

1.6. L'aviation de transport depuis 1945

L'année 1945 marque le début d'une ère nouvelle pour le transport aérien. Les possibilités de l'aéronautique d'une part, les besoins en moyens de transport rapide à moyennes et longues distances d'autre part, avaient, dès novembre 1944, conduit 54 gouvernements à réunir, à Chicago, la Conférence Internationale de l'Aviation Civile. La convention de Chicago, signée en décembre 1944, est une charte définissant les principes et les dispositions devant permettre aux services internationaux « d'être établis sur une base d'égaux possibilités pour tous et d'être exploités d'une manière économique et saine ». Cette convention définit les cinq libertés de l'air :

- droit de survol sans atterrissage ;
- droit d'atterrir dans un dessein non commercial (« escale technique ») ;
- droit de débarquer passagers ou marchandises embarqués sur le territoire de l'État dont l'aéronef possède la nationalité ;
- droit d'embarquer passagers ou marchandises à destination du territoire de l'État dont l'aéronef possède la nationalité ;
- droit de transporter passagers ou marchandises entre deux pays étrangers traversés.

Les deux premières libertés, dites primaires, furent reconnues à Chicago par la quasi-unanimité des nations représentées. Les trois autres, dites de droit commercial, supposaient des accords particuliers, bilatéraux, entre les nations.

Le 7 décembre 1944, était fondée l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI), organisme consultatif chargé de coordonner l'activité des compagnies, avec, pour règles, la normalisation et la simplification. L'OACI a son siège à Montréal.

De son côté, l'IATA (International Air Transport Association), qui est à l'échelon des compagnies aériennes ce que l'OACI est à celui des gouvernements, adoptait en 1945 de nouveaux statuts (l'IATA avait été créée en 1919) avec, pour objectifs, la sécurité, l'efficacité et la rentabilité.

En 1945, l'avion de transport le plus utilisé était le Douglas DC3, qui avait fait son premier vol le 17 décembre 1935. Équipé de deux moteurs de 1000 chevaux chacun, le DC3, encore appelé Dakota, fut construit à 800 exemplaires pour les civils et à près de 11000 pour les militaires. Il contribua grandement au succès des opérations stratégiques et tactiques de la deuxième guerre mondiale (transport et parachutage de troupes et de matériels).

Le Douglas DC4, équipé de quatre moteurs Pratt et Whitney, fut mis en service en 1946. Il pouvait transporter 6 tonnes à 2000 km, à 350 km/h (à comparer à 2,5 tonnes, 700 km, 250 km/h pour le DC3).

La France disposait des quadrimoteurs Languedoc SE 161 (premier vol en 1939). L'Armagnac SE 2010, également quadrimoteur, effectua ses premiers vols en 1949.

Dès octobre 1945, trois compagnies aériennes américaines sillonnent régulièrement le ciel de l'Atlantique Nord où elles rencontrent la concurrence d'une compagnie britannique. D'autres compétiteurs, tels que Air France, KLM et Sabena entrent bientôt sur le marché. La première année d'exploitation complète (1946) voit un nombre de 105000 passagers sur l'Atlantique Nord, dont plus de 80 % pour les trois compagnies aériennes américaines. En 1948, le nombre total de passagers sur l'Atlantique Nord atteint déjà 300000.

Lockheed fournit à TWA le premier Constellation (L049) en 1946. Avec quatre moteurs Wright, il pouvait transporter 48 passagers à 420 km/h. Le Constellation assura sa première liaison commerciale New-York-Paris en 1946 en 19 h 36 mn de vol avec deux escales, à Gander (Terre-Neuve) et Shannon (Irlande). Avec le Super-Constellation (L1049) en 1951 et le Super-Star Constellation (L1649) en 1957, le nombre de passagers passa à 88, et la vitesse atteint 470 pour le premier et 530 km/h pour le second, sur une distance, respectivement, de 4000 et 6000 km.

Cependant, entre-temps, une nouvelle filière d'avions de transport était née, sous l'impulsion, principalement, des Britanniques. Le comité Brabazon avait, en pleine guerre, élaboré un programme d'avions à **turbopropulseurs**. Ce programme aboutit au Viscount de Vickers, mis en service en 1953. Avec 4 turbopropulseurs Rolls-Royce Dart de 1600 chevaux, il transportait 50 passagers sur 2800 km, à la vitesse de croisière de 500 km/h. Quant au Bristol Britannia, il pouvait transporter 96 passagers sur 3700 km à 665 km/h.

- En Europe occidentale, il faut signaler aussi le Fokker F27, mis en service en 1958 pour une capacité de 44 passagers à 430 km/h sur 1200 km, ainsi que les Nord 260 et 262, le Potez 840 et le Bréguet 941 (à décollage et atterrissage très courts).

- En URSS, citons l'Antonov AN 10, l'Iliouchine IL18 et le Tupolev TU 114. Ce dernier était le plus gros long-courrier à turbopropulseurs. Il pouvait transporter 220 passagers à 800 km/h. Pour une charge marchande de 25 tonnes (masse au décollage : 165 tonnes), il pouvait franchir 9000 km. Le TU 114 entra en service en 1961, de même que l'AN 24, qui fut utilisé sur les lignes intérieures soviétiques.

Mais la véritable révolution du transport aérien s'accomplit avec les avions à **turboréacteurs**. Le 2 mai 1952, pour la première fois, un transport aérien régulier fut assuré par un avion à réaction. C'était le Comet 1, construit par De Havilland. Son premier vol remonte au 27 juillet 1949. Mis trop rapidement en service -compte tenu de son caractère très innovant- le Comet vit son avenir commercial compromis par les

Les principaux progrès des avions de transport commerciaux, à partir de 1970, sont dus aux avancées simultanées dans plusieurs domaines, tels que l'aérodynamique, la propulsion, les matériaux et les structures, l'avionique.

