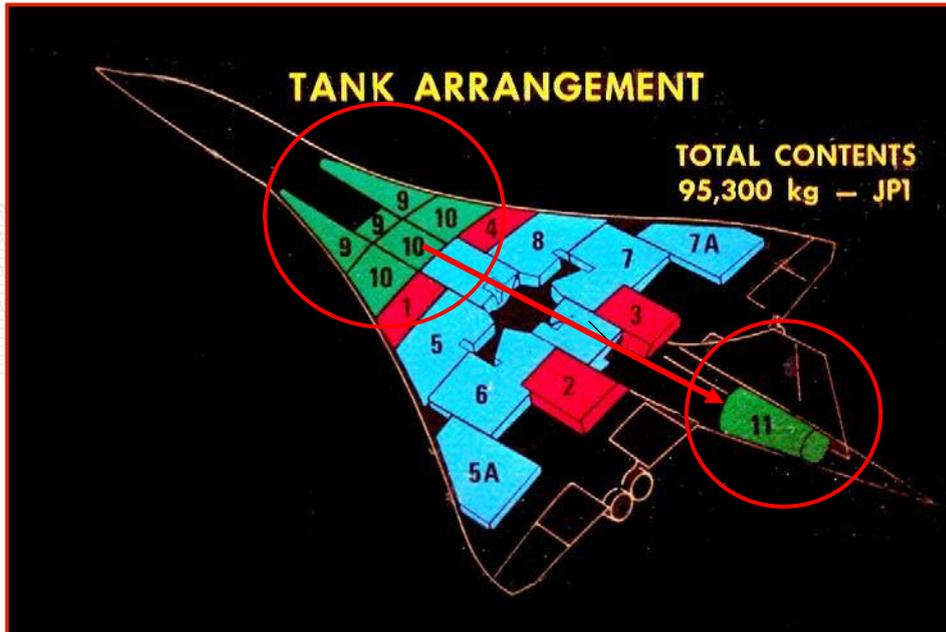
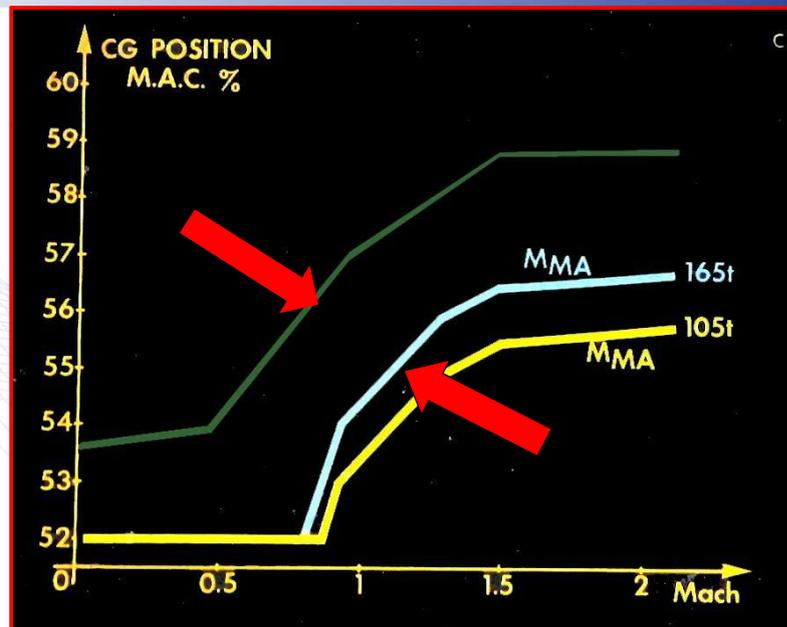


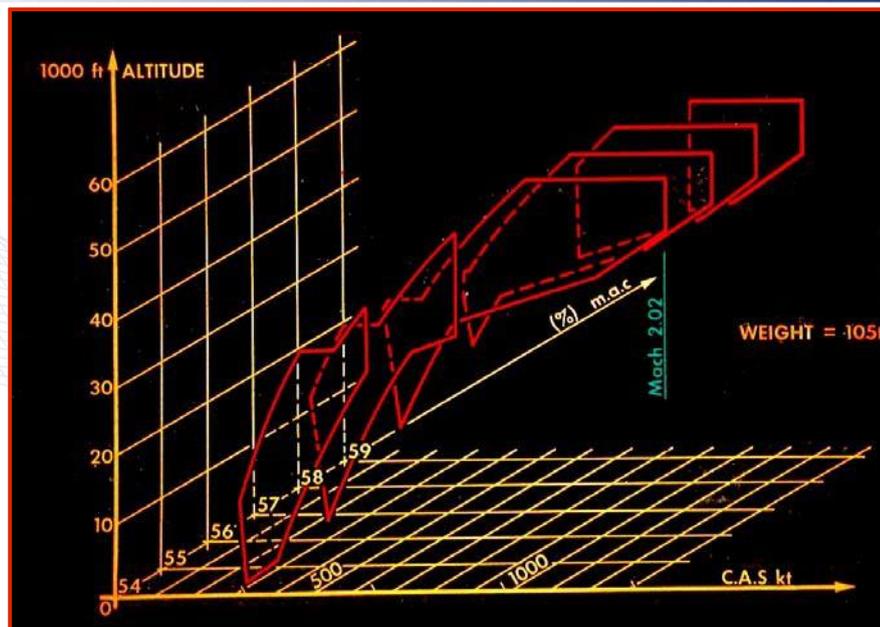
{23} L'équilibre longitudinal de l'avion est assuré entre le centre de gravité (cdg) de l'avion et le centre de poussée aérodynamique de l'aile par le braquage des élevons. Le cdg est toujours en avant du centre de poussée pour des impératifs de stabilité. Si la marge entre les deux augmente le braquage des élevons augmente lui aussi pour équilibrer l'avion. Mais leur puissance hydraulique est limitée et au-delà d'un certain braquage ils ne sont plus capables d'équilibrer les pressions aérodynamiques s'exerçant sur eux. Et de toute façon ils introduisent une forte traînée, résistance à l'avancement, source de consommation supplémentaire. Or le centre de poussée, à peu près stable en subsonique, se déplace rapidement vers l'arrière à M 1 pour se stabiliser ensuite au-delà de M 1,5. Un autre phénomène intervient aussi : Concorde est un avion civil dont la structure est souple contrairement aux avions militaires et les braquages excessifs des élevons tordent l'aile au point qu'au-delà d'un seuil leur efficacité est diminuée par cette torsion.



