Dans le domaine de **l'aérodynamique**, il est impératif de réduire les composantes de la traînée pour obtenir la plus grande finesse dans trois régimes de vol :

- en croisière supersonique à Mach 2,05,
- en croisière transsonique à Mach 0,95 lors des survols des territoires habités et pour les éventuels déroutements,
- aux basses vitesses aux alentours de Mach 0,25 de manière à minimiser la poussée nécessaire et ainsi réduire le bruit au décollage et à l'atterrissage ; de plus, pour limiter la vitesse au cours de ces phases de vol, il sera nécessaire de prévoir une certaine hypersustentation, rendue possible par un contrôle actif de l'instabilité longitudinale et le montage d'un plan canard.

Sous tous ces aspects, l'ONERA a poursuivi activement ses travaux et a perfectionné ses outils de recherche en liaison directe avec les constructeurs et les services officiels :

- depuis la conception de Concorde, les moyens de calculs aérodynamiques ont fait des progrès considérables grâce à l'équipement de l'ONERA en superordinateurs et au développement de codes de calculs de plus en plus précis et rapides : ceci autorise une optimisation beaucoup plus fine de la géométrie externe de l'aile et de ses interactions ;
- les résultats de ces calculs sont confrontés aux mesures effectuées sur maquettes dans les nombreuses souffleries de l'ONERA sans cesse modernisées (rappelons que dans les années 1960 les crédits Concorde ont permis de rénover complètement le parc des grandes souffleries très utilisées ultérieurement pour la mise au point des Airbus et des Mirage) ;

Pour réduire la traînée de frottement, deux nouvelles approches font l'objet de travaux de recherche et de validation :

- la première consiste à coller sur les surfaces en contact avec l'air une fine feuille plastique (dénommée peau de requin) striée de microsillons parallèles à l'écoulement ce qui permet d'amortir les structures turbulentes de la couche limite ; des essais de base en soufflerie et des expériences en vraie grandeur sur des Airbus ont montré que le frottement turbulent pouvait être réduit de 6 à 7% soit 1 à 2% de la traînée totale de l'avion ;
- la seconde a pour objectif de maintenir la couche limite laminaire sur la plus grande surface possible de l'aile grâce à une aspiration de la couche limite à travers un revêtement microporeux placé au voisinage du bord d'attaque ; les recherches se poursuivent en soufflerie pour démontrer la validité du concept, traiter les problèmes d'installation dans une voilure mince et limiter les interactions à la jonction voilure fuselage.

La conception et l'optimisation des prises d'air aux différents régimes de vol, avec pour objectifs le meilleur rendement de la propulsion et la traînée d'interaction la plus faible, conduisent, comme pour Concorde, aux conditions d'adaptation les plus pointues ; dès 1994, Aerospatiale a cherché (avec succès) à valider les prises d'air auxiliaires du concept de propulsion MTF ainsi que les nouvelles méthodes de calcul associées par des essais en soufflerie à S2 Modane d'une maquette d'entrée d'air bidimensionnelle.

2 - Dans le domaine des **structures**, le futur avion sera conçu avec une structure mince très souple exigeant une parfaite maîtrise des phénomènes "d'aéro-servo-élasticité" : de grands progrès ont été réalisés depuis Concorde grâce au développement des méthodes de calcul aéroélastiques bouclés avec les simulations numériques d'aérodynamique instationnaire ; ces méthodes ont été validées par des essais à la soufflerie S2 Modane de maquettes aéroélastiquement représentatives et comportant les systèmes de gouvernes.

3 - Dans le choix des **matériaux**, l'objectif principal du constructeur est de réduire au minimum la masse structurale mais il faut prendre en compte aussi les implications de la mission du futur supersonique : durée de vie de l'ordre de 100000 heures de vol (dont 80000 en supersonique, soit 4 fois plus que Concorde) et un rayon d'action de 10000 km conduisant à une croisière supersonique plus longue et à plus d'échauffement cinétique. (températures allant jusqu'à 120° C pour la cellule et à plus de 1200° C pour le moteur). Les axes de recherche concernent :

- en premier lieu les matériaux légers parmi lesquels les composites à matrice organique semblent être la voie privilégiée ; la prise en compte des aspects mécaniques, thermiques et physico-chimiques (vieillissement) ainsi que leur couplage sont nécessaires : des modélisations sont en cours mais il reste encore du chemin à parcourir avant de pouvoir estimer la durée de vie et les performances résiduelles des structures en composites ;
- pour la structure du fuselage, de nouvelles nuances d'alliages d'aluminium en s'attachant particulièrement à leur comportement au fluage afin de valider des modèles prédictifs d'extrapolation des déformations et endommagements résultant de la longue durée de vie ;
- pour les moteurs, des matériaux déterminés aussi par la résistance au fluage compte tenu du grand nombre de cycles en contrainte et en température : l'objectif d'une étude actuelle est d'améliorer les propriétés en fluage d'un superalliage élaboré par métallurgie des poudres pour les disques de turbomachine.

4 - En prolongement des **coopérations** entre industriels et services officiels et dans le cadre du groupe explorateur coordonné par l'ONERA pour le compte de l'association des EREA, il a été possible de sélectionner des termes de coopération en matière de recherche sous la forme des projets Eurosup (1996-99) et Epistle (2000-03) couvrant des sujets en aérodynamique, aéroélasticité, bang sonique, impact sur l'environnement et matériaux.

3.4 - Les nouveaux concepts de moteurs supersoniques

(Exposé de **Marius Goutines**, Snecma)

1 - Les **critères de viabilité et d'acceptabilité** d'une motorisation performante adaptée au futur avion de transport supersonique sont au nombre de cinq :

- le critère 1, relatif à l'obtention de hautes performances thermopropulsives du moteur et de sa nacelle en vol supersonique au voisinage de Mach 2 et en vol transsonique à Mach 0,95, est lié à l'extrême sensibilité du projet à la performance de consommation spécifique Cs du moteur : pour le projet ESCT, une dégradation de 1% de Cs se traduit par une augmentation de 5 tonnes de la masse au décollage soit +1,5% et conduit à une détérioration de +0,5% des coûts d'exploitation (détérioration répartie également entre consommation et coût d'acquisition). Cette sensibilité (beaucoup plus élevée que pour les avions subsoniques) conduit à se fixer des objectifs ambitieux de réduction de la consommation Cs à un niveau de l'ordre de -15 à -20% par rapport à celle du moteur de Concorde : soit à Mach 2, un objectif de consommation Cs<1,04 kg/daN/h.

- le critère 2 fixe l'objectif "Stade III - 18 EPNdB" pour le niveau de bruit cumulé aux trois points de mesure (- 3 dB en latéral, - 6 dB en approche, - 9 dB en survol) : cette exigence est l'extrapolation en 2015 des conditions actuelles de certification ; par rapport à Concorde, ceci correspond à un progrès d'environ 18 dB par point de mesure ce qui est énorme.

- Le critère 3 concerne la durée de vie très élevée requise pour ce moteur en vue de réduire les coûts d'exploitation relatifs à la maintenance des moteurs (10% pour le supersonique en l'absence de progrès, à comparer aux 4% observés pour un subsonique) ; cette exigence est difficilement compatible avec le critère 1 exigeant des températures élevées pouvant entraîner lors d'une longue croisière (4 heures) des phénomènes de fluage au niveau des rotors : pour atteindre l'objectif de 5 ans sans dépose de moteur, les composants des rotors devront démontrer un fluage modéré au bout de 15000 heures de sollicitations thermiques.

- Le critère 4 conduit à ramener les émissions d'oxyde d'azote NOx au-dessous de 5g par kg de combustible consommé en vol supersonique.

- Le critère 5 d'allègement du moteur est commun à l'ensemble du projet : l'objectif retenu correspond à un rapport poussée sur poids augmenté de 50% par rapport à l'Olympus.

Les critères 1 et 2 ne peuvent être satisfaits qu'au niveau des concepts et de l'architecture du moteur complet ; les critères 3 et 4 feront appel à des technologies nouvelles liés à des composants ; la satisfaction du critère 5 doit être présente à tous les stades de la réflexion.

2 - La **satisfaction des critères 1, 2 et 5** correspond à des exigences contradictoires :

- les critères 1 et 5, appliqués à la croisière supersonique, conduisent à un concept de moteur à faible taux de dilution (<1) ;
- le critère 2 nécessite une faible vitesse des gaz éjectés et par voie de conséquence un fort taux de dilution (>3).

La résolution de cette contradiction est l'écueil majeur des programmes supersoniques : dans ce but, deux architectures de moteur dites à "cycle variable" sont aujourd'hui proposées mais il subsiste encore de grosses difficultés technologiques à lever avant toute validation.

La première architecture, préférée des motoristes européens, correspond au concept dit MTF (Mid Tandem Fan) . Il s'agit d'un moteur double-corps, double- flux dont l'originalité est une soufflante disposée entre les compresseurs BP et HP : une telle configuration permet de limiter l'impact sur le diamètre et donne la possibilité d'installer une grille d'entrée d'air à calage variable d'ajustement du débit de la soufflante ; le principe de fonctionnement est le suivant : en croisière la grille est fermée pour limiter le débit du deuxième flux, alors que pour augmenter ce dernier au décollage les entrées d'air auxiliaires sont ouvertes au maximum ; ce concept permet une variation du taux de dilution de 1,9 à 2,3.

Cette solution présente des difficultés techniques importantes :

- stabilité de fonctionnement et de performances de ce fan soumis successivement à des pressions et débits variables ;
- bruit rayonné par la soufflante à travers la prise d'air ;
- complexité technologique et maîtrise des masses.

La deuxième architecture, étudiée par les motoristes américains, correspond au concept dit MEM (Moteur à Éjecteur Mélangeur). Il s'agit d'un moteur conventionnel double-corps, double-flux suivi d'un éjecteur - mélangeur en fonctionnement dans les phases de vol à faible vitesse pour augmenter le débit de sortie par effet "trompe à induction" ; ce concept permet une variation du taux de dilution de 0,9 à 2,1.

