

Une brève histoire des avions et leur évolution

Jean Cousteix

La mythologie grecque témoigne déjà du rêve ancestral de l'homme : voler. En ce temps là, Minos, fils de Zeus, réclamait le trône de Crète. Après avoir dédié un autel à Poséidon et fait tous les préparatifs pour le sacrifice, il demanda à Poséidon d'envoyer un taureau. Un superbe taureau blanc sortit de la mer. Impressionné par la beauté du taureau, Minos l'épargna et en sacrifia un autre à sa place. Un peu plus tard, Minos épousa Pasiphaé. Poséidon n'ayant pas apprécié l'attitude de Minos, voulut se venger et fit en sorte que Pasiphaé s'éprenne du taureau blanc. De leurs amours, naquit le Minotaure, un monstre mi-homme et mi-taureau. Pour éviter le scandale, Minos demanda à Dédale, artiste et architecte de talent, de construire le Labyrinthe sur l'île de Crète pour s'y cacher et pour y enfermer au centre le Minotaure et Pasiphaé. Chaque jour, il fallait nourrir le Minotaure avec sept jeunes gens. Thésée, roi légendaire d'Athènes, voulut délivrer les Athéniens du tribut qu'ils payaient au Minotaure. Ainsi, il s'aventura dans le Labyrinthe et tua le Minotaure. Pour sortir du Labyrinthe, il reçut l'aide d'Ariane, fille de Minos et Pasiphaé, conseillée elle-même par Dédale. Ainsi, grâce au fil d'Ariane, Thésée trouva la sortie. Le roi Minos, convaincu de la participation de Dédale, le fit enfermer dans le Labyrinthe avec son fils Icare. Le plan en était si bien conçu que Dédale lui-même ne pouvait pas découvrir l'issue. Il dit à son fils : «La fuite peut être entravée par la terre et par l'eau mais l'air et le ciel sont libres, c'est par là que nous irons : que Minos possède tout, il ne possède pas le ciel». Dédale eut l'idée de s'envoler à l'aide d'ailes fixées sur le dos avec de la cire. Le père et le fils s'élevèrent donc dans le ciel et quittèrent la Crète. Cependant, Icare, grisé par l'aventure et malgré les avertissements de son père s'approcha trop près du soleil, la cire fondit et Icare tomba dans la mer ; les eaux se refermèrent sur lui. Dédale put s'échapper et atterrit en Sicile.

Le rêve dut attendre de nombreux siècles avant de devenir réalité. Dans ce qui suit, nous proposons de raconter l'évolution des techniques et des idées qui ont permis d'aboutir à l'avion. Nous profiterons de ce récit pour expliquer aussi les principes de base du vol d'un avion. Nous nous limiterons essentiellement aux aspects mécaniques, c'est-à-dire l'aérodynamique, la propulsion et la mécanique du vol.

Le premier vol

Avant l'époque relativement récente, Léonard de Vinci(1452-1519) compte parmi les rares à avoir proposé des solutions pour voler. Parmi ses nombreux travaux

scientifiques et artistiques, il a laissé des dessins montrant notamment un ornithoptère. Il s'agit d'un véhicule muni d'ailes battant de bas en haut et d'avant en arrière ; ce battement était produit par la force d'un pilote à bord. Il semble qu'il n'ait jamais essayé de construire et de faire voler l'une de ses machines.

Pour voler, il faut au moins deux conditions : rester en l'air, c'est la sustentation et se déplacer, c'est la propulsion. Avec les véhicules à ailes battantes ou à voilure tournante, comme l'hélicoptère, les deux phénomènes sont recherchés simultanément.

En 1799, George Cayley, anglais (1773-1857), proposa de dissocier les deux fonctions en utilisant les ailes fixes pour la sustentation et l'emploi d'une hélice associée à un moteur à gaz ou à explosion pour la propulsion. Le recours à des surfaces portantes fixes est certainement un élément déterminant dans l'évolution des idées. À cette époque, il s'agissait d'une véritable rupture technologique. En 1804, mettant en œuvre ses idées, Cayley construisit un planeur qui, lancé à la main, volait de façon satisfaisante. À partir de cette maquette, il conçut un autre planeur en 1849 capable de transporter un enfant puis son cocher en 1853.