En ce qui concerne l'aérodynamique notamment, il faut citer les nouveaux profils d'ailes. En 1965, au centre de NASA-Langley, Richard. T. Whitcomb conçut un profil présentant un bord d'attaque très arrondi et une épaisseur d'aile évoluant très progressivement, de façon que l'écoulement de l'air à l'extrados ne présente pas de variations brutales de vitesse. Ces profils, que la NASA qualifia de « supercritiques ».

permettaient un gain notable sur le nombre de Mach de divergence de traînée, par rapport aux profils classiques.

De même, l'ONERA étudia, au milieu de la décennie 1960-70, des profils dont les propriétés pourraient être, aussi bien aux basses vitesses qu'en transsonique, meilleures que celles des profils utilisés jusqu'alors. C'est ainsi que le profil LC 85-64 (proposé par Louis Cabot) permettait d'obtenir, en transsonique, une répartition des vitesses locales extrêmement plate à l'extrados, avec des ondes de choc très reculées, sans décollement au bord de fuite.

L'ONERA poursuit ses études sur les profils, non seulement pour les

avions, mais aussi pour les hélicoptères. Comme pour les profils d'ailes d'avions, les objectifs étaient, pour les profils de pales, d'accroître le C_{ZM} et de reculer le Mach de divergence de traînée.

Ainsi, grâce aux nouveaux profils, les avions de transport tels que les Airbus purent voler à une vitesse de croisière économique plus élevée (Mach de croisière voisin de 0,8).

Les profils OA, conçus par l'ONERA en coopération avec Aerospatiale, et les nouvelles extrémités de pale de forme parabolique équipèrent les rotors des hélicoptères Gazelle, puis des Dauphin, Écureuil et Super-Puma.

accidents catastrophiques dus à la fatigue structurale de la cellule pressurisée. Après ces revers, De Havilland mit au point le Comet 3, puis le Comet 4. Celui-ci entra en service le 31 octobre 1959. Équipé de quatre réacteurs Rolls-Royce Avon, il pouvait transporter 100 passagers sur 5300 km, à la vitesse de croisière de 750 km/h.

À l'inverse du Comet, le Boeing 707 connut un énorme succès commercial. Ce quadriréacteur effectua son premier vol le 15 juillet 1954 et entra en service, en 1958, sur l'Atlantique Nord. Très vite commandé par de nombreuses compagnies aériennes, il permit à Boeing d'effectuer une entrée en force sur le marché du transport aéronautique. Il faut rappeler que Boeing s'appuya sur le marché militaire grâce au KC 135 (premier vol le 31 Août 1956) qui était très semblable au Boeing 707.

Par ailleurs, le Douglas DC8, quadriréacteur également, effectua son premier vol le 30 mai 1958 et fut mis en service un an plus tard. Comme le Boeing 707, le Douglas DC8 connut immédiatement une éclatante réussite commerciale. Le DC8 pouvait transporter jusqu'à 174 passagers sur 10000 km, à la vitesse de croisière de 900 km/h. Le Boeing 707 et le Douglas DC8 surclassaient largement les avions de transport intercontinentaux à hélices, qui disparurent progressivement de la compétition. Celle-ci fut fatale à Lockheed qui, en outre, avait été handicapé par les problèmes rencontrés sur son quadripulseur Electra.

En Grande-Bretagne, Hawker Siddeley sortit le Trident (avec ses trois réacteurs à l'arrière) mis en service en 1964. Vickers lança le VC10 (avec ses quatre réacteurs à l'arrière), qui fut mis en service en 1964 également.

Du côté soviétique, le premier avion de transport à réaction fut le Tupolev TU 104. Ce biréacteur effectua son premier vol le 17 juin 1955. L'IL 62 (quatre réacteurs à l'arrière) fut mis en service en 1963. Les biréacteurs Tupolev TU 124 et TU 134 sont également à signaler.

La formule des réacteurs à l'arrière avait été proposée, en antériorité mondiale, par Sud-Aviation avec Caravelle, dont le premier vol eut lieu le 27 mai 1955. Ce biréacteur, de conception purement française, présentait de remarquables qualités aérodynamiques : le 16 avril 1959, il effectua un vol plané de 265 km et atterrit à Dijon, 46 minutes après avoir survolé Orly à 12000 m d'altitude. Les qualités de Caravelle à l'atterrissage étaient également très appréciées des pilotes : l'appareil était soutenu par un matelas d'air résultant de l'effet de sol, très marqué sur une voilure basse exempte de nacelles de moteurs.

La percée de Caravelle, sur le marché court-courrier et moyen-courrier, fut analogue à celle du Boeing 707 et du Douglas DC8, sur le marché du long-courrier. Sa vitesse de croisière (750 km/h) était très supérieure à celle des avions à hélices. L'altitude de vol (9000 m) l'affranchissait des zones de cumulo-nimbus créant une forte turbulence, désagréable pour les passagers des avions à hélices. Cette altitude était aussi un facteur important de sécurité pour le survol de chaînes de montagnes. En outre, le positionnement des réacteurs à l'arrière était favorable du point de vue de l'acoustique interne. Rappelons aussi que c'était la première fois que les pilotes disposaient, sur un avion civil, de servo-commandes hydrauliques.

Malheureusement, Sud-Aviation ne sut pas exploiter pleinement l'incontestable avance de Caravelle. La coopération avec Douglas, entreprise en vue de faciliter l'accès au marché intérieur américain, a surtout aidé ce constructeur à réaliser le DC9. Cet avion vola pour la première fois le 25 février 1965. Il fut construit à un millier d'exemplaires et il survit encore aujourd'hui sous des formules améliorées, MD 80 et MD 90, vendues, à ce jour, à près de 1800 exemplaires. Le MD 95, moyen-courrier de 100 places, lancé par Boeing sous le nom de B717-200, est un lointain dérivé du DC9.

Mais le principal handicap pour le succès total de Caravelle fut de ne pas avoir été à l'origine d'une famille d'appareils offrant une large gamme de possibilités à l'utilisateur tout en lui garantissant une communauté de sous-ensembles, notamment de moteurs.