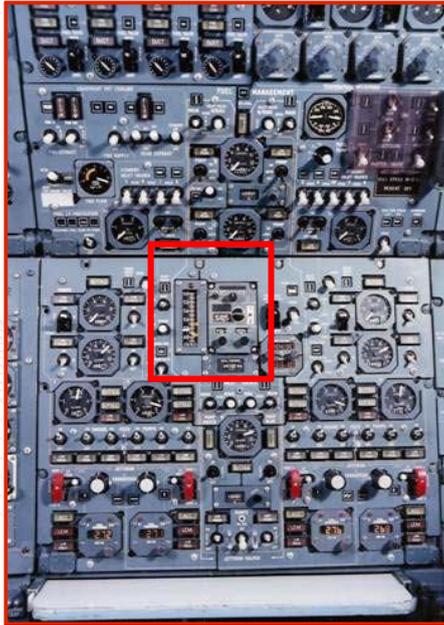
{24} Il faut donc que la marge entre les deux centres suive l'évolution vers l'arrière de la poussée aérodynamique. La seule masse disponible à cet effet est celle du carburant, et l'on transfère le carburant de l'avant vers l'arrière.



{25} Pour une vitesse donnée, un M donné, la marge entre les deux centres doit rester entre deux limites. Si le cdg (dont la position est exprimée en centrage, en % de la valeur de la corde de référence de l'aile) est trop en avant le braquage des élevons ne sera pas suffisant pour assurer l'équilibre : c'est le centrage limite avant. Si au contraire le cdg se rapproche du centre de poussée, lorsqu'il arrive près de lui la maniabilité devient très grande et l'avion devient impiloteable. C'est le centrage limite arrière. Entre ces 2 limites se trouve un « couloir » de centrage où doit se situer le cdg. Il faut donc situer le cdg dans une région d'efficacité non détériorée, donc suivre l'évolution du centre de poussée.



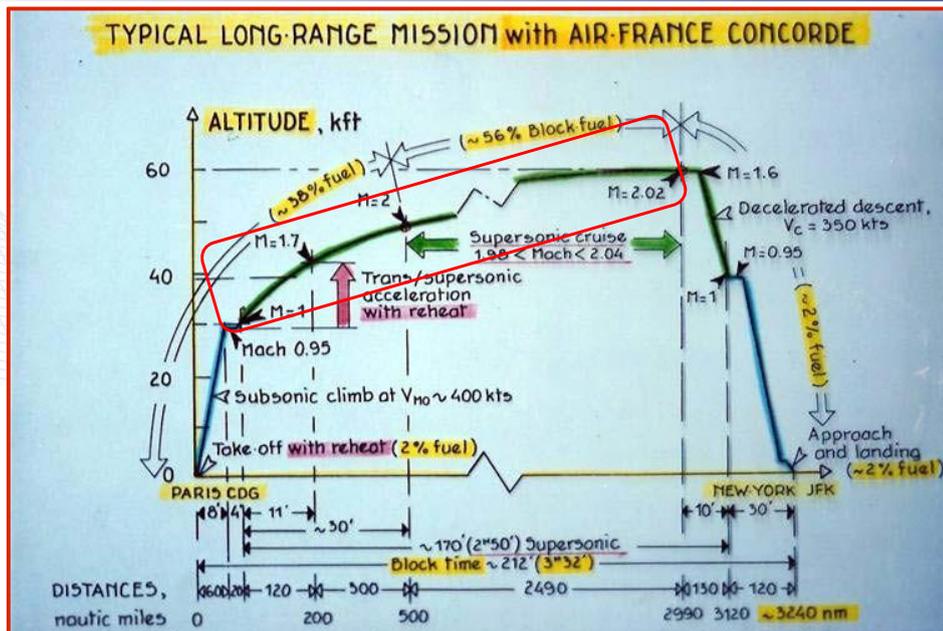
{26} Ceci est l'une des particularités majeures de Concorde : son domaine de vol, en plus de celui classique pour tous les avions subsoniques en vitesse et altitude, possède une 3^{ème} dimension qui est le centrage, la position du cdg. Car le centrage utilisé dans le subsonique ne permet pas le vol en supersonique, et plus important celui utilisé en supersonique ne permet pas l'atterrissage comme le montre le diagramme! D'où la grande attention portée au transfert du carburant qui est le seul paramètre modifiant ce centrage.



