

## UNE BREVE HISTOIRE DE L'ENTREE D'AIR CONCORDE

### DEFI MAJEUR POUR UN LONG COURRIER SUPERSONIQUE

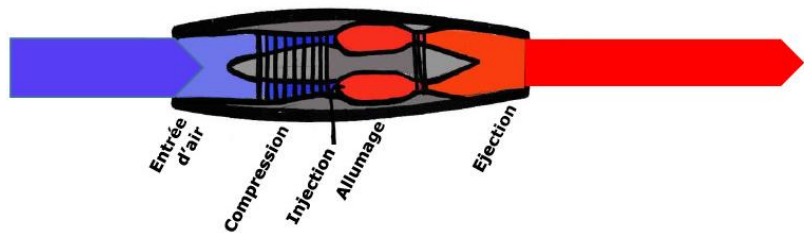
Par Pierre Grange, avec André Rouayroux

Cet article veut rendre hommage à Jacky Leynaert, aérodynamicien à l'ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques) dès 1956. Il n'a pas trente ans, lorsqu'il se voit confier la responsabilité d'un petit groupe de chercheurs en aérodynamique expérimentale (c'est-à-dire appliquée). Il étudie particulièrement l'entrée d'air bi-dimensionnelle qui, on le sait à l'époque, est prévue pour équiper le futur ATS (avion de transport supersonique). En 1960, il définit un mode de fonctionnement d'entrée d'air supersonique tout à fait unique. C'est « son » entrée d'air qui équipera Concorde. Sans ce coup de génie, Concorde n'aurait pu être.



La propulsion par réaction date de la fin de la guerre et tout le monde comprend vite qu'il s'agit là d'une révolution. En France, les foules se précipitent dans les meetings pour admirer l'incroyable vitesse de déplacement des chasseurs à réaction. Car qui dit avion à réaction dit vitesse ... La foule ne sait pas pourquoi mais elle le constate ! Quant aux pilotes, ils aiment tout de suite ces merveilleux engins et ne se posent pas vraiment la question de savoir « pourquoi ça pousse comme ça ... tout le temps ? ».

Le principe de fonctionnement d'un turboréacteur est relativement simple. Après être passé dans le canal d'entrée, l'air subit une compression puis une injection de carburant. Dans la chambre de combustion, le mélange air-kérosène est enflammé et se dilate violemment, poussé vers l'arrière. Par sa géométrie, la tuyère d'éjection accélère encore la vitesse du flux. L'objectif est d'éjecter à grande vitesse vers l'arrière une masse maximale de gaz pour que, par réaction, le turboréacteur se déplace vers l'avant. D'où l'appellation courante de moteur à réaction.



Une particularité du turboréacteur : il est constitué d'ensembles tournants composés d'une multitude d'ailettes. Pour être opérationnel, cela impose que, dès le premier étage du compresseur, le flux d'air soit à vitesse subsonique, ce qui risque de poser quelques problèmes pour un avion supersonique mais n'anticipons pas !

Tout pilote se souvient de « son » premier réacteur. Pour ma part, je garde un souvenir ému du Morane Paris, un petit biréacteur épatant. Les sensations de pilotage étaient bouleversées ; plus de grand tremblement de la structure, place au sifflement des turbines et à la pure trajectoire ; fini la traction de l'hélice, place à la poussée du réacteur. La poussée, un mot magique que se partagent ingénieurs et pilotes. On pilote à la poussée et surtout, il n'y a plus d'interaction entre régime moteur et équilibre du vol. Sur un avion à hélice(s), toute augmentation de vitesse de rotation des pales perturbe le courant d'air qui entoure l'avion. Les effets secondaires, véritable cauchemar du pilote débutant, sont constants : chaque augmentation de puissance nécessite généralement de modifier les calages de profondeur et de direction et cela jusqu'à la prochaine action sur la manette des gaz.