L'année 1958 est une date capitale dans l'histoire de l'aéronautique commerciale : pour la première fois, le nombre de passagers transportés par avion au-dessus de l'Atlantique Nord dépassa le nombre de passagers utilisant la voie maritime. L'arrivée, sur le marché, des quadriréacteurs Boeing 707 et Douglas DC8 offrit de nouvelles capacités de transport, avec des temps de vol nettement inférieurs à ceux des quadrimoteurs à hélices. Aussi, le trafic mondial des passagers aériens ne cessa-t-il de croître par la suite.

Pour faire face à cette augmentation rapide du transport aérien de passagers ainsi qu'à celle du transport de fret, deux voies se dégagèrent alors :

- l'avion de transport subsonique à large capacité ;
- l'avion de transport supersonique.

L'importance relative des difficultés techniques aurait pu conduire à explorer, en premier lieu, la voie de l'avion subsonique à large capacité. Paradoxalement, ce fut celle de l'avion de transport supersonique qui fut d'abord abordée.

Dès 1954, le Royal Aircraft Establishment (RAE) avait étudié des avant-projets de SST (Supersonic Transport). Cela conduisit les Britanniques à proposer, en 1959, de confier à l'industrie l'étude d'un avion volant à Mach 2 (deux fois la vitesse du son) et transportant 150 passagers sur le trajet Londres–New–York (5700 km).

En France, le Service Technique Aéronautique (STAé) ouvrit, en 1959, un concours d'avant-projets d'avions supersoniques transportant 60 à 80 passagers sur 3500 km. L'objectif était de mettre en service un moyen-courrier qui ne heurterait pas de front l'avion de transport supersonique long-courrier qui semblait devoir être développé par les Américains. En outre, cet appareil paraissait devoir être le successeur de Caravelle, d'où son nom initial de Super-Caravelle. En octobre 1961, le STAé retint la proposition de Sud-Aviation. Celle-ci faisait profit des caractéristiques de « l'aile gothique flamboyante », qui tire parti, au maximum, de la portance tourbillonnaire. Rappelons que l'Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (ONERA) s'était, dès 1950, intéressé aux ailes très élancées et avait mis en évidence le phénomène de portance tourbillonnaire sur ces ailes, à grande incidence.

Le 29 novembre 1962, était signé l'accord entre les gouvernements français et britannique lançant le programme Concorde. Cet accord présentait une ambiguïté dans les objectifs, car le programme prévoyait une version moyen-courrier et une version long-courrier trop proches l'une de l'autre.

Le lancement de ce programme Concorde fut, aux États-Unis, ressenti comme un nouveau défi, venant après celui du Spoutnik en 1957 et du vol spatial de Gagarine en 1961.

Alors que la PanAm avait signé, le 3 juin 1963, une option pour huit Concorde, le Président Kennedy déclara, le 5 juin 1963, que les États-Unis construiraient un SST qui volerait à Mach 2,2 + et transporterait 125 à 160 passagers, sur une distance de 3500 nautiques (6480 km). Les avionneurs Boeing, Lockheed, North American et les motoristes General Electric, Pratt et Whitney, Curtiss-Wright furent mis en compétition pour la phase 1 (janvier 1964). En mai 1964, la Federal Aviation Agency (FAA) lança la phase 2, avec, en concurrence :

- le Boeing B 733, à géométrie variable, Mach 2,7 ;
- le Lockheed CL 823, double delta, Mach 3.

Le projet Boeing, avec General Electric comme motoriste, fut retenu le 31 décembre 1966. Il fut ensuite modifié pour aboutir, en 1969, au B 2707-300, delta empenné, sans géométrie variable. Mais, en mars 1971, le programme SST américain fut stoppé.

L'avion soviétique, le TU 144, était beaucoup plus proche de Concorde (Mach 2+, alliage léger, double delta) avec, cependant, des différences :

- fuselage à section évolutive, avec 5 passagers de front dans la partie centrale (au lieu de 4 pour Concorde) ;
- moteurs à double flux et à réchauffe sur les deux flux ;
- entrées d'air, très longues, séparées, vers l'avant, en deux paires ;
- train principal rentrant vers l'extérieur (ce qui exigeait une surépaisseur locale des ailes) ;
- aile plane, non adaptée en écoulement tridimensionnel ;
- large usage du titane dans la construction de la cellule.

Moins bruyant que Concorde grâce à ses moteurs double flux, le TU 144 lui était cependant inférieur en efficacité propulsive en croisière : l'aérodynamique de la voilure, l'intégration moteur-cellule et, en particulier, les entrées d'air de Concorde (optimisées selon les conseils de l'ONERA) étaient nettement supérieures. Le vol supersonique de TU 144 semble n'avoir jamais pu se faire qu'avec post-combustion, d'où une consommation de carburant excessive. Son exploitation commerciale n'a pas été effectuée selon les critères occidentaux.

La comparaison de Concorde avec ses concurrents potentiels conclut nettement à son avantage : l'aérodynamique, la propulsion, la structure ont résulté de choix judicieux, compte tenu des techniques de l'époque. La controverse entre Mach 2 et Mach 2,7, entre l'aile gothique et l'aile à géométrie variable, entre la structure en alliage léger AU 2 GN et celle en alliage de titane, tourna entièrement à l'avantage de Concorde. Sur le plan technique, Concorde fut une réussite incontestable.

Le tunnel hydrodynamique

À l'instar de la cuve rhéoelectrique, le tunnel hydrodynamique est à la fois un excellent outil de recherche dans le domaine incompressible et un merveilleux moyen pédagogique. Il est, en outre, un appareil de démonstration qui fournit de splendides visualisations des écoulements. Le tunnel hydrodynamique de l'ONERA a été très utile lors du début du programme Concorde. Il a permis d'étudier, de façon fine, les tourbillons d'apex des ailes delta et de l'aile « gothique » de Concorde, et de mettre en évidence leur importance pour la sustentation à grande incidence et à faible vitesse.