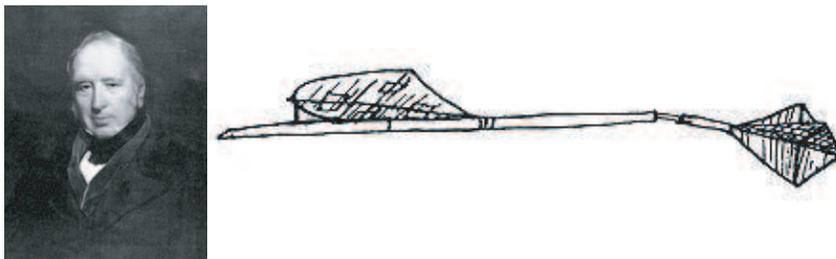


FIG. 1 – Sir George Cayley et son planeur de 1804

À cette époque, les connaissances théoriques en mécanique des fluides avaient progressé remarquablement grâce à Leonhard Euler (1707-1783), Jean le Rond d'Alembert (1717-1783), Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), Pierre-Simon Laplace (1749-1827), mais leur utilisation pratique en aérodynamique restaient encore lointaines et il faudra attendre le début du vingtième siècle avec Ludwig Prandtl (1874-1953) pour voir les premières retombées pratiques qui s'accumulent encore aujourd'hui. Les résultats les plus utilisables exprimaient que les forces aérodynamiques varient directement comme 1°) la masse volumique de l'air, 2°) une surface caractéristique de l'objet en mouvement dans l'air et 3°) le carré de la vitesse de l'objet dans l'air. Cayley disposait aussi de données aérodynamiques expérimentales obtenues à l'aide d'un système de mesure à bras tournant reposant sur une invention de Benjamin Robins (1707-1751). De fait la contribution de Cayley à l'aérodynamique expérimentale est remarquable. Il reconnut l'importance de

décomposer les forces aérodynamiques en 1°) une force de traînée ou force de résistance à l'avancement qui agit dans la direction de déplacement de l'avion et qui s'oppose à ce déplacement et 2°) une force de portance perpendiculaire à la précédente et qui assure le maintien de l'appareil en l'air. Il a compris le rôle majeur de la portance alors qu'auparavant les travaux portaient essentiellement sur la traînée. Il étudia notamment les variations de portance avec l'incidence de l'aile. Il a compris aussi le rôle de la courbure d'une aile pour produire la portance de façon plus efficace qu'avec une aile plate.



FIG. 2 – Clément Ader et son appareil l'Éole

Environ un siècle plus tard, Clément Ader (1841-1925), français originaire de Muret, réussit un premier bond à bord de l'Éole le 9 octobre 1890. Après un petit saut de 50 m à quelques dizaines de centimètres du sol, il se posa au même niveau que son point de départ. Selon P. Lissarrague, il est incontesté que Clément Ader devenait le premier au monde à décoller du sol à bord d'un aéroplane de son invention, sans autre aide que la puissance de son moteur et à atterrir sur ses roues sans casser l'appareil. Avec son troisième appareil, l'Aquilon (Avion III), il aurait franchi une distance de 300 m. Le conditionnel est dû notamment au fait que les travaux de Clément Ader étaient réalisés sous le sceau du secret militaire et n'ont été révélés que plus tard. En outre, les conditions météorologiques très défavorables n'aiderent pas à convaincre les militaires présents de la viabilité de l'invention.

La controverse relative au premier vol existe toujours. Il faudrait encore bien définir ce qu'on entend par «voler». Comme le précise Edmond Petit, il ne suffit pas de décoller par la seule force du moteur, il faut encore entretenir le vol sans perdre de hauteur, garder et rétablir l'équilibre, manœuvrer, revenir au sol sans casser.