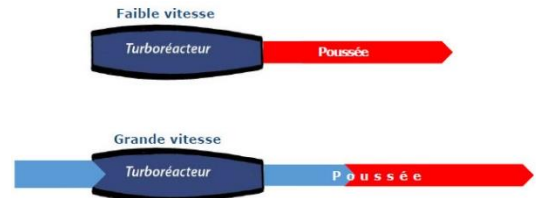


Sur réacteur quand on met les gaz l'avion accélère, un point c'est tout ! La trajectoire reste inchangée et la poussée reste constante malgré la vitesse qui augmente. Au bout d'un moment, toutefois, la résistance aérodynamique à l'avancement (*la traînée*) qui augmente en fonction du carré de la vitesse, finit par venir à bout des velléités d'accélération. En tout cas, très rapidement après le décollage, le petit Morane Paris accrochait sa vitesse de croisière de 300 nœuds (540kmh) et c'était un pur délice. Dans le sens de la décélération, là aussi, gros changement par rapport à l'hélice qui freine fort lorsqu'on réduit la puissance ; un « jet », lui, ne veut pas ralentir et il faut souvent l'aide d'aérofreins pour ne pas sortir du cadre altitude-vitesse qu'on se fixe, en descente ou en approche. Une révolution également pour les pilotes.

## TEMOIGNAGE

**La poussée reste donc constante avec la vitesse ?** Ce prodige vient, en partie, d'un élément souvent négligé et que l'on pourrait presque prendre pour un ornement décoratif : l'entrée d'air. Elle joue ici un rôle capital. Ce cylindre en tôle, placé en avant du compresseur, canalise le flux d'air et, dans toutes les configurations de vol, permet la bonne alimentation du moteur en lui fournissant un écoulement uniforme, une veine d'air parfaite. C'est son rôle évidemment mais ce qu'on oublie de dire c'est qu'à partir d'une certaine vitesse, lorsque l'avion vole, l'entrée d'air joue aussi le rôle de compresseur statique, en récupérant l'énergie due à la seule vitesse d'avancement de l'avion. Plus on va vite, plus on comprime l'air avant ingestion par le moteur ; en conséquence la pression de sortie et la vitesse d'éjection, sont augmentées d'autant.

Ce qui génère la poussée c'est le débit (massique) d'air accéléré dans le réacteur et éjecté **à une vitesse supérieure à celle de l'avion**. Le débit augmente avec la vitesse de l'avion grâce au surcroît de compression généré par l'entrée d'air. En revanche, lorsque l'avion accélère, la différence entre vitesse d'éjection et vitesse avion diminue de sorte que la poussée est quasiment constante. Pour le pilote, **le moteur garde sa poussée**



En arrivant sur réacteur tout pilote découvre aussi un nouvel instrument de pilotage : le machmètre. Le nombre de Mach est le rapport entre la vitesse du mobile et la vitesse du son (à Mach 1, on vole à la vitesse du son, à Mach 2, on vole à deux fois la vitesse du son). S'il pilote un avion supersonique, le pilote doit savoir quand il franchit Mach 1 car, au-delà, les lois aérodynamiques changent du tout au tout. Si son appareil n'est pas supersonique, il doit néanmoins savoir où il se situe par rapport à la vitesse du son car, les fameuses ondes de choc supersoniques apparaissent tout autour de l'appareil dès Mach 0.7 ou 0.8 et influent fortement sur la consommation en carburant.