24 février 2009 – Médiathèque José Cabanis - Toulouse

27

{27} Donc, dès la mise de gaz le transfert de carburant est lancé vers le réservoir de queue. La commande du transfert vers les moteurs, ou vers l'arrière ou vers l'avant, la sécurité vis-à-vis des pannes possibles de pompes ou de vannes, a obligé à des commandes et contrôles multiples au panneau mécanicien, conduisant à une époque où le numérique n'existait pas à concevoir une présentation complexe afin de permettre la reprise en manuel des cas de situations délicates. Cependant lorsque tout marche correctement les transferts sont automatiques et commandés par le mécanicien, grand gestionnaire de la complexité des systèmes analogiques. Là encore on peut rêver de l'utilisation de ce numérique arrivé 20 ans plus tard. Ainsi pour le transfert vers l'arrière il y a une commande automatique avec un instrument permettant de vérifier que le centrage reste bien dans le couloir.



24 février 2009 – Médiathèque José Cabanis - Toulouse

28

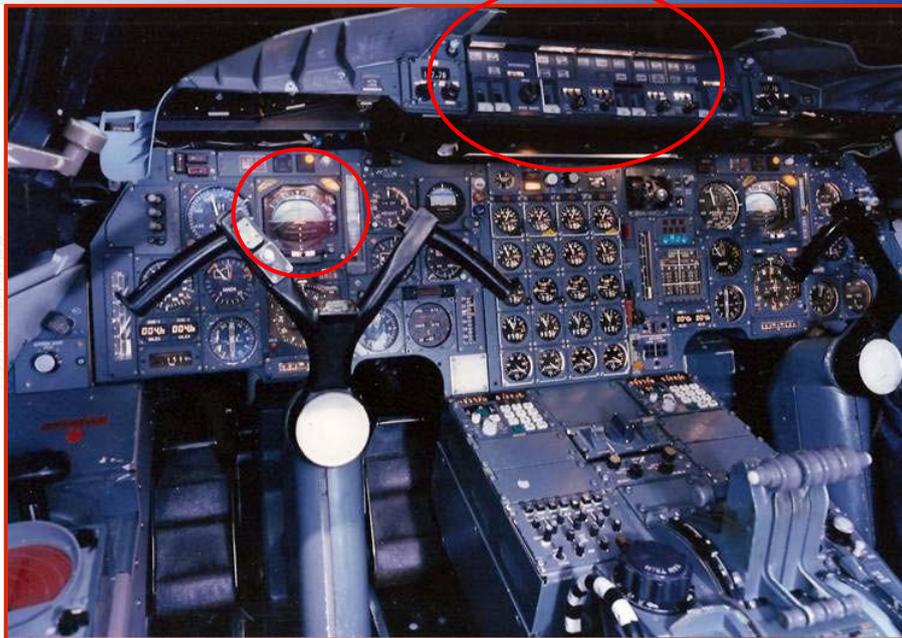
{28} Donc la montée est amorcée, avec variations simultanées des vitesse, altitude et centrage. Le cap est mis directement sur le point de rentrée de la zone de New-York, en suivant le grand cercle correspondant, l'analogue de la ligne droite sur la sphère terrestre.

A M 1,7 les réchauffes sont arrêtées et la montée se poursuit avec les moteurs plein gaz. Depuis le début de la partie subsonique le déplacement en cabine est possible car la pente de montée est assez faible. Le début de la croisière à M 2,02 survient lorsque la VC est de 530 kt, soit 2150 km/h ou 36 km/min en vitesse vraie, et l'altitude est de 51000 ft, soit 15600 m, La pression dynamique de l'air, 3 à 4 fois plus grande que celle d'un avion subsonique en croisière, est équivalente à celle d'un avion militaire en attaque au sol, la vitesse, autour de 600 m/sec est celle d'un obus anti-char, et la température d'impact sur la structure est autour de 125° C. Noter que la température maximum autorisée opérationnellement est 128°. A 15000 m la pression extérieure est 8,5 fois plus faible qu'au sol et à 18000 m 13,5 fois plus faible. Et les passagers sont confortablement installés et goûtent le confort prodigué par leur transporteur.

En cabine la pression est équivalente à celle de 2500 m d'altitude et la température est régulée autour de 20° C. Ceci est obtenu grâce au système de pressurisation performant et aux groupes de conditionnement d'air recevant l'air très chaud des compresseurs des moteurs, et qui en abaissent la température dans des turbines de détente et au-travers d'échangeurs de calories dont les sources « froides » sont l'air extérieur et le carburant lui-même comme déjà dit.