Quoi qu'il en soit, Clément Ader a popularisé le mot «avion». En 1863, Gabriel de la Landelle avait déjà proposé le mot «aviation», composé à partir de «avis», oiseau et «actio», action. On dit aussi que le mot avion est un acronyme inventé par Clément Ader signifiant «Appareil Volant Imitant l'Oiseau Naturel». Nul doute en tout cas, que le dessin de l'Éole lui a été inspiré, si ce n'est par un oiseau, du moins par la chauve-souris. Aujourd'hui, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale, OACI, définit un avion comme étant un aéronef plus lourd que l'air, entraîné par un organe moteur (dans le cas d'un engin sans moteur, on parlera de planeur), dont la sustentation en vol est obtenue principalement par des réactions aérodynamiques sur des surfaces qui restent fixes dans des conditions données de vol.

Otto Lilienthal, allemand (1848-1896), eut une contribution très importante au développement de l'aérodynamique et de l'aviation. Aidé par son frère Gustav, il fit de nombreuses mesures des forces aérodynamiques exercées sur des ailes. Il dressa des tables de résultats et en fournit des graphiques sous une forme particulière appelée aujourd'hui polaire de Lilienthal. L'originalité de la représentation résidait d'abord dans l'utilisation de coefficients aérodynamiques, coefficients de portance et de traînée, où les forces aérodynamiques sont rapportées à $\frac{1}{2}\rho SV^2$; dans cette formule, ρ (lettre grecque rho) est la masse volumique de l'air, S est une surface de référence définie pour l'aile étudiée et V est la vitesse de déplacement de l'aile dans l'air. Dans la représentation de Lilienthal, le coefficient de portance est porté en fonction du coefficient de traînée et la courbe obtenue est graduée par l'incidence de l'aile. Le fruit de ces recherches fit l'objet d'un livre qui constitua une des publications les plus importantes du dix-neuvième siècle en aéronautique. Ces résultats ont été communiqués à de nombreuses personnes intéressées par le vol des avions, notamment aux frères Wright qui les ont utilisés pour dessiner leurs premiers planeurs. Octave Chanute (1832-1910) joua un rôle important dans la distribution de ces données.

Otto Lilienthal fut l'un des pionniers du vol à voile. Il a véritablement compris comment il fallait s'y prendre pour voler avec un planeur. Il a réalisé plus de 2000 vols en s'élançant à partir de collines. Il a même fait ériger une colline artificielle de forme conique pour pouvoir voler dans toutes les conditions de direction du vent. Sa passion lui fut fatale puisqu'il mourut des suites d'un accident provoqué par le décrochage de son planeur pris dans un courant thermique. Lilienthal était convaincu qu'il fallait d'abord apprendre à voler avant de s'embarquer dans le vol motorisé. Aidé par son frère Gustav, il entreprit un véritable programme de recherche en construisant différents types de planeurs et en les modifiant. Le contrôle de l'appareil était rudimentaire puisqu'il reposait sur le mouvement du corps du pilote mais Lilienthal comprit une grande partie des principes permettant de se diriger dans l'air.

Lilienthal essaya aussi, avec moins de succès, de s'attaquer au vol motorisé.



FIG. 3 – Otto Lilienthal à bord de l'un de ses planeurs

Son idée était de faire voler un ornithoptère dont l'extrémité des ailes battait. La suite de l'Histoire n'alla pas dans ce sens.

Aux États-Unis, Samuel Pierpont Langley (1834-1906) joua un rôle important dans l'histoire de l'aviation. Encouragé par les résultats de ses nombreuses expériences sur la portance et la traînée d'un avion se déplaçant dans l'air, il fut convaincu de la possibilité de voler avec des moteurs existants. Langley eut le mérite d'introduire l'aérodynamique expérimentale aux États-Unis et d'arriver à un niveau voisin de celui développé jusque là en Europe. Ainsi, Langley entreprit de construire des machines volantes motorisées. Tous ses appareils portèrent le nom d'«aérodrome», coureur de l'air. Il fabriqua des maquettes propulsées par une hélice mise en action par des moteurs à élastique. Malgré les nombreuses configurations essayées, il n'arriva pas à obtenir vraiment d'informations pertinentes. Il construisit toute une série d'aérodromes de plus grande taille que les premiers modèles réduits. L'Aérodrome No 5 connut un certain succès. Le 6 mai 1896, l'appareil de 4,1 m d'envergure, possédait une voilure en tandem et il était propulsé par deux hélices placées entre les plans de voilure, actionnées par un moteur à vapeur de 1 ch. Le décollage se faisait de façon particulière. L'appareil était catapulté depuis une plate-forme flottante sur le fleuve Potomac. Il effectua un vol sans pilote qui dut s'arrêter au bout d'une minute et demie en panne de vapeur. C'était le premier vol