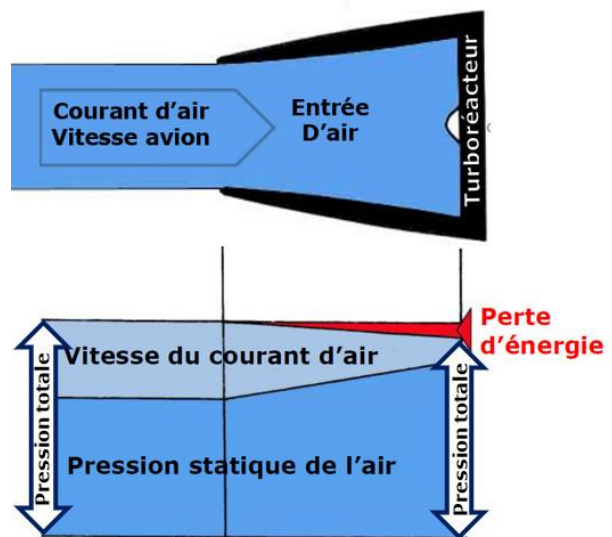
Pour analyser les schémas qui vont suivre, on se place à bord d'un avion près d'un hublot et on observe le moteur droit. L'entrée d'air est immobile ; c'est l'air qui se déplace de gauche à droite et s'engouffre dans le moteur à la vitesse de l'appareil.

Comme on l'a dit, l'entrée d'air participe à la propulsion en jouant le rôle de compresseur statique. Encore faut-il qu'elle le fasse en perdant le moins possible d'énergie au cours du processus. C'est là qu'intervient la notion de **rendement d'entrée d'air**.

Une veine d'air dispose d'une énergie qui se traduit par sa pression totale, somme de la pression statique de l'air et de sa vitesse. C'est cette pression totale que l'on ressent lorsqu'on passe sa main par la fenêtre d'une voiture.

**Le rendement d'une entrée d'air est le rapport entre la pression totale récupérée à l'entrée du turboréacteur et la pression totale mesurée avant l'entrée d'air.** Un rendement de 100% signifie qu'il n'y a aucune perte d'énergie dans la compression.

Les entrées d'air subsoniques atteignent des rendements de plus de 99% car les seules pertes d'énergie sont dues aux faibles frottements le long des parois.



**Autrement dit, le rendement mesure la perte d'énergie subie dans l'entrée d'air.**

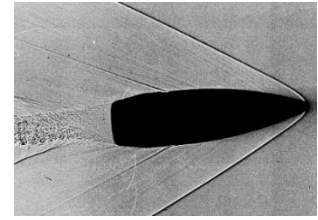
**Ce « manque à gagner » peut se traduire en charge marchande.**

**Pour Concorde, sur Paris New-York : 1% de rendement d'entrée d'air équivaut à 3 passagers**

## TEMOIGNAGE

Si maintenant la vitesse du courant d'air est supersonique, la tâche de l'entrée d'air se complique car, comme il a été dit plus haut, un turboréacteur ne peut ingérer que de l'air à vitesse subsonique. En conséquence, le flux d'air doit être ralenti jusqu'à une vitesse très subsonique (de l'ordre de Mach 0.6) or **une veine d'air supersonique ne sait pas ralentir sans passer par un ou plusieurs « chocs »**.

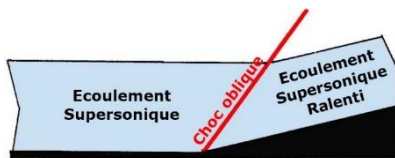
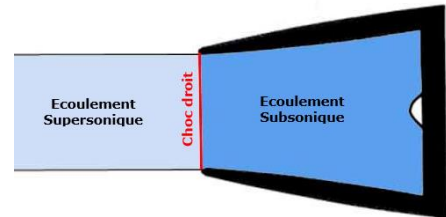
Une onde de choc est une transition brutale dans la pression de l'air, une zone de surpression. Les premières ondes de choc ont pu être photographiées au 19<sup>ème</sup> siècle autour des seuls engins supersoniques de l'époque : obus et autres balles de fusil. Elles apparaissent clairement sur la photo comme des lignes de surpression.



Balle de fusil à Mach 2

Il y a des chocs droits et des chocs obliques. Au travers d'un choc, qu'il soit droit ou oblique, il y a compression. Dans les schémas qui suivent, sont représentés : en bleu clair l'air à vitesse supersonique, en bleu foncé l'air subsonique, en rouge les ondes de choc.