L'ONERA dispose, à Châtillon, de deux tunnels produisant des écoulements de vitesses respectives 20 cm/s et 1,5 m/s, ainsi que d'une cuve destinée aux essais au point fixe (par exemple pour les rotors d'hélicoptères en vol stationnaire). La visualisation des écoulements s'effectue à l'aide de traceurs liquides colorés, de même densité que l'eau, émis sur la maquette, ou avec des bulles d'air réparties dans tout l'écoulement, ou encore avec des bulles d'hydrogène obtenues par électrolyse. Les filets colorés sont visibles sur toute leur longueur. Les bulles d'air ou d'hydrogène sont éclairées par des tranches de lumière. À ces techniques, traditionnelles mais portées à un haut degré de perfection, sont venues s'ajouter, à l'Institut de Mécanique des Fluides de Lille (IMFL), des techniques d'instrumentation usuelles en soufflerie telle que la strioscopie et l'interférométrie différentielle et, plus récemment, la vélocimétrie par images de particules, la vélocimétrie holographique, et l'association strioscopie - vélocimétrie holographique. Les tunnels ci-dessus sont verticaux et fonctionnent par vidange

d'un réservoir sous l'effet de la gravité. Le Centre d'Études et de Recherches de Toulouse (CERT) dispose d'un tunnel hydrodynamique horizontal où l'écoulement peut circuler en continu à 20 cm/s. Ce tunnel, doté d'un vélocimètre laser, est équipé d'un tapis roulant pour simuler les effets de sol.

Grâce aux visualisations de grande finesse qu'ils fournissent, les tunnels hydrodynamiques permettent d'interpréter des phénomènes complexes, difficiles à observer en soufflerie.

Il est remarquable que, malgré les différences considérables de nombres de Reynolds et de Mach, les écoulements à basse vitesse dans l'eau reproduisent, avec fidélité, les traits les plus marquants des champs aérodynamiques et, en particulier, les décollements et les tourbillons.

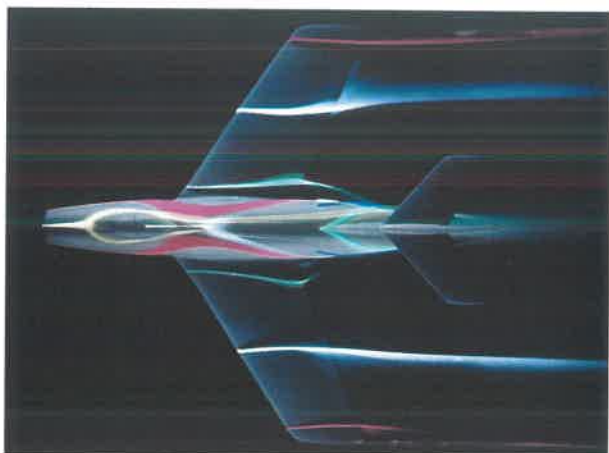
La simulation hydrodynamique demeure un moyen puissant, peu coûteux et d'exploitation rapide, pour aborder des problèmes très divers de mécanique des fluides. Au stade de l'avant-projet, comme pour l'analyse de phénomènes perçus lors des phases ultérieures du développement, le tunnel hydrodynamique est un auxiliaire précieux qui guide la réflexion et confirme l'intuition. Il peut aussi être un outil pédagogique de tout premier plan.

« Plume emportée par le vent, feuille morte tourbillonnant dans le remous de la rivière, frange d'écume au flanc de la vague marine, c'est toujours par l'élément étranger qu'il entraîne que l'écoulement du fluide, insaisissable dans sa pureté première, naît à la réalité sensible. C'est en personnalisant par la couleur quelques filets du milieu mobile, sans altérer perceptiblement leur identité mécanique, que l'expérimentateur s'efforce d'accéder à la description du mouvement, prélude à son étude scientifique.

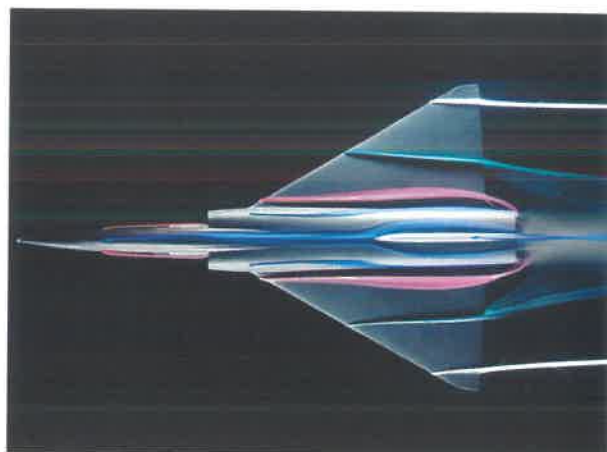
Les images qu'il obtient inspirent les schémas sur lesquels les mécaniciens bâtissent leurs représentations mathématiques. Au profit d'un plus grand nombre, elles nourrissent peut-être aussi de quelque aliment nouveau la rêverie ou la méditation ancestrale de l'homme devant la mouvance du fluide ».

Cette préface à l'ouvrage « Courants et couleurs » de l'Ingénieur Général Pierre Contensou, alors Directeur Général de l'ONERA, illustre parfaitement la puissance de la représentation des filets fluides pour l'étude de l'écoulement incompressible, aussi bien en aérodynamique à basse vitesse qu'en hydrodynamique. En outre, comme le signale H. Werlé, les visualisations par traceurs liquides ou gazeux effectuées dans les tunnels hydrodynamiques peuvent aussi faire l'objet d'une exploitation quantitative. Celle-ci peut être obtenue par chronophotographie : la trajectoire des bulles d'air en suspension dans l'eau peut être visualisée par des tirets gradués en valeurs de temps. De même, les visualisations par colorants peuvent conduire à déterminer l'espacement des tourbillons de Karman, ainsi que l'écoulement dans les zones de recirculation. L'intensité et la stabilité des tourbillons autour d'une aile delta peuvent aussi être précisées. L'écoulement autour d'une hélice d'avion ou d'un rotor d'hélicoptère est particulièrement complexe, car il est à la fois tridimensionnel et instationnaire. Cependant, les bulles d'air, visualisées grâce à des clichés de temps d'exposition court, permettent l'étude quantitative des tourbillons marginaux et du sillage des pales ; ainsi, le tunnel hydrodynamique peut fournir non seulement une visualisation des écoulements, mais aussi une approche quantitative permettant de dégrossir les concepts au stade des avant-projets.