La croisière se poursuit avec les moteurs toujours plein gaz, à M 2,02 constant, au plafond de propulsion, c'est-à-dire qu'en conservant la vitesse de M 2,02 on ne peut plus monter à la masse présente de l'avion. Cependant le vol se passe en légère montée suivant le délestage de l'avion dû à la combustion du carburant: son allègement permet d'augmenter le

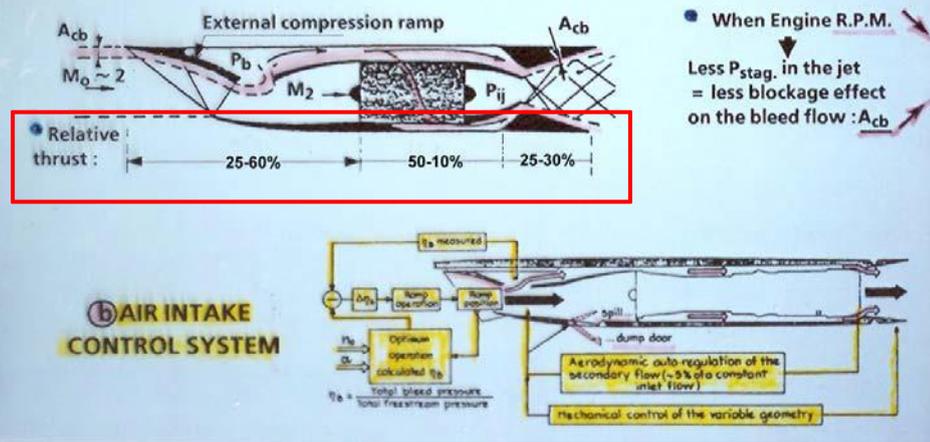
plafond de propulsion avec une consommation moyenne de 23 à 24 t/h soit près de 400 kg/min. Elle se termine 2h et 10 min après son début à une altitude de 18000 m.



{29} Cette phase de vol requiert une grande précision de pilotage car on se trouve dans une zone de performances délicate où par exemple une variation de 180 m (600 ft) d'altitude ou de 2°C de température extérieure par rapport à l'équilibre signifient une variation vitesse de M 0,01, alors qu'une variation d'assiette longitudinale de 1° amène une vitesse verticale de 600 m/min (2000 ft/min) évidemment excessive. Cette précision est obtenue grâce à celle des commandes de vol électriques et à celle, pour le pilotage manuel, de l'indicateur d'assiettes où 1/10° peut être détecté. Le pilote automatique s'en accommode sans problème. Il y a peu de turbulence dans la stratosphère, sauf parfois des turbulences thermiques prises en compte par le pilote automatique et les régulateurs d'entrées d'air.

CONCORDE SPIN-OFF : PROPULSIVE NACELLE OPERATION

(a) **INTERNAL AERODYNAMICS : THE "SECRET" OF THE INTERNAL FLOW STABILITY :**
Integration of the **BOUNDARY-LAYER BLEED** as a secondary flow in the nozzle :



24 février 2009 – Médiathèque José Cabanis - Toulouse

30

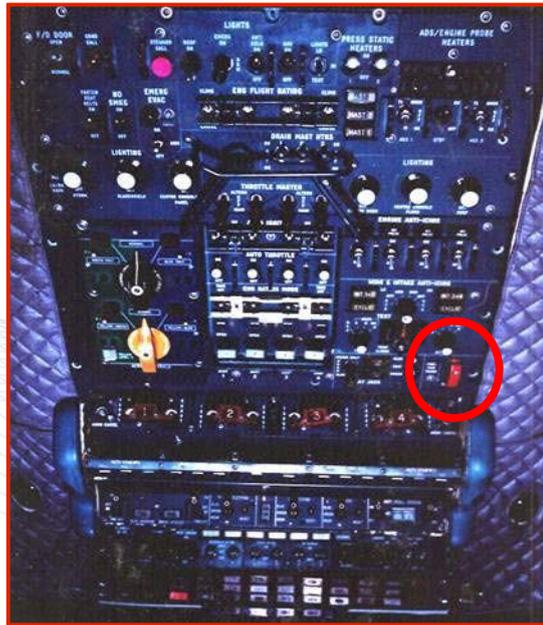
{30} Parlons des entrées d'air, des (gros) bijoux technologiques. Nous avons déjà vu leur rôle d'abaisser, en conservant un rendement de 96%, la vitesse de l'air de 600 m/sec à environ 150 m/sec devant les moteurs. La forme et la disposition des rampes permettent une configuration d'ondes de choc obliques capable de diminuer la vitesse de l'écoulement d'air en augmentant la pression avec un minimum de pertes. Pour une stabilité correcte de l'air en ralentissement, le passage à $M = 1$ doit se faire au droit de la section minimum. Ceci impose une régulation réagissant très vite à toute variation de débit du moteur, du M , de la température, de l'incidence, du dérapage car la position des ondes de choc est très sensible à ces paramètres, sous peine de distorsions du flux d'air provoquant des décrochages aérodynamiques du moteur et/ou de l'entrée d'air elle-même. Ces phénomènes ne sont pas graves en eux-mêmes mais sont désagréables pour les passagers car ils sont très bruyants, ébranlent la structure, et obligent le plus souvent à passer en subsonique. Ceux en ayant subi les effets en gardent un souvenir inoubliable. La mise au point a été délicate et ce sont les seuls équipements à avoir pu bénéficier de l'avantage du numérique. Le fonctionnement des moteurs et des entrées d'air est interconnecté de façon globale.