Le choc est droit lorsque l'écoulement supersonique rencontre un obstacle. A travers un choc droit, il y a compression et l'écoulement est subsonique. C'est comme ça, c'est une règle ! Il paraît donc évident que si le Mach avion est élevé, la perte d'énergie sera très importante du fait de la brutale décélération.

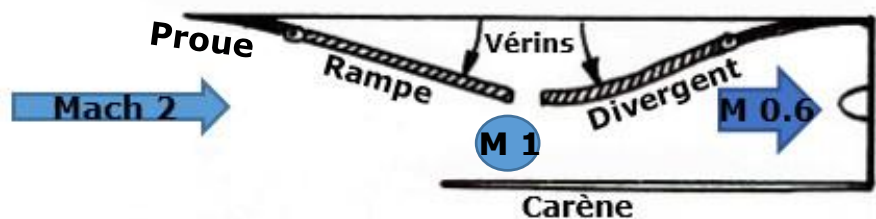


Lorsque l'écoulement est dévié, il y a un choc oblique qui, comme tous les chocs, comprime l'air. La vitesse de l'écoulement faiblit mais reste supersonique. La perte d'énergie est fonction de l'amplitude de la déviation. Petite déviation égale faible perte d'énergie. Donc, avec une succession de petites déviations, **on va pouvoir ralentir et comprimer le flux avec un bon rendement.**

Dans une entrée d'air supersonique, il faut donc faire subir au flux d'air un fort ralentissement sans trop perdre d'énergie. Ce n'est pas trop difficile tant qu'on reste en transsonique. Dans la décennie 50 – 60, lorsque les avions d'armes tentent de voler en haut supersonique, cela devient un défi majeur posé aux aérodynamiciens car il faut apprivoiser les ondes de choc. L'entrée d'air devient complexe et mobile. Complexe par son principe qui est de décélérer la veine d'air au travers d'une succession d'ondes de chocs obliques de faibles intensités qui résultent de déviations successives. Lorsque la vitesse de la veine d'air est suffisamment ralentie (entre Mach 1.2 et 1.4) un choc droit permet de passer l'écoulement à vitesse subsonique. Il ne reste plus alors qu'à ralentir encore le courant d'air au travers d'un divergent, c'est-à-dire en élargissant la section de passage de l'air, pour atteindre la vitesse demandée par le turboréacteur : Mach 0.6. Difficulté supplémentaire, toute cette mécanique doit être mobile pour être capable de s'adapter aux variations de vitesse de l'avion ainsi qu'aux changements de régime moteur.

En 1960, ce sont des entrées d'air dites bi-dimensionnelles qui sont prévues pour Concorde. Elles équipent à cette époque le bombardier stratégique Vigilante.

### Entrée d'air bidimensionnelle

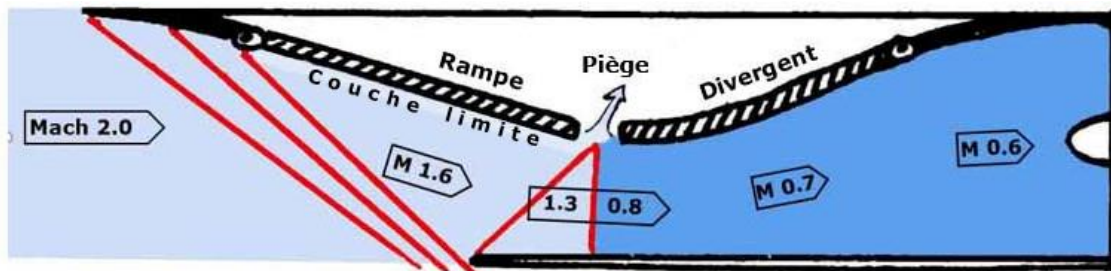


Vue de face, l'entrée d'air bi-dimensionnelle est rectangulaire. Le flux d'air s'engouffre entre la partie basse, appelée carène et un ensemble mobile composé de deux grandes plaques, la rampe et le divergent, qui sont couplées et activées par des vérins hydrauliques. L'air supersonique est ralenti à la proue et le long de la rampe par une succession d'ondes de chocs obliques de faible intensité. L'ensemble rampe-divergent est réglé pour que le flux atteigne Mach 1 au point de passage le plus étroit. Ensuite, selon les lois aérodynamiques subsoniques, la vitesse du fluide continue à diminuer dans le divergent, tout en poursuivant sa compression. Les vérins positionnent l'ensemble rampe-divergent pour qu'en permanence, le turboréacteur soit alimenté par une veine d'air à Mach 0.6.