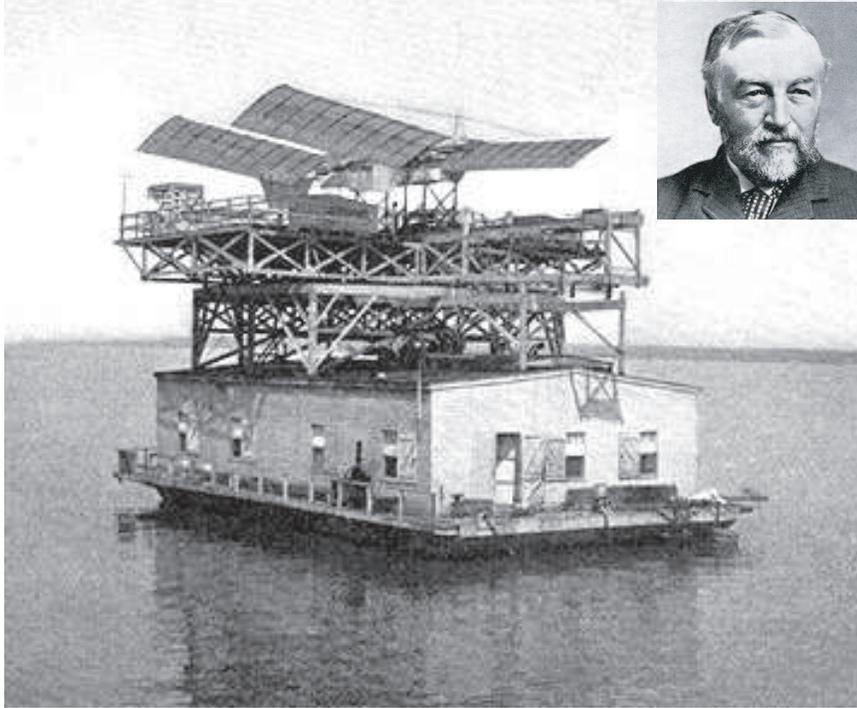


FIG. 4 – Samuel Pierpont Langley et sa plate-forme flottante

sustenté d'un plus lourd que l'air mais non contrôlé. Après récupération dans l'eau, la performance fut renouvelée le même jour.

Misant essentiellement sur la propulsion pour assurer son succès, Samuel Langley fit appel à Charles Manly pour concevoir un moteur en étoile à explosion interne de 52 ch pesant 155 kg, une performance à l'époque. Un nouvel appareil, l'Aérodrome A, fut construit avec l'objectif d'emporter un pilote. Après une première tentative ratée en octobre 1903, un second essai eut lieu le 8 décembre 1903. Cette fois, l'appareil ne résista pas au décollage et fut complètement détruit ; il était irrécupérable. Le pilote, Charles Manly, se tira d'affaire mais Langley mit un terme à ses essais. La NASA, le célèbre établissement de recherche américain, a honoré cet illustre pionnier en baptisant l'un de ses centres du nom de Langley.

Pendant ce temps, la mécanique des fluides théorique avait encore progressé. Claude Navier (1785-1835) puis George Stokes (1819-1903) avaient écrit les équations complètes capables, en théorie, de décrire les mouvements de l'air provoqués par le passage d'un avion mais capables aussi de donner les forces appliquées à l'avion provoquées par ces mouvements. Sadi Carnot (1796-1832) avait

aussi posé les bases de la thermodynamique en 1824, ce qui permettait de compléter les équations du mouvement. À cette époque, et encore pour longtemps, ces équations n'avaient pas d'application pratique car on était incapable d'en formuler des solutions.