Les difficultés technologiques sont également nombreuses :

- performances aérodynamiques et acoustiques recherchées reposant sur une maîtrise encore plus fine des phénomènes et sur des systèmes d'absorption sonore à hautes performances ;
- complexité cinématique, encombrement et masse de l'éjecteur - mélangeur .

Bien que cette démarche n'ait pas eu beaucoup de succès à ce jour, il faut poursuivre les recherches d'autres concepts de moteur conciliant les critères 1, 2 et 5.

3 **-** Pour valider les concepts présentés ci-dessus, des **progrès technologiques** sont nécessaires dans de nombreux domaines :

- au niveau du cycle thermodynamique, les efforts devront porter sur l'augmentation des températures critiques :

    - de sortie du compresseur HP à un niveau de 950 à 1000° K pour améliorer le rendement, soit une augmentation de 100 à 150° par rapport à l'Olympus installé sur Concorde,
    - à l'entrée de la turbine à un niveau de 1720 à 1900° K pour réduire les masses, soit une augmentation de 300° ;

- les méthodes de calculs aérothermodynamiques devront être cohérentes avec le niveau des enjeux à atteindre :

    - hauts rendements et forte charge aérodynamique,
    - circuits de refroidissement des parties chaudes à haute efficacité,
    - utilisation de codes de niveau Navier-Stokes 3D et dotés de modèles de turbulence,
    - maîtrise des limites de décrochage et d'instabilité aéroélastique.

- les technologies autour de la nacelle devront aussi être approfondies dans l'optimisation du moteur installé compte tenu :

    - de la très grande sensibilité aux performances et à la traînée de la tuyère (1% de baisse de rendement de la tuyère entraîne une perte de poussée de 3% à Mach 2) et de l'excellent concept de la tuyère TRA du Concorde ;

    - de l'impact des pertes de pression d'arrêt des prises d'air principales et auxiliaires (captation et/ou d'écopage selon le concept retenu).

- la maîtrise des technologies de réduction de bruit est capital pour l'acceptabilité du projet et fera appel à des innovations technologiques et à de notables progrès dans les méthodes de prévisions numériques en mécanique des fluides ; de telles approches seront nécessaires, en amont pour minimiser les bruits propagés par les prises d'air principales et auxiliaires, et en aval pour définir des absorbeurs de bruit résistant aux températures très élevées.

- Les technologies et les nouveaux matériaux contribueront à l'optimisation des masses et à la réduction des coûts de maintenance grâce à des durées de vie élevées ; ces matériaux devront être validés pour des conditions sévères de fluage en croisière :

    - alliages à base de Ni, composites à matrice métallique pour les compresseurs et les turbines ;
    - monocristaux de nouvelle génération pour les aubes de turbines ;
    - composites à matrice céramique et fibre de carbone pour les chambres de combustion et les volets de tuyère ;
    - alliages intermétalliques pour les structures froides.

- La maîtrise des émissions de gaz polluants et les objectifs de réduction de l'émission des NOx en croisière impliqueront le développement de méthodes numériques d'aérothermochimie et influeront sur l'architecture de la chambre de combustion et des systèmes d'injection du carburant.

- Les nouveaux concepts de systèmes moteur - avion participeront à l'atteinte du niveau de performances grâce à la mise en place en particulier :

- de systèmes de contrôle actif du pompage des compresseurs,
- de systèmes de gestion "tout électrique".

3.5 - Discussion

(interventions de Pierre Lecomte, Dominique Gentili, Marius Goutines, Jean Pierre Marec, Georges Ville, André Turcat, Yves Michot, Christiane Michaut, Robert Espérou)

Les questions et les réponses apportées ont été regroupées autour de plusieurs thèmes :

1 - Le choix du Mach de croisière à 2,05 est-il le meilleur compromis et ne serait-il pas préférable de voler à Mach 1,9 ?

Effectivement, une réduction du Mach permettrait de réduire les conséquences de l'échauffement cinétique sur le choix des matériaux et de faciliter les problèmes de bruit attachés au moteur. Pour ces raisons, Dassault a retenu un Mach de 1,8 pour son projet d'avion d'affaires. Pour le projet d'avion de transport, des analyses ont été menées jusqu'à Mach 1,6 au plan technique ; il reste cependant à examiner les conséquences d'une telle réduction au niveau du marché. Cette question du choix du Mach de croisière reste encore ouverte.

2 - A propos de la réduction du bruit, les expérimentations effectuées sur Concorde ont montré qu'elles doivent être faites à poussée constante et qu'il faut rester prudent dans l'interprétation des mesures relatives aux systèmes antibruit.

3 - Comment peut-on situer les niveaux actuel et espéré des améliorations technologiques par rapport aux enjeux fixés dans l'exposé de Georges Ville ?

Même si ce point n'a pas été traité spécifiquement dans les exposés qui ont suivi, il apparaît à la lecture de ces derniers que la situation attendue des améliorations par rapport à Concorde est compatible avec les enjeux ; le tableau ci-contre reprenant les chiffres annoncés dans l'exposé de Dominique Gentili le montre clairement :

Améliorations par rapport à Concorde	Enjeux (exposé G.V.)	Déjà acquis (exposé D.G.)	Objectifs (exposé D.G.)
OWE par siège	**- 40 %**	**- 30 %**	**- 40 %**
Facteur de rayon d'action résultant des gains de :	**+ 40 %**	**+ 35 %**	**+ 45 %**
- finesse supersonique		+ 25 %	+ 35 %
- finesse subsonique		+ 30 %	+ 40 %
- traînée d'installation		- 20 %	-¨30 %
- Cs supersonique		- 7 %	- 10 %
- Cs subsonique		- 15 %	-20 %

4 - En matière de financement des travaux de recherche et d'avant-projet, les efforts nationaux sont restés modestes : de l'ordre de 30 MF par an au cours des dix dernières années, dont une bonne moitié assurée en autofinancement industriel. Du côté des Etats-Unis, les moyens accordés n'étaient pas du même ordre de grandeur : depuis 1990, la NASA a pu financer sur la base d'un montant global de 2000 M$ les travaux du programme HSRT effectués par ses propres moyens ainsi que ceux entrepris par les constructeurs américains ; ceci leur a permis d'acquérir des connaissances technologiques que nous n'avons pu approfondir faute de couverture financière. Il ne faut pas oublier, non plus, l'importance des retombées dans le domaine des avions subsoniques.

4 - CONTRAINTES D'ENVIRONNEMENT ET D'EXPLOITATION

(Président de session : **Jean Carpentier**, ANAE)

4.1 - Le point de vue des opérateurs

(Exposé de **Franck Debouck**, Air France)

Sur la ligne Paris / New York, la clientèle de Concorde est, à plus de 70%, constituée par les hommes (et femmes) d'affaires dont le choix est motivé par le gain de temps et la diminution de fatigue sur une journée de travail. Du fait du décalage horaire, le vol Paris / New York à Mach 2 (3h30 de vol) est très pratique. En sens inverse, c'est moins évident, mais certains horaires permettent le retour, dans la journée, depuis Manhattan jusqu'aux principales capitales d'Europe de l'Ouest, après correspondance à Roissy, en fin d'après-midi. Donc le gain de temps par rapport au transport subsonique (durée de vol diminuée de moitié) est très appréciable sur la ligne Paris / New York. La faible durée de vol rend acceptable le confort assez spartiate offert au passager. En outre la place disponible pour les bagages, en cabine et en soute, est assez limitée.

Le respect de l'environnement pose des contraintes d'exploitation :

- le bang interdit le vol en supersonique au-dessus des zones habitées : sur Paris / New York, il faut attendre de survoler Le Havre pour passer en supersonique ;

- le bruit au décollage et en montée serait un sérieux handicap pour une flotte importante de Concorde ;

- les émissions d'effluents dans l'atmosphère sont à examiner avec attention (voir l'exposé ci-après) ;

- l'effet du rayonnement cosmique est aussi à prendre en considération (notamment pour les équipages) : la dose reçue est multipliée par 2 quand l'altitude de vol est accrue de 1500 mètres ;

- au sol, les réservoirs de Concorde (qui se dilatent en vol, du fait de la température de peau qui est portée à 120-127°C) fuient, d'où une taxe à la pollution d'aéroport à payer à New York.

4.2 - L'impact sur l'environnement atmosphérique

(Exposé de **Richard Ramaroson**, ONERA)

1 - Les **effluents majoritaires sont le gaz carbonique et la vapeur d'eau**, qui sont émis en quantités proportionnelles à la consommation de carburant.

Le gaz carbonique est rapidement réparti de façon homogène dans l'atmosphère. Sa concentration ne varie pas sensiblement avec l'altitude. Cependant, un effet in situ peut avoir lieu, d'une façon temporaire, à haute altitude : il consisterait en un refroidissement de la zone atmosphérique traversée, du fait de l'émission propre du gaz carbonique en infrarouge, ce refroidissement pourrait accroître la formation et la durée des nuages stratosphériques polaires lors des vols d'avions supersoniques aux latitudes très élevées et en conditions hivernales.

D'autre part, la vapeur d'eau peut, en se condensant, faciliter les réactions de chimie hétérogène à la surface des nuages stratosphériques polaires, réactions résultant des effluents minoritaires, tels que sulfates et suie (voir ci-dessous). Aux altitudes de vol des supersoniques, la stratosphère est suffisamment sèche (humidité relative de quelques %) pour que les traînées de condensation ne se forment pas. Toutefois, dans le cas de vol à travers le vortex polaire, la température peut être suffisamment basse pour que des traînées de condensation soient observées (cf. : expérience Zèbre suscitée par le comité "avion - ozone" en 1995). Ces traînées, formées de cristaux de glace, peuvent jouer un rôle équivalent à celui des nuages stratosphériques polaires et favoriser, à leur surface, des réactions de chimie hétérogène aboutissant à une réduction de la concentration en ozone.