**Plus la vitesse de l'avion augmente, plus la rampe et le divergent s'abaissent.**

## TEMOIGNAGE

Une particularité, le « piège à couche limite », cet espace se situe au plafond de l'entrée d'air entre les deux parties mobiles : la rampe et le divergent. Son rôle est le suivant : l'air qui a longé la rampe a perdu de son énergie par suite du frottement avec la paroi. Cette fine couche d'air, appelée « couche-limite » ne doit pas rencontrer, en aval, la pression plus élevée de l'entrée d'air (en bleu foncé) ; aussi la dévie-t-on vers la cavité aménagée au-dessus du choc droit terminal. Sans ce piège, l'air de la couche-limite serait refoulé vers l'amont en créant une forte perturbation et une dégradation de tout l'écoulement.



**Schéma de fonctionnement d'une entrée d'air bidimensionnelle aux standards de l'industrie en 1960, telle que celles qui équipent alors le chasseur bombardier américain Vigilante.**

*Nota : en rouge les ondes de choc obliques et droites*

**Plus la vitesse de l'avion augmente, plus la rampe et le divergent s'abaissent.**



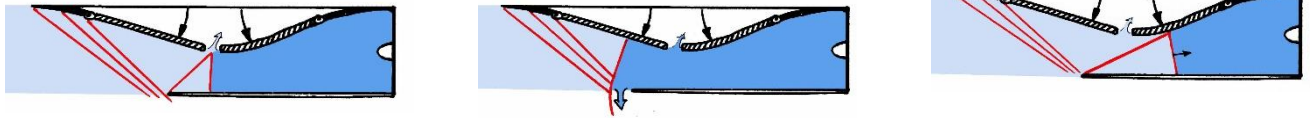
En 1960, l'état de l'art en la matière est figé. Les experts en sont d'accord, on ralentit le courant d'air par un jeu d'ondes de chocs obliques et on termine, bien à l'intérieur de la prise d'air, par un choc droit. Ce mode de fonctionnement est appelé à CSI (Compression Supersonique Interne) car la veine d'air ne devient subsonique qu'à l'intérieur de l'entrée d'air. C'est ce mode de fonctionnement qui est prévu en 1962 pour Concorde.

Le défaut de ce système est son instabilité ; à la moindre variation de régime moteur, l'onde de choc terminale est expulsée et provoque un violent pompage d'entrée d'air difficile à récupérer. Le pompage est un phénomène redouté de tous les équipages d'avion supersonique. Outre l'inconfort et le stress qu'il procure en donnant l'impression de rouler en F1 sur de la tôle ondulée, il entraîne une perte instantanée de la poussée qui a pour résultat d'entraîner l'avion en descente rapide. Malgré l'excellence des entrées d'air sur Concorde, chaque navigant(e) et de nombreux passagers, ont de belles histoires à raconter sur ce phénomène brutal qui survenait parfois à la suite d'une panne de calculateur ou, plus grave, en conséquence d'un problème hydraulique.