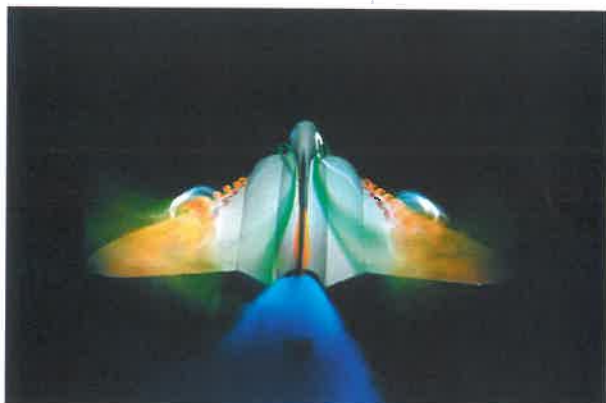
Visualisation d'écoulements au tunnel hydrodynamique de l'ONERA



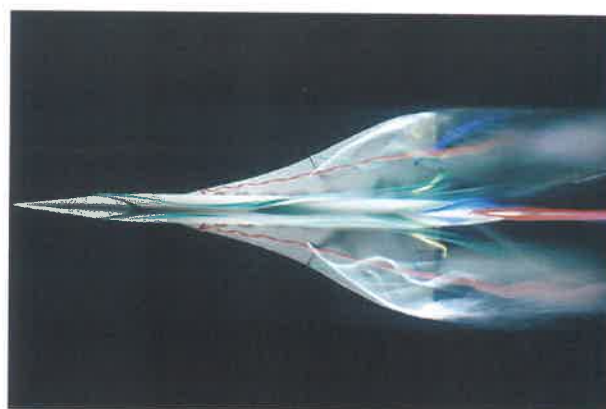
Mystère II ($\alpha = 0^\circ$)



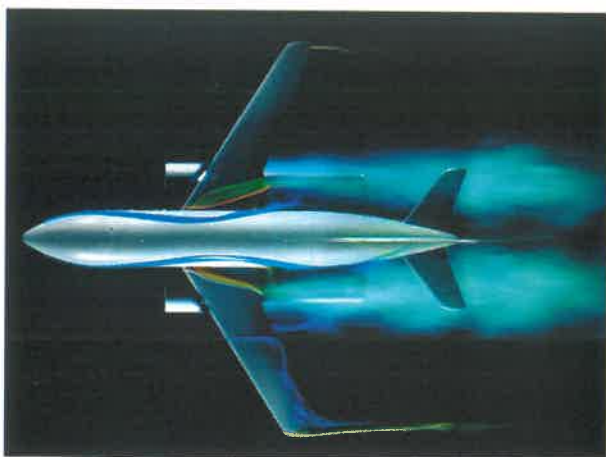
Mirage IV



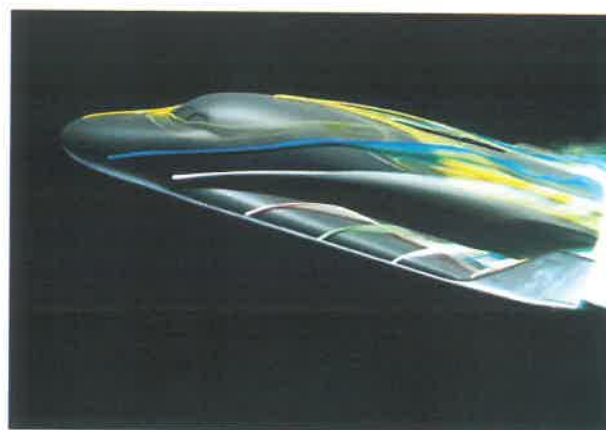
Douglas F5D ($\alpha = 15^\circ$)



Extrados du Concorde (à l'atterrissage)



Airbus A 300 ($\alpha = 2,5^\circ$)



Avion spatial Hermès



Sud-Aviation

Le Concorde

À travers sa conception, Concorde était un avion d'un type entièrement nouveau. Dès 1959, le Service Technique Aéronautique chargea l'ONERA, en complément des avant-projets des constructeurs, d'effectuer des études approfondies sur la forme de l'aile, les entrées d'air, les tuyères. L'aile delta avait déjà fait l'objet d'études théoriques et expérimentales : les tourbillons « en cornet » sur l'extrados des ailes delta à grande incidence avaient été mis en évidence par des essais en soufflerie dès 1950. L'étude théorique de l'écoulement transsonique autour d'ailes à forte

flèche fut entreprise par Robert Legendre. En 1955, Lucien Malavard détermina, à la cuve rhéoelectrique de l'ONERA, les caractéristiques aérodynamiques d'une aile delta, avec cambrure du bord d'attaque et vrillage du profil selon l'envergure. Roger Michel élaborait des formules relatives au frottement turbulent qui furent utilisées par Sud-Aviation en 1959. Les résultats des études de l'ONERA sur la voilure et les entrées d'air furent présentés aux services officiels et aux constructeurs au cours de réunions franco-britanniques en 1960. Les équipes de l'ONERA, avec P. Carrière, P. Bevière, M. Fenain et Ph. Poisson-Quinton

contribuèrent à l'optimisation aérodynamique de l'ensemble aile-fuselage.

Jacky Leynaert apporta une solution élégante aux problèmes posés par l'adaptation des entrées d'air.