En revanche, l'aérodynamique expérimentale qui avait elle aussi beaucoup progressé voyait la mise en œuvre d'applications aux machines volantes. Parmi celles-ci, on peut noter l'utilisation d'ailes cambrées à la place de surfaces planes ; on peut noter aussi l'utilisation d'ailes de grand allongement dont les performances aérodynamiques sont bien meilleures que celles de faible allongement.

De nombreux progrès étaient réalisés. Alphonse Pénaud avait proposé des solutions pour assurer la stabilité longitudinale et latérale de l'avion. En 1871, il avait prouvé l'efficacité de ses solutions. Il s'agissait d'une contribution essentielle pour contrôler le vol d'un avion. En 1874, Félix du Temple avait réussi un décollage assisté d'un avion motorisé avec un pilote à bord : le décollage était aidé car l'avion avait décollé à partir d'une rampe.

Finalement, le premier vol d'un avion motorisé réalisé par les américains Wilbur Wright (1867-1912) et son frère Orville (1871-1948) eut lieu le 17 décembre 1903.

À la mort de Lilienthal, les frères Wright, des fabricants de bicyclettes à Dayton, Ohio, commencent à s'intéresser sérieusement aux questions aéronautiques. Ils ne partent pas de rien. Ils commencent à étudier les résultats engrangés jusque là à travers les publications existantes. Une correspondance avec Octave Chanute est initiée à partir de 1900. En suivant l'exemple de Lilienthal et de Chanute qui avait aussi construit des planeurs, les frères Wright construisent un petit planeur, sans pilote, en 1899. Ce modèle comprend un système de contrôle latéral de stabilité par une technique de gauchissement de voilure. Déjà, l'une des contributions majeures des frères Wright est mise en place. En 1900 et 1901, ils effectuent de nombreux essais avec des planeurs employés comme des cerfs-volants. Ils mesurent la portance et la traînée par le biais de la force de traction exercée sur la corde tenant le planeur. Les valeurs mesurées ne correspondent pas du tout à leurs prévisions qui reposaient sur l'utilisation des tables de Lilienthal. Des interprétations erronées de ces tables et une connaissance encore très imparfaite de l'aérodynamique étaient à l'origine de ces écarts. Troublés par ces difficultés, ils décident de réaliser un programme d'essais en soufflerie. Cet instrument devenu un outil indispensable dans la conception d'un avion, même aujourd'hui, fut inventé en 1872 par Francis Wenham (1824-1908) dont les travaux relatifs à la locomotion aérienne ont sûrement largement inspiré les frères Wright. La veine d'essai de leur soufflerie a une section d'environ 40 cm x 40 cm et une longueur d'environ 1,8 m. La vitesse peut atteindre environ 50 km/h. Le programme a été conçu pour obtenir des résultats directement applicables à la conception de leur futur planeur. Des mesures de portance et de traînée en fonction de l'incidence sont réalisées pour plus de 200 maquettes d'ailes

différents. Ainsi, dès la fin de l'année 1901, les frères Wright disposent d'une base de données très supérieure à ce qui existait alors, avec des informations détaillées sur les variations de la portance, de la traînée ou du centre de poussée qui joue un grand rôle dans les problèmes de stabilité. Ils construisent alors un nouveau planeur qu'ils essayent en fin d'année 1902 à Kitty Hawk, en Caroline du Nord, avec un pilote à bord. Cette fois, les performances aérodynamiques sont très bonnes et elles correspondent bien aux prévisions déduites des essais en soufflerie. Les frères Wright sont alors décidés à fabriquer une machine motorisée. Un moteur est nécessaire. La prospection faite auprès de constructeurs pour obtenir un moteur à essence donne des résultats négatifs compte tenu des performances demandées. Dans l'atelier de Dayton, Orville se met à la tâche avec l'aide de leur mécanicien, Charles Taylor, qui a déjà construit la soufflerie. Un moteur à essence de 12 hp, en fonte d'aluminium est ainsi produit. De son côté, Wilbur, aidé par son frère, s'occupe de l'hélice. Il élabore une théorie particulièrement efficace. Associée à des essais en soufflerie, il en résulte une hélice très performante, bien plus performante que les hélices qui existaient alors.