Ainsi, les effluents majoritaires peuvent avoir deux types de conséquences :

- les conséquences directes liées aux effets radiatifs du gaz carbonique et de la vapeur d'eau apportant une contribution à l'effet de serre proportionnelle à la consommation de carburant : le rapport IPCC (groupe de travail intergouvernemental sur le changement climatique créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale et par les Nations-Unies) admet qu'une flotte supersonique aurait un effet radiatif 5 fois plus grand que celui de la flotte qu'elle remplacerait (en passagers/kilomètres) ;

- les conséquences indirectes dues au renforcement de l'impact des effluents minoritaires dans l'effet des réactions de chimie hétérogènes. (voir ci-dessous).

2 - Les **effluents minoritaires** sont :

- d'une part, l'oxyde de carbone, le carbone (suie) et les hydrocarbures imbrûlés qui sont tous en très faible quantité du fait de l'excellent rendement de combustion en vol de croisière ; cependant les mesures effectuées par un avion de recherche ER2 de la NASA, dans le sillage d'un Concorde d'Air France ont mis en évidence la présence d'aérosols submicroniques ; la présence de ces aérosols accroît la surface disponible pour les réactions de chimie hétérogène;

- le dioxyde de soufre dont l'indice d'émission dépend de la teneur en soufre du carburant ;

- les oxydes d'azote formés à partir de l'azote et de l'oxygène de l'air portés à haute température dans les chambres de combustion.

A l'époque du lancement de Concorde (depuis le premier vol en 1969 jusqu'à la mise en service en 1976), c'est l'effet direct des oxydes d'azote sur l'ozone stratosphérique qui était incriminé. Les travaux du COVOS (Comité d'études des conséquences des vols stratosphériques), présidé par le professeur Edmond Brun et animé par notre regretté confrère Marcel Barrère, montrèrent, en 1976, que cet effet resterait négligeable. Par contre, le COVOS soulignait que l'action de composés halogénés, d'origines diverses, pourrait être plus grave. C'est ce qui fut mis en évidence en 1985, à la suite de la découverte du "trou d'ozone antarctique" ; celui-ci n'a pu être expliqué que par l'action, en fin d'hiver austral, des espèces chlorées et fluorées résultant des chlorofluorocarbones (CFC) émis depuis le sol, sur l'ozone stratosphérique au-dessus de l'Antarctique : ce phénomène n'est donc nullement lié au trafic aérien.

Les études de l'ONERA et de la NASA montrent que l'impact des oxydes d'azote émis par les turboréacteurs d'une flotte d'avions de transport supersonique, ayant un indice d'émission égal à 5 (c'est à dire 5g de NOx par kg de carburant) ne poserait pas de problème, tant que la concentration des espèces halogénées dans la stratosphère ne sera pas revenue au-dessous du niveau critique de 2 ppbv (2 milliardièmes en volume). Si, du fait des mesures de réduction des CFC édictées par les protocoles de Montréal (1987), de Londres (1990) et de Copenhague (1992), la concentration des espèces halogénées descendait au

dessous de 2 ppbv, l'action directe des oxydes d'azote sur l'ozone pourrait prévaloir. Dans ce cas, il serait préférable d'éviter de voler à des altitudes proches de celle du maximum d'ozone stratosphérique ; une flotte d'avions supersoniques optimisés pour Mach 2 à 15000-16000 m, serait plus acceptable pour l'environnement stratosphérique qu'une flotte d'avions volant à Mach 2,4 et 18000-20000 m.

4.3 - Le bruit et les émissions des moteurs

(Exposé de **Marius Goutines**, Snecma)

Pour être acceptable en 2010-2015, le successeur de Concorde devra :

- avoir une consommation plus faible,
- satisfaire les normes de bruit (-6 EPN db par rapport à la norme OACI actuelle, soit -18 EPN db par rapport à Concorde),
- limiter les émissions d'effluents.

Ceci conduit à des concepts de moteurs capables de faible bruit au décollage et en montée, tout en ayant de bonnes performances à Mach 2 pour la croisière supersonique ainsi qu'à Mach 0,9 pour le survol des terres habitées. La chambre de combustion devra être conçue pour réduire les zones stœchiométriques (injection pré-mélangée pauvre ou combustion étagée riche/pauvre). L'objectif est d'atteindre un indice d'émission d'oxydes d'azote inférieur ou égal à 5 g/kg de carburant. L'atténuation des émissions sonores sera atteint grâce à des revêtements absorbants passifs ou actifs.

Les concepts en étude à la Snecma sont :

- le MTF (Mid Tandem Fan),
- le MEM (Moteur à Éjecteur - Mélangeur).

Il s'agit de moteurs à dilution et géométrie variables qui permettraient, avec une masse et une complexité acceptables, d'obtenir, par rapport au turboréacteur Olympus de Concorde, une performance supersonique identique, une meilleure adaptation au vol en subsonique élevé et une réduction notable du bruit au décollage et en montée.

4.4 - Discussion

(Interventions de Dominique Gentili et Jean Carpentier)

L'impact, sur l'environnement, de la mise en service d'une flotte importante d'avions de transport supersoniques, concerne le bruit au décollage, le bang sonique, l'effet sur l'ozone stratosphérique et le forçage radiatif.

Le problème du **bruit au décollage et en montée** est difficile à résoudre, du fait du taux de dilution des turboréacteurs qui est beaucoup plus faible que celui des moteurs des avions subsoniques : le bruit est un handicap majeur pour un futur avion supersonique.

Le **bang sonique** a conduit à interdire à Concorde le survol, en supersonique, des régions habitées, notamment aux États-Unis. Il est vraisemblable que cette restriction s'appliquera aussi à un successeur éventuel. Cependant, pour le survol de régions à faible densité de population, les restrictions pourraient ne porter que sur les bang focalisés qui se produisent lors du passage du subsonique au supersonique et inversement, ainsi que lors des virages en supersonique. Une réglementation adaptée modifierait considérablement les perspectives d'emploi d'un avion de transport supersonique. Pour un avion d'affaires, le bang (3 à 4 fois plus faible que celui d'un avion de transport commercial) serait acceptable dans la majorité des zones survolées en croisière.

L'effet sur **l'ozone stratosphérique** a été monté en épingle lors de l'introduction de Concorde. Depuis cette époque, les connaissances scientifiques sur la stratosphère se sont beaucoup améliorées : en particulier, le rôle des CFC émis au sol est établi comme étant prépondérant, en ce qui concerne le "trou d'ozone". De toute façon, les progrès sur les chambres de combustion des turboréacteurs permettent d'espérer atteindre un indice d'émission des oxydes d'azote égal ou inférieur à 5, ce qui devrait éviter de créer un effet significatif lorsque la concentration des espèces halogénées dans la stratosphère sera descendue en dessous du niveau critique de 2 ppbv (2 milliardièmes en volume), par suite de l'application des protocoles de Montréal, Londres et Copenhague. Cependant, le survol des régions de latitude élevée peut créer des conditions favorables à la formation de nuages stratosphériques polaires et faciliter les réactions de chimie hétérogène aboutissant à une réduction de la concentration d'ozone.

Le **forçage radiatif** d'une flotte supersonique doit être comparé à celui de la partie de la flotte subsonique qu'elle remplacerait : des estimations conduisent à un rapport égal à 5, mais ceci reste à vérifier à partir de la consommation en litres de carburant par passager/kilomètre d'un avion de transport supersonique conçu en tirant le meilleur parti des progrès de l'aérodynamique et des structures de cellules ainsi que de ceux des turboréacteurs.

En conclusion, du point de vue de l'impact sur l'ozone atmosphérique et sur le forçage radiatif (contribution à l'effet de serre anthropique), il convient d'approfondir les connaissances scientifiques, notamment celles concernant les réactions de chimie hétérogène pour lesquelles les effluents minoritaires des moteurs d'avions peuvent jouer un rôle important.

5 - RENTABILITÉ DU PROJET

(Président de session : **Georges Ville**, ANAE)

5.1 - La rentabilité pour le constructeur

(exposé d'**André Dubresson**, ANAE)

Les dossiers présentés en 1997 par les industriels européens dans le cadre de l'avant-projet ESCT (250 sièges en aménagement triclasse, rayon d'action de 10000 km) comportaient quelques données et conditions de rentabilité :

- coûts de développement de la cellule équipée estimés à 17,4 Md $,
- prix de vente de l'avion ne dépassant pas 300 M $.

Au développement de base de la cellule, il faut ajouter le développement des moteurs et prendre en compte aussi quelques versions dérivées, ce qui conduit à une estimation comprise entre 25 et 30 Md $ pour l'investissement global.

Avec l'hypothèse fixée d'obtention d'une rentabilité de 15% des capitaux investis et sur la base d'une série réaliste de 400 avions, la vente de chaque avion devra permettre d'amortir un montant voisin de 150 M $: ceci conduira certainement à un prix de revient de l'avion plus proche de 350 M $ que des 300 M $ jugés acceptables par le marché.

La rentabilité du programme au niveau des industriels seuls semble assez aléatoire. Qui doit prendre en charge de tels écarts de rentabilité et les risques correspondants ? La réponse à une telle question ne peut être abordée que dans un contexte élargi au politique. A l'époque, le programme Concorde n'a été poursuivi que par la volonté politique du Général de Gaulle qui s'est personnellement impliqué lorsque le partenaire britannique a voulu l'arrêter en 1964. Aujourd'hui, une telle attitude ne semble plus être celle du pouvoir politique très contraint au plan économique et réglementaire (cf. : accord de 1992 sur le financement des programmes aéronautiques). Pourtant, comme l'acquisition du savoir-faire Concorde a conduit à la réussite de l'Airbus, les avancées techniques à attendre d'un nouveau programme supersonique pourraient constituer un effet "fontaine de technologies" pour le domaine subsonique ainsi que pour d'autres secteurs industriels.

Aux Etats-Unis, le pouvoir politique et les administrations se sont montrés plus favorables en apportant des moyens substantiels à leur industrie pour poursuivre leurs travaux dans ce domaine. Dès 1990, la NASA a lancé un vaste programme de recherche constitué de plusieurs phases et représentant plus de 2 Md $ de crédits ; même si, aujourd'hui, la poursuite des travaux devant conduire à la réalisation d'un modèle probatoire a été arrêtée par le Congrès, la NASA a maintenu et financé un prolongement des recherches orienté vers la réduction de la durée des voyages aériens (observation du rédacteur en 2002 : le concept du Sonic Cruiser est-il une retombée de ces recherches ?).