*« Mach 1.7, coupure des réchauffes ! » annonce le mécanicien navigant. Par cette lumineuse matinée de janvier, c'est mon troisième vol en adaptation en ligne sur New-York. Je commence à m'habituer à la furia des décollages et au slalom spécial antibruit qui s'en suit. La coupure des réchauffes à Mach 1.7, pour Concorde, c'est le début de la croisière, le moment où le calme s'installe. J'engage le pilote automatique et recule légèrement mon siège. Cool ! Quelques minutes plus tard, en approchant de Mach 2 à 50 mille pieds et suite à la perte de deux circuits hydrauliques, l'alarme « Intake » rouge sonne la fin de la courte récréation. Sans alimentation des vérins de rampe, les entrées d'air des moteurs 1 et 2 sont figées. Le temps d'appliquer les premières procédures et un double pompage d'une violence phénoménale se déclenche. En voyant l'amplitude avec laquelle, devant mes yeux, la longue visière est secouée alors que nous pesons près de 160 tonnes, je réalise l'énergie mise en cause dans ce phénomène. Une seule solution : réduction des 4 moteurs et mise en descente. Concorde est un très mauvais planeur, surtout en supersonique et nous dégringolons comme des fous. Nous nous rétablissons en subsonique à 31 mille pieds ; il ne reste plus qu'à rentrer à Roissy et, dernière mauvaise surprise, cela prendra deux fois plus de temps qu'à l'aller !*

## TEMOIGNAGE

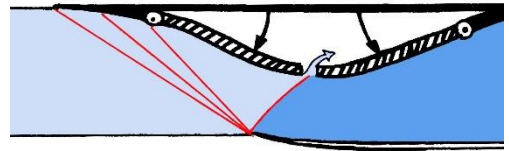
### Qu'est-ce que le phénomène de pompage d'entrée d'air ?



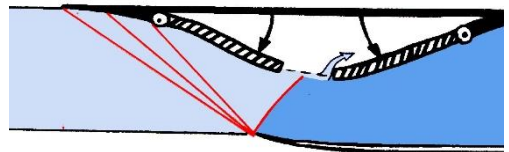
En fonctionnement stabilisé, le taux de compression, à Mach 2 est de 8. C'est-à-dire que la partie interne de l'entrée d'air (en bleu foncé sur les schémas) est un réservoir d'air à forte pression. Si la puissance moteur est réduite, même légèrement, et que la position de l'ensemble rampe-divergent n'est pas instantanément réajustée, le choc droit terminal est expulsé de l'entrée d'air. L'air en surpression s'échappe violemment par le bas ; l'entrée d'air se vide. Sa pression chute et elle se remplit à nouveau ... le phénomène se reproduit à un rythme de **10 fois par seconde !!** C'est le pompage !

Pour éviter ce désagrément, le mode de fonctionnement des entrées d'air bidimensionnelles des années 60 est dégradé pour gagner en stabilité. On s'éloigne du point d'équilibre optimal au prix d'un rendement plus faible, de l'ordre de 85%. Pour un avion d'armes, 15% de perte d'énergie dans l'entrée d'air restent acceptables mais cela n'aurait pas permis au programme Concorde d'atteindre ses objectifs en charge comme en vitesse.

C'est là qu'intervient Jacky Leynaert. Il s'intéresse, lui, au fonctionnement en CSE (Compression Supersonique Externe) où l'air est subsonique dès l'entrée dans la prise d'air. Au début le flux d'air est ralenti par une succession de chocs obliques à faibles intensités mais le choc terminal s'effectue au niveau de la carène, la lèvre inférieure de l'entrée d'air. Il découvre, expérimentalement, une courbure idéale de cette carène qui génère une onde de choc légèrement arrondie derrière laquelle l'écoulement est subsonique.

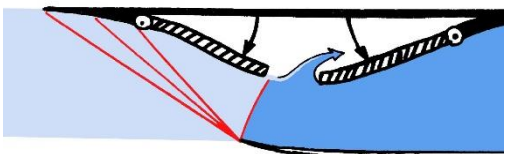


Empiriquement, il s'aperçoit qu'il est possible d'élargir, assez fortement le « piège à couche limite ». Cet élargissement permet aussi de mieux profiler la carène pour en réduire la trainée externe.