Ainsi l'expérience acquise par l'ONERA, par un effort continu depuis 1949, sous l'impulsion des Professeurs Maurice Roy, Paul Germain et Lucien Malavard, fut déterminante. Elle permit aux constructeurs, et notamment à la brillante équipe de Sud-Aviation dirigée par Lucien Servanty, d'aboutir à une réalisation absolument remarquable du point de vue de l'aérodynamique, aussi bien à basse vitesse qu'en croisière supersonique à Mach 2.

Sa mise au point, sous la conduite d'André Turcat, qui procéda au premier vol en mars 1969, se déroula d'une façon très satisfaisante et permit sa mise en service commercial le 21 janvier 1976, par Air France et British Airways. Cependant, seize appareils seulement furent construits. Pourquoi une indéniable réussite technique ne se traduisit-elle pas par un ample succès commercial ? Essentiellement, pour deux raisons :

– **sur le plan économique**, les chocs pétroliers qui intervinrent juste avant l'entrée en service de Concorde bénéficièrent aux avions subsoniques équipés de moteurs à haut taux de dilution. En effet, la consommation spécifique, exprimée en kilogramme de kérosène par décanewton de poussée et par heure, pour les avions volant à Mach 0,8 à 11000 m d'altitude, est passée de 1,2 en 1960 (moteurs monoflux) à 0,63 en 1990 (moteurs double flux, à haut taux de dilution). Quant à Concorde, sa consommation spécifique, en croisière Mach 2 à 18000 m, est de 1,2 kg/daNh. La comparaison de ces valeurs de consommation spécifique montre l'importance du choc pétrolier sur les débouchés de Concorde : le prix du baril, qui était de 2 dollars en 1960 bondit à 14 dollars en 1974 et à 38 dollars en 1979. Les chocs pétroliers sont donc intervenus au plus mauvais moment pour Concorde ;

– **sur le plan de l'environnement**, Concorde eut à faire face à des attaques très vives concernant le bruit, le bang supersonique et l'effet éventuel sur la composition de l'atmosphère.

En termes de **bruit**, la comparaison avec les nouveaux avions subsoniques à moteurs à haut taux de dilution, comparaison déjà évoquée du point de vue de la consommation spécifique, conduisait à un handicap analogue pour Concorde. La raison en est d'ordre physique : les moteurs à haut taux de dilution éjectent les gaz brûlés et l'air de dilution à une vitesse moyenne beaucoup plus faible que les moteurs à bas taux de dilution. Il en résulte à la fois une meilleure efficacité propulsive -donc une plus faible consommation spécifique- et un niveau de bruit plus faible.

Le tableau suivant montre les progrès des avions subsoniques concernant le bruit :

Les progrès sur les turboréacteurs ont permis de réduire simultanément
– la consommation de carburant ;
– le niveau de bruit :

Période	Règlementation	Niveau de bruit	type d'avion
1955 - 1969	FAR 36-1	115 EPN dB	B 707, DC8
1969 - 1976	FAR 36-2	105-110 -d-	B 747*
1976 - 1990	FAR 36-3	95-102 -d-	A 320, B 767

EPN dB = équivalent perceived noise (décibels)

* dans ses premières versions

Les progrès sur le niveau de bruit ont été dus essentiellement à l'apparition de turboréacteurs à haut taux de dilution.

De nouveaux progrès sont prévus pour la prochaine décennie.

Pour Concorde, équipé de réacteurs à faible taux de dilution, les niveaux de bruit sont, en EPN db : 112,2 en latéral, 119,5 en survol, 116,7 en approche.

Du point de vue du bruit, Concorde se trouvait donc, dès sa mise en service en 1974, handicapé par rapport aux autres avions de transport. Cela conduisit à demander des dérogations, notamment pour l'atterrissage et le décollage de New-York Kennedy, et à se soumettre à des procédures spéciales destinées à éviter le survol de certaines zones autour de l'aéroport.

De plus, une nuisance spécifique à Concorde, parmi les avions de transport actuellement en service, est le **bang supersonique**. Lors du développement de Concorde, au début des années 70, de nombreuses études furent réalisées au sujet du bang et de ses effets, tant sur l'homme, l'animal et les constructions (vitreaux de cathédrales), que sur le déclenchement de certains phénomènes naturels (avalanches de masses neigeuses instables). Mais, en définitive, le survol des zones habitées fut interdit, en 1973, par le règlement FAR 91-95. Le vol de croisière supersonique n'est autorisé qu'au-dessus des océans ou des terres désertiques. L'intérêt de Concorde pour le vol transcontinental au-dessus des États-Unis (vol "coast to coast") ne peut donc être exploité.

Enfin, un troisième type de nuisance fit également l'objet d'une vive controverse avec les Américains. **Il s'agit de l'éventuel impact, sur l'ozone stratosphérique**, des oxydes d'azote émis par les turboréacteurs de Concorde en croisière supersonique. Un rapport américain présenta, en 1971, des conclusions alarmantes. En France, le Comité pour l'étude des conséquences des vols stratosphériques (COVOS) examina, de 1972 à 1976, les problèmes que pourrait poser le trafic commercial supersonique. La conclusion du COVOS fut :

« Une flotte d'une centaine d'avions de type Concorde produirait une réduction d'ozone impossible à déceler. Son incidence biologique serait tout à fait négligeable. Au cas où la flotte stratosphérique se développerait considérablement, on pourrait réduire le taux d'oxydes d'azote dans les effluents, mais la nécessité de modifier la combustion dans les moteurs n'apparaît point à l'heure actuelle ».

Quoi qu'il en soit, les considérations économiques renforcées par les craintes relatives à l'environnement stoppèrent la commercialisation de Concorde. À partir de 1972, United Airlines, PanAm, TWA, Japan Airlines annulèrent leurs options. L'autorisation d'atterrir aux États-Unis ne fut accordée aux quatorze appareils mis en service par Air France et British Airways que dans des conditions draconiennes, très préjudiciables au succès commercial.

À une brillante réussite technique succédait donc un grave échec commercial. Toutefois, il faut souligner que les quatorze Concorde en opération à Air France et British Airways donnent entière satisfaction, tant aux opérateurs qu'aux passagers, de sorte qu'il est envisagé de poursuivre leur exploitation jusqu'en 2005.