5.2 - Le point de vue de l'opérateur

(Exposé de **Frank Debouck**, Air France)

L'exposé a porté exclusivement sur l'expérience accumulée au cours de l'exploitation de Concorde et sur les leçons à en tirer pour l'avenir. En premier lieu, l'auteur a tenu à souligner l'aspect "artisanal" de son utilisation :

- nombre très réduit des avions construits et exploités commercialement sur quelques missions très particulières,
- mission assurée par Concorde non interchangeable avec la même liaison effectuée par un avion subsonique,
- processus d'exploitation lourd et coûteux pour satisfaire cette exigence et pour proposer de bons horaires compte tenu des décalages et des indisponibilités de l'avion (par exemple, 4 avions sont nécessaires pour assurer correctement un aller et retour quotidien Paris / New York),
- nombre annuel d'heures de vol fortement limité par les contraintes d'exploitation (700 à comparer aux 3 à 4000 atteints par les avions subsoniques).

Le prix du billet pour le passager (50000,00 FF l'aller et retour Paris / New York) est l'illustration des conséquences de ces particularités d'exploitation au niveau des coûts :

- les charges d'amortissement sont terminées pour les avions et ne concernent aujourd'hui que les pièces détachées ;
- les coûts de maintenance sont en revanche très élevés et représentent 50% des coûts d'exploitation au lieu de 10% pour un avion classique ;
- les dépenses de carburant sont du même niveau en pourcentage (10% sur la base des cours actuels du pétrole) que pour un avion classique

subsonique : ceci correspond en réalité à un coût 4 fois plus important en valeur absolue et l'on retrouve ici le rapport des consommations kilométriques par siège déjà signalé ;
- les taxes de route et d'aéroport méritent une attention particulière pour éviter toutes surcharges additionnelles spécifiques aux missions supersoniques.

5.3 - Discussion

(Interventions de Jean Pinet, Joseph Maestrati, Yves Michot, Pierre Vellay)

Les points suivants, abordés au cours de la discussion, complètent les présentations précédentes :

1 - La comparaison de l'avion de transport supersonique avec le produit subsonique répondant à la même mission met en évidence un facteur multiplicatif de l'ordre de 3 au niveau :

- des masses de l'avion,
- de la consommation kilométrique par siège,
- des coûts de développement,
- du prix de vente de l'avion par siège.

Ce même facteur devra se retrouver dans le prix du billet pour le passager et ainsi conduire à une exploitation obligatoirement limitée aux classes "1ère et affaires" ; il semble donc illusoire de penser utiliser le transport supersonique en classe tourisme comme certaines études l'envisagent et de satisfaire l'exigence de 30% acceptable pour le surcoût du billet.

2 - Ce facteur de 3 apparaît aussi pour l'exploitation d'un avion d'affaires supersonique comparé au produit subsonique concurrent.

3 - Pour l'opérateur Air France, il est clair que tout nouveau produit supersonique ne pourra être exploité qu'avec deux classes au maximum. Dans l'hypothèse d'un futur supersonique il est fondamental de sortir du caractère "artisanal" de Concorde, en particulier pour le nombre d'avions construits et les durées annuelles d'utilisation. En dernier lieu, pour Air France, l'arrêt de Concorde en fin de vie entraînera un désamorçage préjudiciable à sa politique de correspondance.

6 - VISION DES POUVOIRS INDUSTRIEL ET POLITIQUE

(Président de session **Pierre Sparaco**, ANAE et Aviation Week)

6.1 - Le point de vue de l'industrie

(Exposé de **Jean-Marc Thomas**, Aerospatiale-Matra et ANAE)

L'exposé comportait trois parties :

1 - Le premier point abordé concernait les problèmes d'organisation entre les divers industriels intéressés par cette question ; plusieurs structures modulables ont été mises en place au cours de la décennie 90 :

- Aerospatiale et British Aerospace (ainsi que les motoristes Snecma et Rolls Royce de leur côté) ont poursuivi leur collaboration au-delà de la mise en service de Concorde ;
- une coopération trilatérale Aerospatiale-BAe-DASA, mise en place en 1993 dans le prolongement du système Airbus, a conduit à une plus grande efficacité grâce d'une part à la mise en commun des ressources et des compétences et d'autre part à la spécialisation des partenaires et des laboratoires de recherche associés : à Aerospatiale l'environnement, les matériaux et l'intégration motrice, à BAe la structure et l'aéroélasticité, et à DASA l'aérodynamique basses vitesses ;
- le groupe des cinq rassemblait au niveau transatlantique les industriels les plus qualifiés : les trois européens mentionnés ci-dessus et les deux constructeurs américains, Boeing et MDC ;
- le groupe des huit complétait la structure précédente en y associant Tupolev, Alenia et les industriels japonais.

2 - Les apports et les mobiles de chacune des parties étaient disparates, tant au niveau des compétences et expériences accumulées que dans les volumes de ressources allouées :

- pour Aerospatiale, au-delà de l'expérience acquise avec Concorde, l'effort cumulé au cours de la décennie 1990 a été de l'ordre de 300 MF dont plus de la moitié assuré en autofinancement industriel ;
- du côté de British Aerospace et de DASA, les ressources encore beaucoup plus faibles n'étaient pas à la hauteur des ambitions européennes ;

- aux États Unis, en revanche, plus de 2 Md $ de financement coordonné par la NASA ont permis l'acquisition d'un savoir-faire technologique : toutefois cette connaissance a conduit au retrait de Boeing et à une nouvelle orientation des réflexions futures vers un programme d'avion d'affaires supersonique aujourd'hui étudié par Lockheed ;
- au Japon, avec l'objectif de se voir reconnaître une crédibilité dans le domaine de la construction civile, le MITI a apporté plus de 300 M$ de crédits : il semble aujourd'hui que les travaux s'orientent aussi vers l'avion d'affaires supersonique ;
- Tupolev amenait son expérience acquise avec le programme TU144 : ce dernier a, d'ailleurs, été remis en vol grâce à un financement NASA au cours de la période.

L'hétérogénéité entre les états de connaissance a conduit rapidement à de nombreux freins dans les possibilités d'échange et de mise en commun des résultats : les collaborations en place sont aujourd'hui tombées en désuétude à l'exclusion de la coopération tripartite AS-BAe-DASA toujours en vigueur même si elle reste peu active.

3 - Avant de réunir les éléments permettant d'envisager opérationnellement le lancement d'un programme d'avion de transport supersonique, de nombreuses étapes restent à franchir :

- concrétisation et fiabilisation du besoin (marché et prix du billet),
- résolution des contraintes d'environnement (bruit au décollage, bang sonique),
- choix du Mach de croisière (compromis entre vitesse et contraintes thermiques),
- validation des nouveaux matériaux et des techniques d'usinage,
- conception aérodynamique et intégration des systèmes de propulsion,
- développement des nouveaux moteurs,
- mise en place des coopérations,
- rassemblement des ressources nécessaires.

Plus de 10 années seraient nécessaires pour réunir l'ensemble de ces éléments constituant le préalable à toute décision de lancement ; l'aboutissement du processus complet conduirait à une mise en service au plus tôt dans la période 2015-2020.

Compte tenu de la faible importance du marché et du volume élevé des investissements, un seul programme réalisé en coopération internationale se justifierait, bien qu'une telle situation doive soulever des problèmes de principe

vis-à-vis des autorités du commerce mondial. La France et l'Europe devraient être présentes si une telle aventure était entreprise : pour maintenir notre position et nos compétences au niveau reconnu actuellement, les efforts devraient être poursuivis en étroite collaboration entre les industriels et les laboratoires concernés.

4 - La réalisation d'un projet d'avion d'affaires supersonique pourrait être une perspective moins ambitieuse et plus réaliste et permettre ainsi la réalisation d'un démonstrateur validant les concepts et les technologies.

6.2 - Le point de vue de l'administration

(Exposé de **Jean-Philippe Duranthon**, DPAC)

La position de la DPAC, présentée oralement, se résume dans les déclarations suivantes :

- le supersonique n'est pas une priorité dans l'allocation des ressources publiques : l'A3XX et le successeur du CFM56 passent en priorité et d'autres concepts techniques et opérationnels sont aujourd'hui en concurrence (jet régional, convertible, aile volante…) ;
- le financement actuel limité à une veille technologique devrait être poursuivi compte tenu d'un élargissement des travaux à des centres de recherches non aéronautiques (accord Allègre - Gayssot) ;
- une action doit être entreprise pour convaincre nos partenaires britannique et allemand d'accentuer leurs efforts dans ce domaine.

6.3 - Discussion

(Interventions de Philippe Poisson-Quinton, André Turcat, Joseph Maestrati, Yves Michot, Jean Delacarte, Pierre Vellay, Jean-Pierre Marec, André Auriol, Dominique Gentili)

La discussion a porté sur les points suivants :

1 - Le développement d'un avion supersonique serait une voie à privilégier en tant que démonstrateur de la validité des concepts envisageables et des technologies associées. Une collaboration avec Lockheed pourrait être intéressante mais les tentatives passées dans d'autres occasions ont montré le peu de chance de succès d'une telle perspective.

2 - La mission envisagée aujourd'hui par les constructeurs ne fait pas l'unanimité pour le choix de la capacité : ne faudrait-il pas revenir à un produit de capacité réduite et monoclasse aux alentours de 100 sièges comme le Concorde actuel ? De même, les avantages d'une limitation du nombre de Mach à 1,6 devraient être évalués et comparés aux conséquences commerciales de la détérioration du temps de vol.

3 - La poursuite des travaux et le maintien d'une présence européenne reconnue exigeraient une participation plus importante des gouvernements, à des niveaux homogènes à ceux accordés aux États-Unis et au Japon.