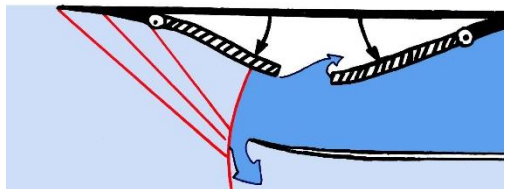


Ces deux particularités, onde de choc courbe attachée à l'entrée et large « piège à couche limite », autorisent une grande stabilité de fonctionnement.

Ainsi, en cas de variation du Mach de vol ou des tours moteur, l'onde de choc courbe bouge légèrement mais reste accrochée à la carène. Le débit d'air en surplus s'échappe en douceur via le piège à couche limite. **C'est capital** car cela permet d'utiliser l'entrée d'air à son rendement optimum de 93%, sans craindre le pompage. Cette grande stabilité de fonctionnement permet aussi une régulation aisée, à tel point qu'un fonctionnement en manuel reste possible.



Evidemment, en cas de modification importante du Mach de vol ou des paramètres moteur, s'il n'y a aucun mouvement d'adaptation des rampes, l'onde de choc terminale est expulsée et il y a pompage de l'entrée d'air.



En 1962, Etienne Fage, adjoint de Lucien Servanty au Bureau d'Etudes Concorde, propose cette solution à Pierre Young, spécialiste du moteur Olympus 593 chez Bristol Siddeley, responsable de la propulsion. L'entrée d'air de type « Jacky Leynaert » équipera le prototype 001 et, mis à part quelques modifications mineures, équipera tous les Concorde produits.

Ce dispositif d'entrée d'air était unique en son genre, au point que personne, aussi bien les russes que les américains ne voulaient croire en ce rendement annoncé de 93%. Cette découverte ayant été faite empiriquement et n'ayant pu être justifiée par le calcul, Jacky Leynaert en fit la remarque à Etienne Fage : « le seul problème est qu'on ne sait pas expliquer pourquoi ça marche » ce à quoi Etienne Fage aurait répondu : « je m'en fiche, l'important c'est le résultat ! ». *Ce n'est que trente ans après que des*

## TEMOIGNAGE

*japonais ont démontré par calcul le fonctionnement de l'entrée d'air « Jacky Leynaert ». (Entretien Dudley Collard 30 mai 2009)*

Pour tirer parti de cette brillante découverte, il fallut bâtir des entrées d'air assez robustes pour supporter l'énorme énergie emmagasinée durant le vol à Mach 2 et capable de résister aux inévitables pompages qui allaient survenir lors des essais en vol ainsi qu'en ligne. Elles durent être renforcées après le fameux vol 122 du prototype 001 au cours duquel les rampes du moteur 4 furent soufflées et expulsées après un fort pompage à Mach 2. Mais la plus grande difficulté fut la mise au point des calculateurs pilotant les mouvements des vérins de l'ensemble rampe-divergent. Pour la première fois, des calculateurs numériques « montaient » à bord d'un avion commercial ; ces fameux AICU (Air Intake Control Unit) permirent de tirer tout le bénéfice du concept « Jacky Leynaert ». La campagne de mise au point à Casablanca se déroula en équipe constituée franco-britannique et fut épique par le grand nombre de pompages encaissés à chaque vol. Chaque séance consistait à balayer le domaine d'utilisation en y associant les facteurs de charge et angles de dérapage requis par le règlement de certification. Le 28 novembre 1974, la régulation des entrées d'air Concorde était certifiée. Elle offrait une grande tolérance aux variations de Mach, de dérapage et de facteur de charge ainsi qu'une grande liberté de manipulation des moteurs.

Le rendement des entrées d'air de Concorde a été mesuré à 93%. Cette amélioration de 8 points par rapport au dispositif d'entrée d'air initialement prévu a permis un gain de plus de 2 tonnes de charge marchande (20 passagers !). Voilà pourquoi Jacky Leynaert fait partie de ces quelques éminents ingénieurs sans lesquels Concorde n'aurait pas existé.

### **PG & AR**

*Article rédigé avec la précieuse collaboration de Dudley Collard, Gérard Duval et Jacky Leynaert.*