Avion	Masse au décollage (t)	Vitesse (km/h)	Passagers	Moteur	Observations
SO - 30 P Bretagne	18	420	30 à 45	2 Pratt et Whitney R - 2800	
Bréguet - 761 Deux ponts	42	365	130	4 SNECMA - 14 R	3 versions: fret passagers mixte
SE - 2010 Armagnac	67	435	84 à 107	4 Pratt et Whitney Wasp Major	

Tableau 3. Les avions de transport français - post 1945

Première génération : avions à moteurs à pistons et hélices, entrés en service en 1950

Nota : D'autres avions de transport avec moteurs à pistons et hélices furent ensuite réalisés et produits en série : Nord 2500 (Noratlas) et Transall (coopération franco-allemande).

Avion	Masse au décollage (t)	Vitesse (km/h)	Passagers	Moteur	Observations
Caravelle (certification : 1959)	47	800-850	80 (2400 km)	2 turboréacteurs Rolls-Royce Avon	remarquables performances aérodynamiques

Tableau 4. Les avions de transport français - post 1945

Deuxième génération : Caravelle (SNCASE, Pierre Satre)

Nota : Caravelle est le premier avion de transport français à réaction. L'installation des réacteurs à l'arrière est une innovation, au plan mondial.

Doté d'équipements avancés, Caravelle réalise, en 1962, le premier atterrissage automatique.

Sur le plan commercial, Caravelle a réussi une percée aux États-Unis. Mais ce succès ne fut pas exploité, faute de création d'une famille prolongeant les versions de base. L'emploi de moteurs à faible taux de dilution constitua ensuite un handicap, du point de vue de la consommation et du bruit.

Avion	Masse maxi au décollage (t)	Mach croisière économique	Passagers	Rayon d'action (km)	Observations
Airbus A310 (certification : 1983)	124	0,79	220	8900	Aérodynamique avancée (aile supercritique)
Airbus A300 - 600 (certification : 1984)	140	0,79	270	7800	

Tableau 5. Les avions de transport français - post 1945

Troisième génération : la période 1970 - 1985

Le programme Airbus, réalisé en coopération européenne (France, Allemagne, Royaume-Uni, Espagne), donne la priorité à la rentabilité : l'Airbus A 300 B2, certifié en 1974, est à l'origine d'une famille d'avions de transport à fuselage large, propulsés par deux réacteurs double flux, à grand taux de dilution, apportant économie de carburant et réduction du bruit.

Nota : L'avion de transport supersonique Concorde, certifié en 1976, a été étudié et réalisé en coopération franco-britannique. Les innovations (aérodynamique de la voilure, entrées d'air des réacteurs, commandes de vol électriques - avec secours mécanique - etc.) lui ont permis un brillant succès technique. Mais l'impact des chocs pétroliers et les contraintes en matière d'environnement ont empêché sa réussite commerciale.

Avion	Masse maxi au décollage (t)	Mach croisière économique	Passagers	Rayon d'action (km)	Observations
Airbus A 320 (certification : 1988)	75,5	0,78	150	5450	A 319 version raccourcie (124 places)
Airbus A 330 (certification : 1992-94)	212	0,82	300 à 330	8350	A 321 version allongée (186 places)
Airbus A 340 (certification : 1992-94)	257	0,82	260 à 300	13600	Quadriréacteur

Tableau 6. Les avions de transport français - post 1945 (en coopération européenne)

Quatrième génération : la période 1985 - 1995

Nota : L'Airbus A 320 inaugure une nouvelle étape technologique :

- consommation par passager-km inférieure de 20% à celle de l'A 300 ;
 - commandes de vol par minimanche latéral, entièrement électrique ;
 - l'utilisation généralisée de calculateurs numériques et d'écrans de visualisation polyvalents interactifs facilite le pilotage à deux.
- Ces innovations se retrouvent sur l'A 330 et l'A 340.

La cinquième génération, période 1995-2005, pourrait comprendre un avion quadrimoteur de 600 à 800 places (avec réacteurs de 40 t de poussée à taux de dilution de 10 pour obtenir une très faible consommation spécifique et un faible niveau de bruit au décollage).

La période 1995-2005 pourrait voir le lancement de la réalisation d'un nouvel avion de transport supersonique qui serait en exploitation après 2005.

Avion	Masse maxi au décollage (t)	Passagers	Mach maxi opérationnel	Altitude maxi opérationnelle (m)	Rayon d'action (km)
ATR 42-300 (1981)	16,7	48	0,55	7620	940
ATR 42-320	16,7	-d°-	-d°-	-d°-	925
ATR 42-400	17,4	-d°-	-d°-	-d°-	1380
ATR 42-500	18,5	-d°-	-d°-	-d°-	1875
ATR 72-200 (1986)	21,5	66	0,55	7620	1745
ATR 72-210	-d°-	-d°-	-d°-	-d°-	1570

Tableau 7. ATR - Avions de Transport Régional - biturbopropulseurs

Caractéristiques communes ATR 42/72 :

- section de cabine ;
- cockpit ergonomique avec avionique numérique ;
- visualisation sur écrans cathodiques ;
- aérodynamique avancée ;
- large emploi de matériaux composites ;
- GIE ATR : commercialisation et support de l'exploitation ;
- fabrication : Aerospatiale - Aeritalia, Turbopropulseur PW Canada, Hélices Hamilton standard - 4 pales en composite - trains d'atterrissage Messier.