L'avion est transporté en morceaux à Kill Devil Hills où il est assemblé. Il a une envergure de 12,3 m et une longueur de 6,4 m. À vide, il pèse 274 kg. La surface de la voilure est de 47,4 m². Il a été conçu suivant une formule canard, c'est-à-dire que l'empennage horizontal est devant les ailes ; l'empennage vertical est derrière les ailes. L'avion possède un système permettant de déformer le bout des ailes pour assurer la stabilité du vol. Il est muni de deux hélices propulsives placées derrière les ailes.

Tout est prêt pour les premiers essais qui doivent se dérouler sur la plage de Kitty Hawk, non loin de Kill Devil Hills. Pour le décollage, l'avion doit glisser sur un rail en bois placé face au vent. Pour réussir à décoller, la vitesse de l'avion par rapport au vent doit être au moins de 40 km/h. Un vent assez fort est donc nécessaire. Le 14 décembre, les conditions sont réunies. Les frères Wright jouent la place du pilote à pile ou face. Wilbur gagne. Peu après le décollage, le Flyer décroche, il est légèrement abîmé mais il peut être réparé. Le 17 décembre, c'est au tour d'Orville de prendre les commandes du Flyer. L'avion s'élance sur sa rampe, Wilbur court à côté en tenant l'aile pour éviter qu'elle touche le sol. L'avion décolle. Un vol de 36,5 mètres, pendant 12 secondes, est accompli. Le même jour, ils répètent l'exploit ; le quatrième vol, avec Wilbur à bord, dure 59 s et l'avion atterrit 260 m plus loin. Ainsi, les frères Wright viennent ce jour là de réussir les premiers vols soutenus et répétés.

À partir de là, tout ira très vite et les progrès seront foudroyants.

La conjonction d'avancées technologiques comme le moteur à explosion et de l'évolution des idées sur la façon de faire voler un avion ajoutée au génie de deux passionnés ont permis de déboucher sur une révolution technique du monde mo-

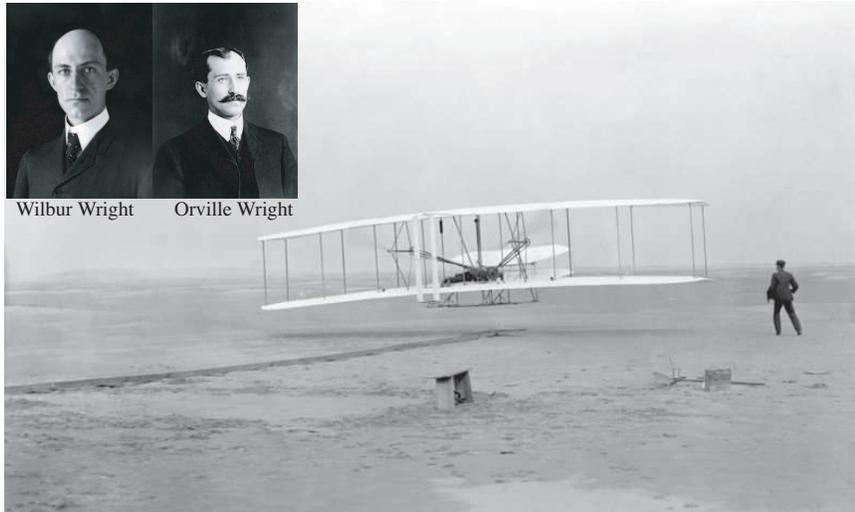


FIG. 5 – Premier vol des frères Wright

derne. Comme nous l'avons vu, trois éléments essentiels concourent à la réalisation d'un vol : les forces aérodynamiques qui assurent la sustentation de l'appareil, la propulsion qui permet de contrer la résistance de l'air, la stabilité de l'avion qui en conditionne le pilotage. Dans la suite, nous essaierons d'expliquer ces trois points et nous examinerons aussi quelques éléments qui ont fait progresser les avions.