A noter un point fondamental n'existant pas aussi fortement en subsonique. Lorsqu'on fait le bilan des participations de chaque élément du groupe motopropulseur à la poussée en supersonique, on a la surprise de constater que l'entrée d'air y participe suivant les auteurs entre 25% et 40%, le moteur entre 50% et 10% seulement et la tuyère secondaire entre 25% et 30%. En revanche en subsonique la participation du moteur devient prépondérante, de 95%.



24 février 2009 – Médiathèque José Cabanis - Toulouse

{31} La vue du sol, surtout de la mer, et des phénomènes atmosphériques qu'on survole rapidement sans les subir car dans nos latitudes rares sont les nuages d'orage atteignant 15000 m, est un spectacle dont les pilotes ne se lassent jamais, mais ils sont seuls à pouvoir en bénéficier. Les passagers sont moins favorisés, par la limitation liée à la faible dimension des hublots dictée par des considérations réglementaires de sécurité en cas de perte accidentelle de 2 d'entre eux. Si cela survenait il faudrait plus de 5 min pour descendre de 18000 m vers 4500 m où la pression de l'air permet la survie, car l'énergie à dissiper, cinétique avec 600 m/sec et potentielle avec l'altitude de 18000 m, est considérable.



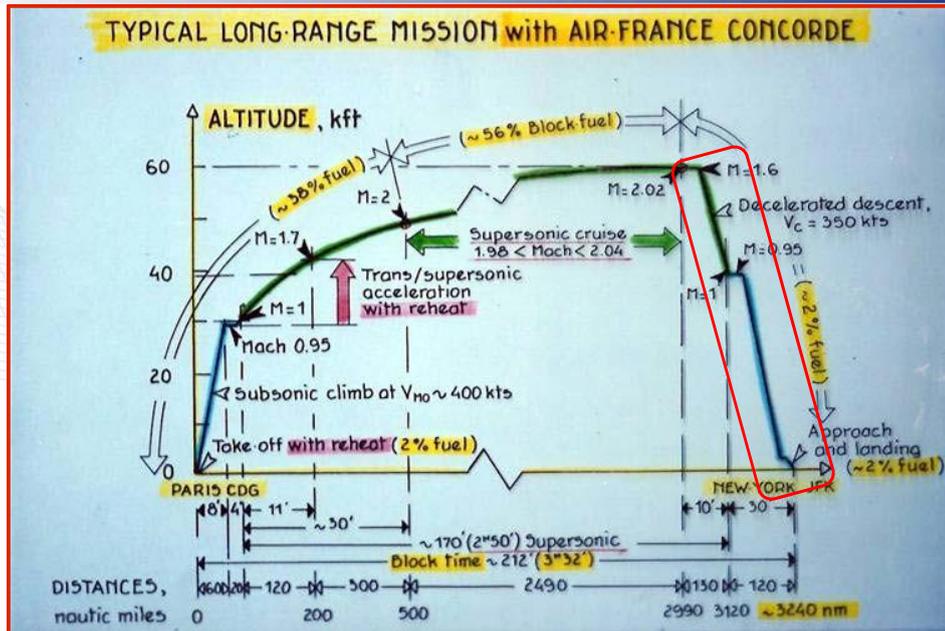
24 février 2009 – Médiathèque José Cabanis - Toulouse

32

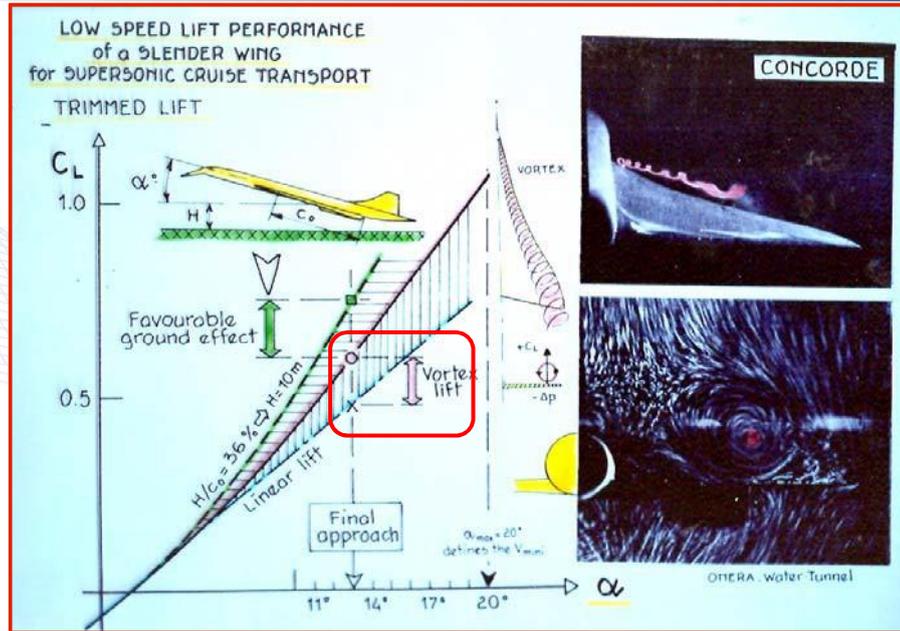
{32} Petite remarque : dans cette manœuvre le temps manquant pour s'occuper des détails, le transfert vital de carburant vers l'avant est lancé par la manipulation d'un seul interrupteur enclenchant les automatismes. Cette manœuvre a évidemment été démontrée.