Avion certification	Masse maxi décollage (t)	Passagers	Mach de croisière	Distance franchissable (km)	Motorisation poussée (daN)	Observations
Falcon 20 F 1965 (F20)	13	10-12	0,72	2600	2GE (CF700-2D) 2x2050	1 ^{er} vol en 1963 (Mystère 20) 1 ^{er} avion d'affaires à réaction français
Falcon 10 1973	8,3	9	0,75	2850	2 Garrett (TFE 731-2) 2 x 1510	Optimisation 3D de la voilure (meilleures performances à grande vitesse)
Falcon 50 1979	17,6	19	0,75	5800	3 Garrett (TFE 731-3) 3 x 1680	Efficacité aérodynamique de la voilure. Optimisation, en transsonique, du fuselage arrière
Falcon 900 1986	20,6	19	0,75	7400 (intercontinental)	3 Garrett (TFE 731-5BR) 3 x 2160	Diamètre du fuselage accru (2,5m) Matériaux composites pour les structures secondaires
Falcon 2000 1994	15,8	19	0,8	5500 "coast to coast" aux Etats-Unis	2 Garrett (CFE 738-1) 2 x 2600	Excellente intégration moteurs-cellule du point de vue aérodynamique Avionique très évoluée

Tableau 8. Les avions d'affaires FALCON (DASSAULT)

La famille Falcon utilise des technologies de pointe dérivées de celles utilisées pour les avions militaires Dassault (aérodynamique évoluée, avionique avancée, structure robuste). La sécurité, la fiabilité et la disponibilité ont été spécialement recherchées pour faire face aux conditions d'emploi très variables des avions d'affaires.

Ainsi, la voie de l'avion de transport supersonique, pour faire face à l'augmentation du trafic aérien, n'était pas, à l'époque du lancement de Concorde, la solution adéquate.

L'autre voie, celle de l'avion subsonique à large capacité, s'avéra plus fructueuse sur le plan commercial. Aux États-Unis, ce fut principalement Boeing, avec le quadri-réacteur long-courrier 747, en version passagers et en version mixte passagers-fret, qui exploita pleinement les débouchés possibles sur le marché. Boeing, avec le 747 et avec les moyens-courriers 727 et 737, acquit la première place, loin devant ses concurrents, américains ou autres.

En Europe, dès 1966, les trois principales compagnies, Air France, British European Airways et Lufthansa, avaient signalé leur besoin d'un avion moyen-courrier de 200 à 250 places. Ceci conduisit, fin 1968, à la proposition de l'Airbus A 300, de 250 places, équipé de deux moteurs identiques à ceux développés pour les triréacteurs longs-courriers.

Ce projet était proposé par Sud-Aviation et Deutsche Airbus, avec la participation privée de Hawker Siddeley HSA, le gouvernement britannique ayant retiré son appui, à la différence des gouvernements français et allemand. À partir de 1969, fut mis en

place le groupement d'intérêt économique (GIE) Airbus-Industrie, de droit français, auquel l'Espagne participe également par l'intermédiaire de CASA.

Les caractéristiques de l'Airbus A 300 convenaient parfaitement au marché d'un moyen-long-courrier pour les lignes transcontinentales aux États-Unis ou pour les lignes d'Extrême-Orient. Airbus ouvrait la voie du biréacteur de grande capacité utilisant les mêmes moteurs que les avions longs-courriers américains. À l'inverse de Caravelle, l'A 300 fut à l'origine d'une grande famille : la famille Airbus s'agrandit progressivement avec l'A 310, de capacité un peu inférieure à celle de l'A 300, puis avec les courts-courriers A 320, A 319, A 321 et enfin les longs-courriers A 330 (biréacteurs) et A 340 (quadri-réacteurs). Dans cette famille, les innovations se succédèrent : commandes de vol électriques, pilotage numérique, tableau de bord cathodique, etc. Ces innovations placèrent le GIE Airbus en deuxième position sur le marché mondial, derrière Boeing.

Ainsi, l'excellence des choix des objectifs commerciaux et la qualité des solutions techniques démontrèrent la valeur de l'industrie aéronautique européenne dans le domaine du transport aérien.



FIG. 12. – Maquette ATR 42 dans la soufflerie F1 de l'ONERA au Centre du Fauga-Mauzac

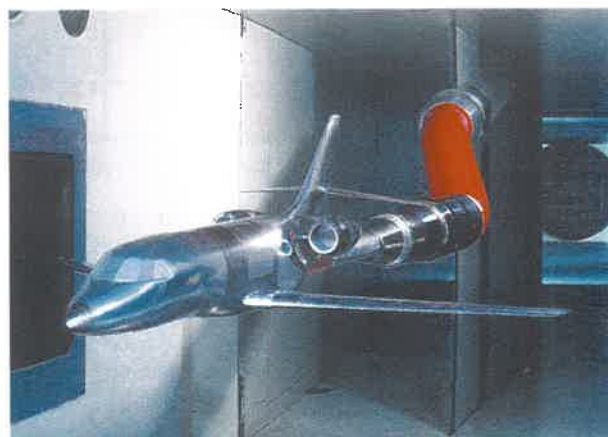


FIG. 13. – Maquette de l'avion d'affaires Falcon 2000 dans la soufflerie S2 de l'ONERA au Centre de Modane-Avrieux



FIG. 14. – Maquette Deutsche-Airbus d'A 330 dans la soufflerie F1 de l'ONERA au Centre du Fauga-Mauzac

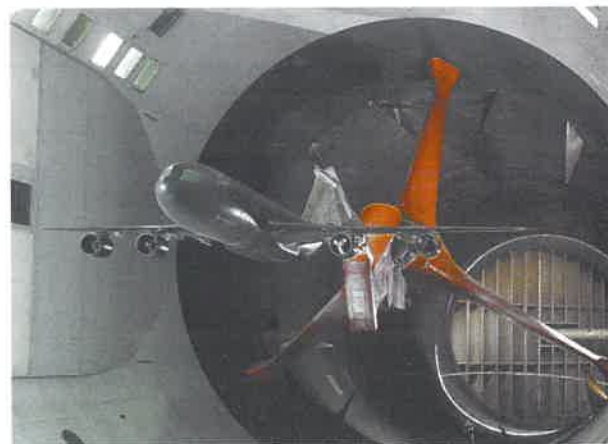


FIG. 15. – Maquette MBB d'Airbus A 340 dans la soufflerie S1 de l'ONERA au Centre de Modane-Avrieux