7 - RÉSUMÉ DE LA JOURNÉE ET CONCLUSIONS

7.1 - Résumé de la journée

(Exposé de **Jacques Plenier**, Vice-Président de l'ANAE)

La journée consacrée à des exposés et des discussions permettant de faire le point des projets et des recherches autour du thème des avions supersoniques a rassemblé plus de 50 participants dont plus de 30 membres de l'Académie. Les exposés ont été denses, très variés, et les discussions sans complaisance. Les textes remis par les conférenciers sont disponibles à l'Académie.

Pour ma part, j'ai retenu les idées principales suivantes :

1 - Le vol supersonique, sans égard aux considérations économiques, garde un intérêt indiscutable :

- pour les militaires, il répond à leur souci d'aller vite et loin, d'échapper aux défenses adverses et d'amplifier, grâce à la vitesse, l'énergie des missiles délivrés ;
- pour l'aviation commerciale se distinguant par des étapes sans escale de plus en plus longues, il réduit les durées de vol devenant difficilement supportables par les passagers.

2 - Les technologies ont évolué depuis le Mirage IV et Concorde et des progrès appréciables seraient possibles en matière d'efficacité des produits ; toutefois, compte tenu du coût technique de l'aptitude supersonique, ces améliorations demeurent encore insuffisantes dans les domaines critiques de la masse à vide, de la traînée aérodynamique et de la consommation : par exemple, par rapport à un avion de transport subsonique de même génération, le facteur de surconsommation du produit supersonique reste encore supérieur à trois. Une telle situation rend difficile la réalisation de projets de long-courriers supersoniques tant pour l'aviation commerciale que pour l'aviation d'affaires.
Pour réduire cet handicap, les travaux de recherche doivent être poursuivis dans les domaines de la propulsion (études amont d'architecture et adaptation des composants), de l'aérodynamique (modélisation des écoulements), des matériaux et des systèmes (souvent oubliés dans les programmes de recherche).

3 - En ce qui concerne l'environnement, le bruit au voisinage des aéroports constitue un problème critique extrêmement difficile à résoudre avec les architectures aujourd'hui envisagées pour les moteurs ; cette question préoccupe

aussi les militaires. La question de la pollution atmosphérique ne semble pas d'une nature différente des problèmes rencontrés avec les avions subsoniques, si ce n'est le niveau de surconsommation entraîné par le vol supersonique.

4 - Au niveau de l'exploitation commerciale, l'objectif de surcoût reconnu acceptable par le passager pour la vitesse supersonique ne semble pas accessible, au regard des facteurs (voisins de 3) de surconsommation et de prix de vente de l'avion.

5 - L'équilibre financier d'un programme supersonique demeure aléatoire ; au-delà même de cette incertitude, le niveau très élevé des risques qui y sont liés serait insupportable pour des investisseurs privés et nécessiterait une prise en compte étatique difficilement envisageable dans le contexte de concurrence et de mondialisation. En outre, la faible part du marché accessible pour le supersonique conduirait raisonnablement à une construction en monopole, elle aussi en contradiction avec les principes du marché.

6 - La discussion finale s'est développée autour des réflexions (peu encourageantes) de Jean-Philippe Duranthon, directeur des programmes de l'aviation civile :

- le produit "avion supersonique commercial" n'est pas près de voir le jour ;
- un programme de recherches avec effet de "fontaine technologique" peut jouer un rôle important, en particulier pour fédérer les travaux conduits à l'ONERA et dans les universités : pour qu'il en soit ainsi et avoir des retombées efficaces, il faudrait cependant que les moyens mis en place soient suffisants, ce qui ne semble pas être le cas aujourd'hui.

7.2 - Conclusions

(Exposé de **Jean Calmon**, Président de l'ANAE)

Cette journée a parfaitement répondu à notre attente en donnant lieu à des échanges et des débats francs, sincères et réalistes sur l'avenir du transport supersonique.

1. Il est apparu clairement que le lancement d'un programme d'avion de transport supersonique ne figure pas dans les priorités à court terme des principaux acteurs (et ceci dans tous les pays), ce qui repousse vraisemblablement à une vingtaine d'années l'entrée en service de ce type d'appareil.

2. Entre temps, il faut s'efforcer d'entretenir une veille technologique propre à maintenir notre capacité de participation au programme le moment venu. Compte tenu des moyens limités qui lui seront affectés, il est essentiel de bien choisir des domaines à la fois déterminants pour le supersonique et d'intérêt pour les progrès du subsonique.

Il faut noter et regretter les difficultés rencontrées pour intéresser les autres communautés aéronautiques européennes à ce sujet.

3. J'ai trouvé confirmation que les niveaux de bruit constituent l'obstacle majeur à l'utilisation opérationnelle de l'avion supersonique, comparés aux émissions sonores toujours plus faibles des subsoniques.

4. Si je n'ai pas placé en tête la rentabilité de l'exploitation d'un avion supersonique, c'est que, dans le contexte très fluctuant du transport aérien, il est extrêmement difficile de fixer dès aujourd'hui les spécifications de l'appareil le mieux à même de séduire le maximum de passagers. La configuration en sera probablement modifiée plusieurs fois (choix de la vitesse de croisière, de la capacité, de l'aménagement intérieur, etc.) avant de figer le projet final. En particulier, la meilleure utilisation - avion de ligne, avion d'affaires ou "global jet" - reste en question, d'autant que le bouclage financier du projet en dépend également.

5. En tant qu'ancien motoriste, j'ai regretté d'entendre, à plusieurs reprises, ramener à un miracle "moteur" la viabilité de l'appareil supersonique, alors que ses performances dépendent tout autant des innovations techniques qui sont à accomplir sur la cellule.

Je remercie tous les conférenciers et les intervenants de la salle pour la qualité des présentations et la richesse des échanges qui ont, j'en suis persuadé, apporté une compréhension accrue des contraintes des uns et des autres, notamment des concepteurs et des exploitants.

Je félicite le vice-président de l'ANAE, Jacques Plenier, et les présidents de sessions pour l'excellente ordonnance de cette journée et je remercie la direction de l'ONERA d'en avoir permis le déroulement dans d'aussi bonnes conditions. Les marques de satisfaction que j'ai déjà recueillies montrent tout l'intérêt de cette formule réunissant, en un jour et en séance semi-privée, des représentants de tous les secteurs impliqués dans un sujet déterminé.

Merci à tous.

8 - ANNEXE 1

La reprise des vols de Concorde

(Exposé d'**Henri Perrier**, ancien directeur des essais en vol d'Aerospatiale)

1 - LA SUSPENSION DU CERTIFICAT DE NAVIGABILITÉ

- Aussitôt après l'accident du 25 juillet 2000, sur décision du ministre des Transports, la compagnie Air France a suspendu les vols. Côté britannique, après une journée de réflexion, les vols ont repris le 27 juillet avec adoption de quelques consignes particulières.

- Le BEA (Bureau Enquêtes Accidents) s'est aussitôt mis au travail et le 26 juillet, par arrêté du ministre des Transports, était créée la commission d'enquête sous la présidence d'Alain MONNIER, Inspecteur général de l'aviation civile.

- Très rapidement, un premier schéma du scénario de l'accident a pu être établi sur la base des enregistrements de paramètres et de conversations ainsi que de la localisation des débris et des traces relevées sur la piste.

    - Destruction d'un pneu - probablement provoquée par une lame métallique ;

    - Rupture d'un panneau du réservoir 5 de dimensions importantes (32 x 32 cm), probablement causée par la projection d'un ou de gros morceau(x) de pneu ;

    - Inflammation de la fuite de carburant ;

    - Importantes pertes de poussée sur les réacteurs 1 et 2 ;

    - Impossibilité de rentrée du train.

- Au vu de cette première analyse, le BEA et son homologue britannique AAIB (Air Accident Investigation Branch) associé à l'enquête, ont émis le 16 août la recommandation suivante "que les certificats de navigabilité des CONCORDE soient suspendus en attendant qu'aient été mises en place des mesures appropriées garantissant un niveau de sécurité satisfaisant en ce qui concerne le risque lié aux destructions de pneumatiques".

Dès réception de ces recommandations, la DGAC d'une part et la CAA d'autre part adressaient ce même 16 août un courrier prononçant la suspension des certificats de navigabilité de tous les avions CONCORDE.

- Était-il possible d'éviter pareille décision ?

  - Compte tenu du faible nombre de décollages - depuis la mise en service (85000) - l'approche statistique ne pouvait être retenue au sens des TSS standard (Transport supersonique).

  - Pouvait-on déclarer que le processus de rupture rencontré le 25 juillet présentait un caractère exceptionnel ? Le fabricant Good-Year, convoqué en réunion avec les autorités et les constructeurs, ne pouvait faire une telle déclaration. En effet, dans des incidents précédents de destruction de pneus, des débris de masse aussi importante avaient été identifiés.

  - La seule voie qui aurait éventuellement pu être envisagée pour reprendre les vols commerciaux consistait à exiger l'inspection détaillée de la piste avant chaque décollage. Peut-être une telle contrainte était-elle envisageable au départ de Roissy et d'Heathrow mais ne pouvait être négociée 3 fois chaque jour à Kennedy.

2 - L'ENQUÊTE TECHNIQUE

Si celle-ci a pu paraître longue, puisque le rapport final a été rendu public courant janvier 2002, elle a été menée avec de gros moyens et en excellente coopération entre le personnel du BEA, les membres de la commission d'enquête et les constructeurs concernés (EADS - British Aerospace - Rolls Royce - Good-Year - Messier-Dowty) ainsi que les centres d'essais officiels (CEAT - CEPR - Laboratoire du CNRS).

L'enquête a permis d'établir :

- ***La destruction du pneu***

Celle-ci a été provoquée par la lame métallique. Cette lame avait été perdue par un DC10 de Continental Airlines ayant décollé 5 minutes avant CONCORDE.

- ***La destruction d'un morceau du panneau d'intrados du réservoir 5***

Il a été constaté, compte tenu de l'examen de la pièce, que cette rupture était due à une poussée orientée de l'intérieur vers l'extérieur.