Cependant il est permis parfois aux passagers d'observer un phénomène peu ordinaire : l'ébullition de l'eau de condensation emprisonnée entre les deux faces transparentes des hublots. Evidemment la face interne est à la température de la cabine.

En matière de sécurité deux autres problèmes potentiels sont traités. En stratosphère le taux d'ozone est important mais le passage de l'air dans les compresseurs des moteurs, avec les hautes températures ainsi atteintes, dissocie cet ozone avant l'entrée en cabine. Concorde est le 1^{er} avion posant le problème d'exposition des équipages et des passagers civils aux radiations à haute altitude. Cependant pour un même trajet, ici Paris-New-York, la quantité de radiation reçue est la même pour un subsonique et pour Concorde, ce dernier croisant dans un champ de plus grande intensité mais moins longtemps. De plus il y a dans Concorde une détection et un enregistrement permanents des intensités de radiations reçues. En cas de détection de rayonnement dangereux, d'une intense éruption solaire par exemple, une alarme oblige à une descente rapide, ce qui n'est jamais survenu à ma connaissance.



{33} Pendant la croisière la structure s'échauffe et la longueur du fuselage augmente d'environ 15 cm. La durée maximale possible de cette phase dépasse de peu 2h 20min, à la fois par manque de carburant, qui je le rappelle refroidit beaucoup de choses mais qui s'échauffe aussi au cours du vol, tout en étant évidemment nécessaire à l'atterrissage, et par avancement prohibitif du centrage. Dans notre cas la phase se termine au bout de 2h 10min, et se poursuit par une décélération et descente vers le point d'entrée dans le trafic normal américain prélude à la zone d'approche de New-York JFK. Pour cela la poussée est réduite sur les 4 moteurs. Tout comme pour l'accélération ce point d'entrée est choisi de façon à éviter un bang sonique sur les côtes américaines, bang qui cette fois-ci n'est pas une focalisation car la décélération n'en provoque pas. Le transfert de carburant est lancé vers l'avant pour un centrage correct en subsonique. Le parcours subsonique est suivi à M 0,95 et à l'altitude de 13000 m. La poursuite de la descente jusqu'à 3000 m s'effectue à la plus grande vitesse subsonique possible autour de 600 km/h, pour avoir une consommation minimale. Il n'y a pas d'aérofreins mais les réverses des 2 moteurs internes peuvent être utilisées si l'on désire augmenter le taux de descente. Puis arrive l'entrée de la zone d'approche où les caractéristiques de Concorde redeviennent prépondérantes. La visière est baissée et le nez est positionné à 5° .



{34} Ces caractéristiques sont dues essentiellement à la forme de l'aile. D'une part le très faible allongement voisin de 1 (rapport de l'envergure à la valeur de la corde de référence de l'aile) cause une forte augmentation de la traînée lorsque l'incidence augmente. Ce phénomène est courant sur tous les avions mais amplifié sur une aile delta/neo-gothique. D'autre part au-delà d'une incidence de 5° il se forme un tourbillon sur chaque aile, dont le sommet est attaché au point le plus en avant, dont l'intensité augmente avec l'incidence. Il établit une dépression sur l'extrados qui augmente le coefficient de portance comme le feraient des volets hypersustentateurs. L'incidence maximale pour Concorde est de 20° au-delà de laquelle on observe des instabilités longitudinale et latérale.



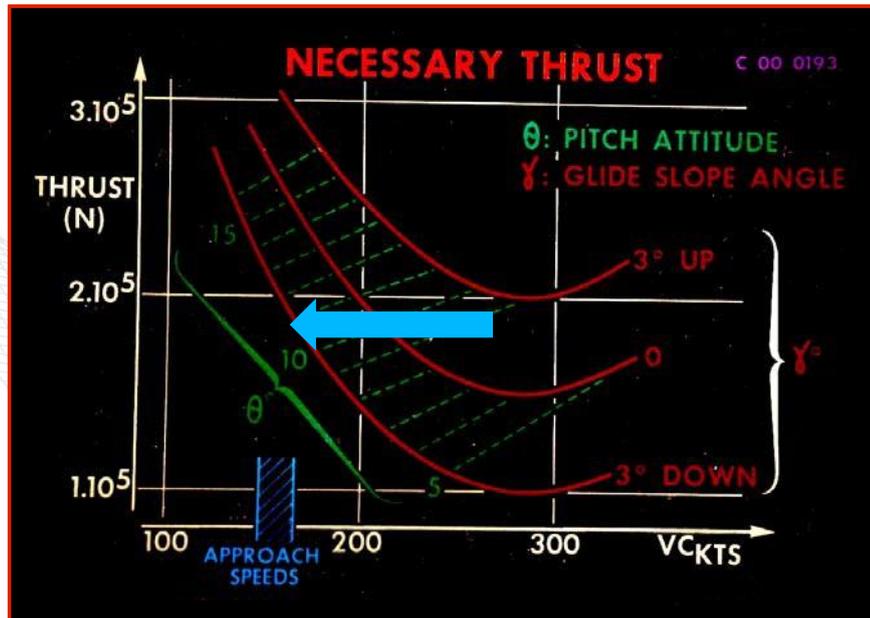
24 février 2009 – Médiathèque José Cabanis - Toulouse

35

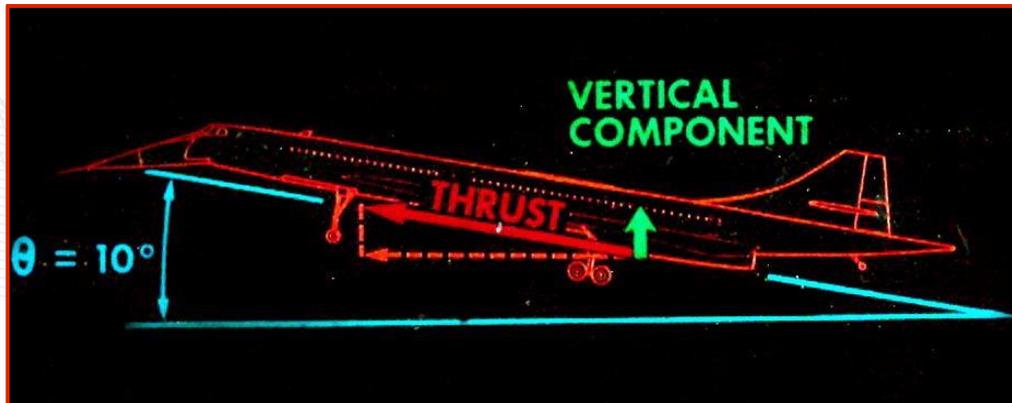
{35} La stabilité est assurée par l'accrochage des tourbillons à 2 petites surfaces placées au droit du cockpit (qui ne sont pas des marchepieds !). Des alarmes et des dispositifs de protection empêchent les pilotes d'approcher cette incidence limite dangereuse. De plus la vitesse est stabilisée par le contrôle automatique des moteurs, par les auto-manettes.

Tout cela amène plusieurs conséquences opérationnelles.

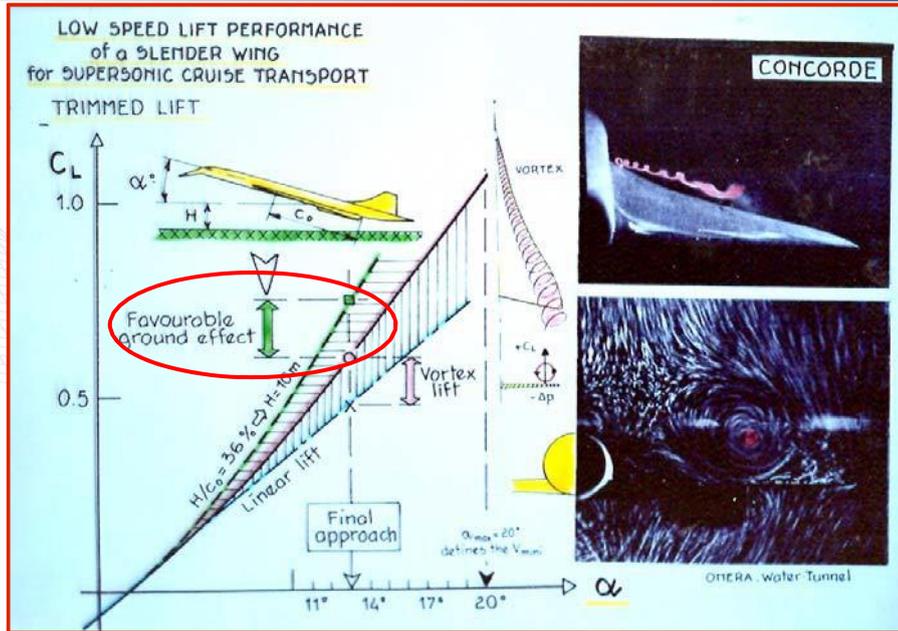
En dessous de 510 km/h (280 kt), l'incidence augmente rapidement entraînant l'augmentation de la traînée induite donc de la consommation de carburant.