Comme l'ensemble du panneau n'a pu être reconstitué, la plus grande partie ayant fondu, on ne peut établir avec certitude les différents impacts qui ont pu affecter l'intrados du réservoir. Les calculs effectués par EADS ont permis d'établir que la rupture constatée pouvait être expliquée par l'effet combiné de la déformation dans une zone voisine de la rupture sous l'effet du choc à grande vitesse d'un morceau de pneu de la masse de celui retrouvé en bord de piste - voisin du panneau - et de l'effet de convection lié au déplacement du carburant provoqué par la déformation dans la zone d'impact.

Le principe de cette modélisation a pu être confirmé par des essais sur éprouvettes instrumentées (jauges de contraintes et capteurs de pression) soumises au CEAT à des projections de morceaux de pneus. En revanche, il n'a pas été possible de reproduire sur un caisson d'essai le processus de rupture de l'accident dans la mesure où l'installation (canon à poulet) ne permettait pas de reproduire la combinaison des paramètres masse et vitesse estimée du débris. L'ensemble des travaux effectués - calculs et essais - a représenté le chemin critique dans le calendrier de l'enquête technique.

- ***L'inflammation de la fuite de carburant***

Les études ont porté sur l'estimation du débit de fuite d'une part par analyse des photos de la flamme et d'autre part, en considérant les indications des jaugeurs au moment de l'impact : une valeur de 60 kg par seconde est un ordre de grandeur probable. Après avoir envisagé diverses possibilités, l'enquête a finalement retenu les éléments suivants :

- Probable inflammation de la fuite de carburant au niveau de la tuyère primaire,
  et soit : remontée de la flamme jusqu'à la case de train dans le sillage turbulent à la jonction flanc de nacelle/intrados - c'est ce qui nous paraît le plus probable d'après l'étude du CNRS mais cela n'a pu être confirmé au banc d'essais de Warton qui reproduisait imparfaitement à l'échelle 1 la zone étudiée.
- soit : indépendamment du feu dans la zone de tuyère, l'allumage de la fuite par une étincelle électrique dans la case de train, en supposant que des débris de pneu aient coupé le câblage

électrique des ventilateurs de frein, mais l'endommagement de ces câbles paraît peu probable dans la mesure où ils sont protégés par le fût de train d'un impact après rupture d'un pneu avant.

- ***Le comportement des réacteurs***

Les observations effectuées après le démontage des moteurs 1 et 2 au CEPR, l'analyse des paramètres, les enseignements de cas d'ingestion de morceaux de pneus dans des incidents antérieurs ainsi que des informations fournies par les essais d'ingestion de carburant sur le banc d'essai britannique du DERA à Shoeburyness ont permis de comprendre les causes des pertes de poussée des réacteurs 1 et 2. Sans entrer ici dans trop de détails, il a pu être établi que ces pertes de poussée étaient essentiellement dues à des pompages provoqués par l'ingestion de gaz chaud après établissement de la flamme, et/ou de carburant.

- ***L'absence de l'entretoise du train principal gauche***

Au cours du remplacement du boggie du train principal gauche, quelques jours avant l'accident, une entretoise n'a pas été remontée. Avant le 25 juillet, deux aller et retour New York avaient été effectués sans qu'il ait été détecté la moindre anomalie dans le comportement de l'avion tant en ce qui concerne l'accélération que le comportement transversal. Malgré cela, une étude très détaillée de la conséquence éventuelle de cette pièce manquante a été conduite avec le concours du concepteur du train et l'enquête a pu conclure - sans ambiguïté - que cette faute de maintenance n'avait joué aucun rôle dans la séquence de l'accident.

- ***La rotation prématurée***

Le commandant de bord a débuté la rotation avec une vitesse inférieure de 16 kt à la VR retenue dans la préparation du vol. Il n'a pas été possible de déterminer ce qui a conduit le pilote à cette décision, mais dans la configuration de perte de poussée sur les moteurs gauche, même si la VR de consigne avait été respectée la trajectoire (altitude/vitesse) n'aurait guère été différente.

- ***La non rentrée du train d'atterrissage***

Compte tenu de la perte du pneu n° 2, le voyant rouge "WHEEL" voisin du levier de commande du train devait être allumé et la consigne dans ce cas est de ne pas rentrer le train. Quand le commandant de bord ordonne

cependant la rentrée du train, celui-ci ne rentre pas ! L'explication retenue est que très probablement la trappe du train principal gauche ne s'est pas ouverte complètement interdisant la poursuite de la séquence.

3 - LES MODIFICATIONS

- ***La protection des réservoirs***

Très rapidement - c'est-à-dire bien avant que l'enquête technique n'ait établi le processus de rupture du panneau du réservoir - la réflexion au sein d'EADS s'est orientée sur l'analyse du risque de l'endommagement de l'intrados de voilure après impact à grande vitesse de débris de pneus de masse d'environ 4 kg. Le renforcement de certains panneaux de l'intrados est rapidement apparu comme une opération excessivement difficile tant au niveau de sa réalisation industrielle que de la procédure de justification de la structure ainsi modifiée, en particulier sous l'aspect fatigue, compte tenu des contraintes thermiques. De plus, une telle modification aurait représenté un cycle tellement long que l'arrêt des avions aurait été incompatible avec une reprise des vols commerciaux dans un délai raisonnable.

La seule approche envisageable s'il n'était pas possible d'éviter une rupture de panneau de réservoir analogue à celle de l'accident, était de rechercher le moyen de réduire considérablement le débit de fuite. Il fallait pouvoir réduire ce débit de fuite à des valeurs acceptables d'une part en cas d'ingestion par les réacteurs sans provoquer de pompages et d'autre part telles qu'il n'y ait pas de risque d'inflammation à l'extérieur de la nacelle, sans possibilité d'action par l'équipage.

Ceci donna lieu à l'étude de ce qui a été dénommé "liners", à savoir, une protection en matériau souple constitué de caoutchouc synthétique renforcé de kevlar, à placer dans les fonds de réservoirs susceptibles d'être endommagés par la projection de morceaux de pneus ou d'autres débris, le débit de fuite n'étant plus alors que celui correspondant à l'écoulement du carburant se situant entre le liner et le panneau d'intrados.

Pour établir ces débits, des travaux importants furent conduits sur un caisson maquette en laboratoire, puis en soufflerie, enfin sur avion par une campagne d'essais à Istres au cours de roulages en janvier 2001 où la fuite était simulée en divers points par de l'eau colorée. Ces essais avaient également pour objet d'étudier le cheminement de la fuite, en particulier d'apprécier au niveau des réacteurs ce qui passerait dans le piège à couche limite.

L'étude des liners mobilisa un grand nombre de dessinateurs car il fallait un dessin précis pour chaque maille du revêtement intrados de façon à faire réaliser les moules par la Société AERAZUR choisie pour la fourniture des liners. La qualification des liners nécessita de nombreux essais de tenue en température, aux vibrations ainsi que de compatibilité avec le carburant.

L'installation des liners s'est avérée être une opération très longue et délicate compte tenu des difficultés d'accès dans certaines zones de réservoirs et qui a représenté un chantier de plusieurs mois sur chaque appareil. Le premier avion modifié par British Airways fut utilisé en juillet 2001 pour, d'une part, reprendre certains essais de certification du circuit carburant, comme la détermination des nouvelles valeurs du carburant impompable, et d'autre part, mesurer les températures dans les fonds de réservoirs pour justification de la structure.

- ***Le nouveau pneu Michelin***

En parallèle, dès septembre 2000, la question avait été posée par EADS aux sociétés fabriquant des pneus d'avions pour leur demander l'étude d'un pneu moins susceptible de destruction en présence de corps étrangers et qui en pareil cas ne se traduirait que par des débris de masse la plus faible possible. Sur les quatre constructeurs de pneus sollicités, seule la société Michelin répondit rapidement avec un pneu qui présentait des caractéristiques bien supérieures à ce qui était espéré en leur posant le problème.

De très nombreux essais conduits par Michelin tant dans son centre de recherche de Clermont-Ferrand, que dans son centre d'essais d'Almeria, ont permis tout d'abord de démontrer l'exceptionnelle résistance aux agressions par des corps étrangers mais également, en cas de rupture provoquée du pneu, d'établir la masse ainsi que la forme des débris et leur trajectoire. En partant de ce modèle de rupture de pneu par rapport auquel les autorités de navigabilité ont imposé de prendre des marges importantes sur les trajectoires des débris, une justification du non-risque d'endommagement de la structure, que ce soit par effet direct ou par effet combiné d'impact et de convection dans le carburant de réservoir plein, a été conduite avec la modélisation précédemment justifiée par les essais conduits sur les éprouvettes du CEAT.

A ce point, l'abandon de la solution liner aurait pu être envisagé mais il apparut que vis-à-vis des autorités de navigabilité, il était nécessaire de pouvoir démontrer l'absence de risques en cas de perforations de l'intrados par la projection de débris divers, soit projetés par des débris de pneus, soit indépendants, comme par exemple un boulon de roue.

Les analyses permirent, compte tenu des hypothèses, de diminuer les zones protégées par les liners mais toutefois en couvrant une surface plus importante que celle qui objectivement présentait un risque.

Pour obtenir la qualification du pneu, il a fallu refaire le parcours de certification de la roue Dunlop, pour s'assurer que les niveaux de contraintes n'étaient pas plus élevés qu'avec les pneus précédents Dunlop ou Good-Year. De même, il a fallu répéter au CEAT la démonstration de capacité du frein à l'énergie maximale de certification pour prendre en compte une moindre énergie absorbée par le pneu dont le profil de déformation est différent.

Enfin, comme CONCORDE est certifié sur la base des performances de freinage sur piste mouillée - à la différence de la réglementation FAR/JAR 25 (Federal Aviation Regulation / Joint Aviation Regulation n°25) pour laquelle les performances sur piste mouillée sont définies par une majoration forfaitaire des distances sur piste sèche - une campagne d'essais à Istres (fin avril / début mai 2001) a conduit à modifier le réglage du calculateur d'anti-skid.

- ***Les modifications sur les câblages électriques***

Pour prendre en compte l'hypothèse d'inflammation par étincelle électrique dans la zone du puits de train d'atterrissage, il a été décidé d'une part de couper l'alimentation des ventilateurs de frein dans les phases de décollage et d'atterrissage (consigne manuel de vol) et de mettre en place un blindage autour du faisceau électrique parcouru par de faibles courants (régulation de freinage - température des freins - jauges de contraintes détectant la torsion du boggie en cas de pneu dégonflé).

- ***Répercussion des modifications sur l'utilisation opérationnelle***

  - L'ensemble des liners, leurs fixations et les produits d'étanchéité représentent une masse de 250 kg.
  - Le pneu Michelin amène un gain de masse de 13 kg par rapport au pneu Good-Year (flotte AF avant l'accident) et de 25 kg par rapport au pneu Dunlop (flotte BA).
  - Le carburant impompable avec la présence des liners est majoré de 228 kg.

Ces différents éléments conduisent, pour la flotte Air France, à une augmentation de la masse à vide de 350 kg. Pour la flotte British Airways la

majoration est beaucoup plus faible car, outre un plus grand gain sur la masse des pneus, il a été procédé pendant l'arrêt des avions à une refonte de l'installation commerciale qui a fait gagner de façon sensible sur la masse des sièges.

Enfin, le volume occupé par les liners réduit de 86 kg la quantité maximale de carburant embarquable.

4 - RESTITUTION DES CERTIFICATS DE NAVIGABILITÉ

Après avoir repris un processus complet de certification touchant tous les aspects : structure - pneu - roue - comportement réacteur - risque de feu - circuits hydrauliques - commandes de vol - les autorités de navigabilité françaises et britanniques ont établi une consigne de navigabilité datée du 5 septembre 2001 donnant la liste des modifications à appliquer pour que chaque appareil puisse recevoir à nouveau son CdN individuel (Certificat de Navigabilité) - ce qui fut le cas pour un avion d'Air France et un avion de British Airways dès le 6 septembre.

Les autres appareils reçurent leur CdN au fur et à mesure de la fin des chantiers de modifications.

9 - ANNEXE 2

Quelles vitesses pour le transport aérien intercontinental : du transsonique au supersonique ?

(exposé de **Philippe Poisson-Quinton**, ANAE et **Georges Ville**, ANAE)

1 - La question maintes fois débattue de l'avenir du transport supersonique réapparaît aujourd'hui sous diverses formes :

- La première demande est la conséquence de l'allongement des rayons d'action autorisés par les nouveaux produits et répondant ainsi à un besoin souvent exprimé ; cette situation conduit à des durées de vol (excédant 12 heures) difficilement supportables pour les passagers pressés ou allergiques au confinement à l'intérieur de l'avion ; seule une augmentation de la vitesse de croisière permet de répondre à une telle requête.

- Le deuxième événement est le nouveau concept d'avion de transport quasi sonique proposé en avril dernier par Boeing, le "Sonic Cruiser".

- Le troisième événement est la remise en service opérationnel de Concorde au début du mois de novembre 2001.

Faire le point des connaissances technologiques dans un domaine aussi sensible et voir ce que nous pourrions faire semblent tout à fait d'actualité et constituent l'objet de la présente Lettre de l'ANAE.

2 - Un séminaire organisé le 6 avril 2000 par l'ANAE à l'ONERA[1] sur l'avenir du transport supersonique a permis une mise à jour de l'état des connaissances et a mis en lumière les éléments suivants :

- Au plan de l'exploitation opérationnelle, la durée du voyage est liée au choix de la vitesse de croisière et les analyses montrent que celle-ci doit conduire pour un long rayon d'action (10000, 12000 km) à un gain de temps notable (de l'ordre de 50%) pour qu'un futur supersonique soit attrayant : ceci impose un Mach de croisière supérieur à 1,8 et ne dépassant pas 2 pour éviter les problèmes de plus en plus sévères liés à l'échauffement de la cellule et au conditionnement d'air de la cabine.

[1] - La synthSèse des exposés et des discussions fait l'objet du présent Dossier

- L'expérience unique accumulée grâce à l'exploitation de Concorde est un atout fondamental pour l'avenir ; cet avion, magnifique réussite technique arrivé un peu tôt compte tenu des connaissances technologiques de l'époque, n'a pas eu le succès espéré pour deux raisons principales :

    - un rayon d'action limité par une consommation kilométrique par siège très élevée représentant 4 fois celle d'un avion subsonique de la même génération (B747, DC10 et L1011) ;
    - le bruit à proximité des aéroports et celui du bang sonique en croisière au-dessus des territoires habités.

- Les améliorations technologiques (touchant à la fois la propulsion, l'aérodynamique, les structures et les équipements) devraient permettre de réduire d'un facteur 2 la consommation kilométrique par siège par rapport à Concorde ce qui rend exploitable un futur transporteur supersonique ; le facteur de surconsommation par rapport à un avion subsonique devrait se réduire au niveau de 3. Ce même facteur se retrouvant pour la plupart des autres coûts d'exploitation, il faudra s'attendre pour un avion supersonique à des DOC[2] associés 3 fois plus élevés que ceux d'un avion subsonique : seule une utilisation réservée à une classe première ou "superclub" permettra d'obtenir les revenus nécessaires pour justifier l'exploitation d'un avion de transport supersonique.

- Ces améliorations et les exigences de limitation du bruit ne peuvent être obtenues qu'avec la mise au point de réacteurs optimisés dans tout le domaine de vol sub, trans et supersonique : pour cela, le développement très prometteur d'un nouveau type de moteur à cycle variable devrait être engagé.

- Toutefois, il s'avère indispensable avant tout démarrage de programme de débroussailler le domaine par la qualification du bien-fondé des hypothèses avec la réalisation d'un produit "démonstrateur" d'ambition plus limitée et de coûts moindres. Deux voies sont envisageables et correspondent à deux approches différentes pour aborder le domaine du transport supersonique :

    - soit par une augmentation programmée du transsonique au supersonique sur des versions exploitables commercialement : ceci semble être la voie suivie par Boeing avec son projet Sonic Cruiser ;

[2] - "Direct Operating Cost" : coût direct d'exploitation

- soit en développant un "démonstrateur" supersonique à échelle réduite répondant à une mission moins ambitieuse en taille et rayon d'action : ceci pourrait être une voie intéressante à envisager au niveau de l'Europe par le développement d'un avion d'affaires supersonique.

3 - Les Américains avaient défini au début des années 70 un projet SST (concurrent de Concorde) ayant pour objectif un Mach de croisière de 2,7 ; cette solution particulièrement difficile pour la résistance à l'échauffement et la tenue des matériaux nouveaux a conduit la NASA à initier dans les années 90 des recherches sur un projet volant en croisière à Mach 2,4 ; aussi en 2001 la proposition de Boeing avec le Sonic Cruiser surprend[3] par ses objectifs de mission : 16000 km, 250 passagers environ et Mach de croisière 0,95 ; que peut-on penser de ce nouveau concept ?

- Ou bien n'est-ce qu'une réponse commerciale au lancement de l'Airbus A380 en proposant "plus de vitesse" plutôt que "plus de capacité". Cependant les gains de temps par rapport aux avions actuels à Mach 0,85 de croisière sont trop faibles pour être véritablement attractifs : par exemple moins d'une heure sur un voyage transatlantique contre plus de 3 heures pour notre Concorde ou un futur SST ; de plus, les coûts techniques et financiers d'une telle option semblent excessifs par rapport au gain opérationnel escompté.

- Ou, comme le suggère la vision artistique du projet Boeing, ce projet ne serait que la première étape (vers 2008) d'un futur supersonique (vers 2020) directement dérivé : cette hypothèse repose sur l'étrange ressemblance du projet avec tous les SST futurs présentés dans le passé : aile élancée en double delta et intégrée dans un long fuselage, plan canard permettant de contribuer à une bonne hypersustentation, systèmes actifs de contrôle… Pour qu'il en soit ainsi, il faudrait que la cellule soit dès sa conception compatible avec les conditions aérodynamiques et thermiques de la croisière supersonique et que les 2 turbofans intégrés à la partie arrière puissent être remplacés par 4 nacelles propulsives installées sous l'aile. Le principal avantage d'un tel déroulement par étapes serait d'amortir la plus grande partie des coûts de recherche et de développement sur la première version tout en

[3] - L'idée de voler en croisière au voisinage de Mach 1 date des années 60 et revient à la NASA : en 1971 un avion expérimental de la NASA (un Crusader modifié selon les concepts de Richard Witcomb) a volé en croisière autour de Mach 1. En 1977 Boeing proposait un B747 redessiné pour une croisière à Mach 0,95 avec une cellule optimisée selon la loi des aires et une voilure supercritique ; le projet, validé en soufflerie, ne fut pas lancé. Rappelons qu'à la même date plusieurs milliers de passagers avaient déjà effectué de longues croisières (sans bang supersonique) à Mach 0,95 à bord de Concorde

qualifiant l'essentiel des points critiques (fiabilité, qualités de vol et performances, tenue structurale et vieillissement des éléments composites, aéroélasticité…) ; toutefois, le financement d'un tel programme, qui reste probatoire, semble peu compatible avec les impératifs du monde boursier actuel.

4 - L'autre voie serait de partir de l'idée-force de Dassault consistant à développer un avion d'affaires supersonique attirant la clientèle potentiellement intéressée par une réduction de la durée du voyage et par une plus grande souplesse d'emploi que la ligne régulière : l'éclatant succès de la famille Falcon à grand rayon d'action est une démonstration de l'efficacité de cette politique. Une étude approfondie d'un projet supersonique fut menée par Dassault avec pour objectif une mission limitée à un Mach de croisière de 1,8 et transportant 8 passagers sur 7500 km ; la conclusion fut qu'on saurait faire une aérodynamique, une structure et des systèmes répondant à ce programme mais qu'il n'était pas possible de réaliser dans les mêmes délais l'indispensable réacteur à cycle variable ; ce type de moteur permettrait de résoudre la triple adaptation recherchée pour les vols en haute croisière supersonique (réacteur fonctionnant comme un simple flux), en croisière transsonique (fonctionnement en double flux) et aussi à basses vitesses pour le décollage, l'atterrissage et l'attente (avec l'incorporation de dispositifs actifs ou passifs de réduction de bruit dans le jet du réacteur).