{36} De plus, pour stabiliser une vitesse en vol rectiligne il faut, contrairement aux subsoniques, augmenter la poussée, donc la consommation et ceci d'autant plus que la vitesse est réduite. On n'a donc pas intérêt à réduire la vitesse trop tôt. L'absence de volets fait que la réduction de vitesse se fait en augmentant l'incidence, donc l'assiette longitudinale de vol. Comme cette incidence est de 6° à 460 km/h (250 kt) qui est la vitesse d'évolution dans la zone de contrôle de l'aéroport, de 9° à 390 km/h (210kt) qui est la vitesse d'approche intermédiaire, et de $13,5^\circ$ à 290 km/h (157 kt) qui est la vitesse d'approche finale, toute évolution dans la cabine difficile dans cette phase de vol durant 10 à 15 minutes. En vol horizontal la poussée totale varie de 15 t (≈ 15000 daN) pour 510 km/h (280 kt) à 28 t (≈ 28000 daN) pour les 290 km/h (157 kt) de la vitesse d'approche, près du double.



{37} Elle diminue vers 21 t en descente de 3° de pente vers la piste mais participe pour 3,5% à la sustentation avec l'assiette de l'avion de $10,5^\circ$ en finale ce qui n'est pas négligeable et oblige à ne pas réduire les gaz avant l'arrondi d'atterrissage. L'approche finale se fait avec le train sorti et le nez baissé à $12,5^\circ$ ce qui permet une excellente vue vers l'extérieur.



{38} Pour cet arrondi un phénomène s'interpose : le bord de fuite de l'aile étant près du sol l'air sous l'avion crée une surpression appelée effet de sol, accroissant la portance tout en créant un moment piqueur. Le résultat est que le pilote tire sur le manche sans que pratiquement l'assiette ne bouge et le contact avec le sol se fait à assiette constante, 3 h 30 min après la mise des gaz à Paris.



24 février 2009 – Médiathèque José Cabanis - Toulouse

39

{39} Dès la certification de l'avion l'atterrissage entièrement automatique aux conditions les plus restrictives, catégorie III, était possible ce qui permettait à Concorde de s'affranchir de beaucoup de conditions météorologiques limites.

Dès l'avion au sol les réverses des 4 moteurs sont activées et les freins au carbone très efficaces permettent un arrêt dans les limites normales des pistes. L'avion s'étant refroidi pendant la descente peut être reconditionné sans problème.

Un mot sur la formation des équipages assurée à ses débuts par Aéroformation. Ils venaient soit du B707 soit de Caravelle. Aucun n'avait volé en supersonique et ils n'avaient subi aucune sélection. Le taux de rejet a été de 5%, 3 fois plus que pour l'Airbus A300. La raison essentielle était la non adaptation à l'exigence de décisions rapides. Ce faible taux de rejet démontre l'excellence des solutions techniques et ergonomiques adoptées et celle de la formation mise en place.

Je n'ai donné ici qu'un bref résumé des conditions normales standard et certaines valeurs numériques sont indicatives. Il y a encore beaucoup à dire sur les nombreuses variations possibles autour de ces conditions, par exemple lorsque les conditions atmosphériques ne sont pas standard, lorsque certains systèmes ont des pannes, lorsque les aéroports n'étaient ni Paris, ni Londres, ni New-York, sur les multiples aventures survenues au cours des essais en vol. Ou bien sur les mille astuces introduites dans les systèmes pour qu'ils assurent ce qu'on attendait d'eux et dont une grande partie a permis aux Airbus d'assurer une percée technologique.

Concorde fut largement hors du commun et avoir participé à son programme fut fabuleux. Y avoir pris du plaisir est grandement en-dessous de la réalité.

Merci de votre attention...



24 février 2009 – Médiathèque José Cabanis - Toulouse

40

{40} Il faut remarquer que les 2 photos de début et de fin de présentation sont celles du Concorde 001.

Quelques chiffres

CARACTÉRISTIQUES (avion de série)

Envergure	25,60 m	Longueur	62,19 m
Hauteur	12,19 m	Surface de voilure	358,25 m ²
Masse à vide	79,26 T	Masse maxi au roulage	185,300 T
Masse maxi au décollage	185,070 T	Masse maxi autorisée à l'atterrissage	111,130 T
Charge marchande maxi	12,7 T	Capacité des réservoirs	117 285 L + 80 L de lubrifiants (soit 90T)
Nombre de réservoirs	13	temps de remplissage	55 min
Réacteurs	4 Olympus 593	Poussée totale	(4x17,26 T) soit 69 T
Distance franchissable	6 200 km avec 100 passagers	Charge alaire maxi	488 kg/m ²

Caractéristiques de l'avion de série {41}

Exploitation

Les chiffres, provenant de différentes sources sont approximatifs.

Nombre total d'heures de vol : 240000 auxquels il faut ajouter 5000 heures d'essais, certification et réceptions.

Total passagers transportés : 1,4 million

Parts respectives : British Airways 60%, Air France 40%.

Pilotes formés : BA 137, AF 137

Mécaniciens navigants : BA 64, AF 59

Personnel cabine : AF 333 hôtesses et 229 stewards

Notes : les photos proviennent de Sud-Aviation, d'Air France et d'Aéroformation; le F104G a été pris sur internet ; les diagrammes proviennent de l'ONERA et d'Aéroformation.

L'équipage de la photo n°4, prise dans le 001, est de gauche à droite, Hubert Guyonnet, Michel Rétif, Jean Pinet, Gilbert Defer.