En fait, un tel projet pourrait constituer un magnifique laboratoire volant, pour un programme à long terme permettant de qualifier dans un premier temps l'aérodynamique, les structures et les systèmes dans une formule triréacteur équipé de moteurs militaires existants modifiés puis servant ultérieurement de banc d'essai pour le développement d'un réacteur à cycle variable qui pourrait être installé en 3ème réacteur au-dessus du fuselage ; de plus, les résultats de cette expérimentation pourraient être directement transférables à un futur long-courrier supersonique de grande capacité. Les premières versions à rayons d'action plus faibles pourraient trouver un usage militaire comme avion de liaison rapide, puis le marché civil se développerait dès la disponibilité des réacteurs à cycle variable. L'intérêt de cette option serait d'avancer progressivement et de pouvoir bénéficier de crédits de R&D à la fois civils (autorisés puisqu'en dehors de l'accord de 1992) et militaires pour valider les nouvelles technologies sur un programme concret et mobilisateur pouvant être étalé sur une dizaine d'années.

5 - Les périodes de crise sont des occasions privilégiées pour les réflexions stratégiques ; ainsi parler de l'intérêt de la vitesse dans l'actualité présente peut surprendre mais cette question est de longue haleine et l'aborder aujourd'hui constitue une étape utile dans les questions posées par le développement du trafic pour les très longs rayons d'action. Aussi, au delà des programmes de développements en cours tant civils que militaires, il pourrait être opportun, dans le cadre de l'Europe, d'utiliser et de développer le savoir-faire de nos industries aéronautiques dans un grand projet mobilisateur et fédérateur tel l'avion de transport supersonique[4] : l'avion d'affaires supersonique pourrait constituer une première étape intelligente dans cette voie. Comme Concorde l'a fait pour la génération passée, on donnerait ainsi à nos petits-enfants une chance de réaliser à nouveau un chef-d'œuvre impossible.

[4] - Une augmentation sensible de la vitesse de croisière pour les étapes intercontinentales est inéluctable à long terme ; souvenons-nous comment le TGV a révolutionné le transport ferroviaire et a aussi démontré que les passagers sont prêts à payer plus cher en échange d'une réduction sensible de la durée du voyage.

LEXIQUE DES ABRÉVIATIONS

AAIB : Air Accident Investigation Branch
ANAE : Académie Nationale de l'Air et de l'Espace
CAA : Civil Aviation Authority
CEAT : Centre d'Essais Aéronautique de Toulouse
CEPR : Centre d'Essais des Propulseurs
CNES : Centre National d'Études Spatiales
CNRS : Centre National de Recherche Scientifique
COVOS : Comité d'études des conséquences des Vols Stratosphériques
DASA : Daimler AeroSpace Airbus
DERA : Département Évaluation et Recherche en Accidentologie
DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile
DPAC : Direction des Programmes Aéronautiques Civils
EREA : Etablissements de Recherche Européens en Aéronautique
ESCT : European Supersonic Civil Transport
NASA : National Air and Space Administration
ONERA : Office National d'Études et de Recherches Aerospatiales
SPAé : Service des Programmes Aéronautiques

L'ACADÉMIE NATIONALE DE L'AIR ET DE L'ESPACE

En 1983, trente-cinq personnalités de l'aéronautique et de l'espace se concertaient pour fonder une Académie de l'Air et de l'Espace, à l'initiative d'André Turcat.

Le 21 septembre de la même année, une première assemblée générale se réunissait pour en approuver les statuts sous la forme d'une association Loi de 1901.

Le 21 novembre 1983, deux centième anniversaire du premier vol humain, l'Académie Nationale de l'Air et de l'Espace était installée officiellement à Toulouse, capitale sans conteste en ces domaines, et soutien de son existence.

Par un décret du 9 Juin 1987, l'Académie a été reconnue d'utilité publique.

Placée sous le patronage de messieurs les ministres de l'Industrie et de la Recherche, de la Défense, de l'Éducation Nationale, et des Transports, l'Académie se propose de favoriser le développement d'activités scientifiques, techniques et culturelles de haute qualité dans le domaine de l'Air et de l'Espace. Dans ce domaine, elle cherche à valoriser et enrichir notre patrimoine, à diffuser nos connaissances, à constituer un pôle d'animation.

L'Académie se compose au maximum de :

- soixante membres titulaires français,
- trente membres associés étrangers.

L'Académie comprend également :

- des membres d'honneur,
- des correspondants français et étrangers,
- des membres honoraires (membres et correspondants ayant atteint 75 ans).

En dehors des membres et correspondants qui sont des personnes physiques élues, des personnes morales peuvent adhérer à l'Académie à titre de cotisants ou bienfaiteurs.

Les sections regroupent les membres titulaires par genre d'activité :

Section I Connaissance scientifique de l'Air et de l'Espace ;
Section II Science appliquée et technologie de l'Air et de l'Espace ;
Section III Présence et activité humaines dans l'Air et l'Espace ;
Section IV Morale, droit, sociologie et économie de l'Air et de l'Espace ;
Section V Histoire, lettres et arts de l'Air et de l'Espace.

Chaque section se compose de dix membres en principe, sauf la section II dont l'effectif est double.

Les membres associés, les membres d'honneur, les membres honoraires et les correspondants ne sont pas affectés dans les sections mais peuvent participer à leurs travaux. Ils peuvent participer aux commissions permanentes et aux commissions *ad hoc* créées à la demande pour étudier des problèmes spécifiques.

L'Académie se réunit normalement cinq fois dans l'année, dont, habituellement, trois fois à Toulouse, une fois à Paris et une fois en un autre haut lieu scientifique en France ou à l'étranger. Chaque séance comprend une partie privée réservée à ses membres et une partie publique au cours de laquelle sont présentées des communications. Les sections se réunissent à la diligence de leurs présidents, soit séparément pour les problèmes qui leur sont propres, soit avec d'autres sections pour les problèmes qui concernent plusieurs d'entre elles.

Les objectifs de l'Académie la conduisent à organiser des manifestations variées : congrès nationaux ou internationaux, colloques, expositions, etc.

Elle fait paraître des publications diverses : actes de colloques, dossiers, comptes rendus des forums, annales, lettre périodique, articles, ouvrages divers... A l'issue des études qu'elle mène, elle adresse des recommandations aux décideurs concernés.

Elle récompense par des prix et des médailles des travaux marquants effectués dans le domaine de l'Air et de l'Espace.

Elle accorde également son patronage à des manifestations organisées en dehors d'elle.

LISTE DES PUBLICATIONS DE L'ANAE

- ACTES DE COLLOQUES -

- **La Sécurité aérienne**, 1984
- **Les Enjeux de la stratosphère**, 1985
- **La Sécurité aérienne**, 1986
- **La Stabilité**, 1987
- **La Sécurité aérienne et spatiale**, 1988
- **L'Avenir du transport aérien à haute vitesse**, 1989
- **Gestion de la circulation aérienne,** 1990
- **Les Apports de la conquête spatiale à l'humanité**, 1991
- **La Corrélation**, 1991
- **La Sécurité de l'aviation légère**, 1992
- **L'Avenir de l'aviation de transport de fret**, 1993
- **Espace, Aéronautique et Environnement atmosphérique**, 1994
- **Le Système "Transport aérien"** : intégration équipage et contrôleurs, 1994
- **Aéroports du Futur**, 1995
- **La Mécanique**, 1996
- **Aspects juridiques et financiers de la sécurité aérienne**, 1997
- **Médias et Sécurité dans le transport aérien,** 1998
- **Sécurité de la circulation aérienne : augmenter capacité et sécurité dans le trafic européen ?** 2000

- FORUMS -

- **n°1 : Relation Homme-Machine dans l'aéronautique** : juin 1996 - janvier 1998, 1998
- **n°2 : Relation Homme-Machine dans l'espace** : décembre 1996 - janvier 1998, 1999

- DOSSIERS -

- (voir liste page 3)

- OUVRAGES DE CULTURE AÉRONAUTIQUE -

- **Plaquette de l'exposition Saint-Exupéry**, 1986

- **Le Nouveau Dédale**, de Jean-Jacques Rousseau, 1801, réédition 1987, introduction d'Edmond Petit
- **Les progrès de l'aviation par le vol plané**, de F. Ferber, 1907, réédition 1987
- **La Vie de l'avion commercial**, sous la direction de P. Vellas, 1990
- **Catalogue du V^e Salon des Arts de l'Air et de l'Espace**, 1990 (en coopération avec l'ENSICA)
- **Au temps de Clément ADER**, 1994
- **Espace, Science et Médecine**, 1994
- **Coopération internationale entre industries aéronautiques et spatiales**, sous la direction de P. Vellas (bilingue français/anglais), 1995
- **Lettre-préface** par Robert Esnault-Pelterie à l'*Histoire Comique ou Voyage dans la Lune* de Cyrano de Bergerac, réédition 1997
- **Impact de la flotte aérienne sur l'environnement atmosphérique et le climat**, rapport en collaboration avec l'Académie des sciences, 1997
- **Joseph Czinczenheim tel que nous l'avons connu ; Témoignages**, 1998
- **Ciels des Hommes,** anthologie, choix et présentation des textes par Lucien Robineau, 1999
- **Henri Ziegler : Hommages et témoignages,** 1999

- ANNALES -

Années 1983 à 1999. Elles ont pour objet de garder en mémoire les évènements et les activités intervenus au cours de l'année.

- LA LETTRE DE L'ANAE -

Versions française et anglaise. Publication bimestrielle sur les activités de l'Académie.

* * *

La plupart de ces ouvrages sont disponibles. Un abonnement donne droit à toutes les publications de l'année en cours et à une réduction de 50% sur les publications antérieures, dans la limite de leur disponibilité et sans frais de port. Il permet de recevoir les informations sur les séances publiques, les forums Intégration Homme-Systèmes, auxquels on peut participer à des conditions préférentielles.

Imprimé par le Service Édition
Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales
29 avenue de la division Leclerc - BP 72
92322 CHÂTILLON Cedex