La portance et la traînée

Le mouvement relatif de l'air par rapport à l'avion engendre des forces qui peuvent être extrêmement grandes. La sensation de force aérodynamique est très bien perçue si l'on sort la main dehors quand on est en voiture. Le ralentissement créé par un parachute est un autre exemple. Les effets d'une tempête peuvent être très spectaculaires. Ne parle-t-on pas de la force du vent ?

Sur un avion, les forces aérodynamiques sont décomposées en une force de traînée qui s'exerce dans la direction opposée à la vitesse de l'avion et une force de portance, dirigée vers le haut, qui s'exerce dans une direction perpendiculaire à cette vitesse (figure 6). La force de traînée est donc celle qui s'oppose au mouvement de l'avion ; c'est la résistance à l'avancement. La force de portance, ou de sustentation, est celle qui maintient l'avion en l'air.

En régime de croisière, l'avion se déplace à une altitude constante ; il faut que son poids soit exactement équilibré par la force de portance sinon il tombe ou il monte selon que son poids est plus grand ou plus petit que la portance. Un avion de

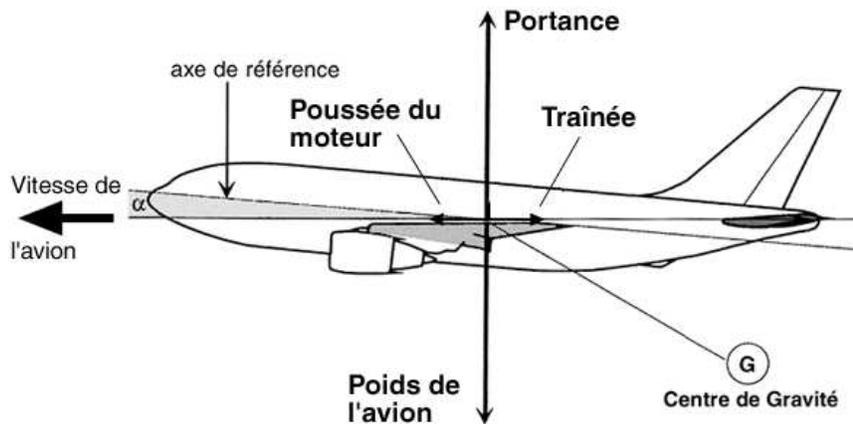


FIG. 6 – Équilibre des forces sur un avion en vol de croisière ; l'équilibre de l'avion en rotation exige aussi que le moment résultant des forces par rapport au centre de gravité soit nul

transport pesant plusieurs centaines de tonnes est donc soumis à une force aérodynamique énorme.

Pour éviter que l'avion tourne autour de lui-même, il est nécessaire aussi que le moment résultant des forces par rapport au centre de gravité soit nul.

En outre, le déplacement de l'avion dans l'air crée une force de résistance, la traînée aérodynamique. Typiquement, la traînée représente de l'ordre de 5% de la portance. Pour voler à une vitesse constante, la force de propulsion fournie par le moteur doit équilibrer exactement la traînée.

A quoi sont dues les forces aérodynamiques ?

Un corps se déplaçant dans l'air crée autour de lui un mouvement de l'air qu'on appelle un écoulement. Ce mouvement est très complexe car la vitesse de l'air n'est pas partout la même. L'écoulement induit aussi des variations de la pression appliquée au corps ainsi que des forces de frottement entre l'air et la surface du corps. L'étude de ces mouvements et de leurs effets est une branche de la Physique qui s'appelle l'Aérodynamique.

Un principe de physique veut que lorsque le mouvement est créé par le déplacement d'un corps à vitesse constante, il est équivalent d'étudier l'écoulement créé par un courant d'air qui se déplace autour du corps immobile. Ce qui importe est donc le mouvement relatif du corps par rapport à l'air. Ce principe de mouvement

relatif est utilisé dans les souffleries dont l'objet est précisément les études aérodynamiques.

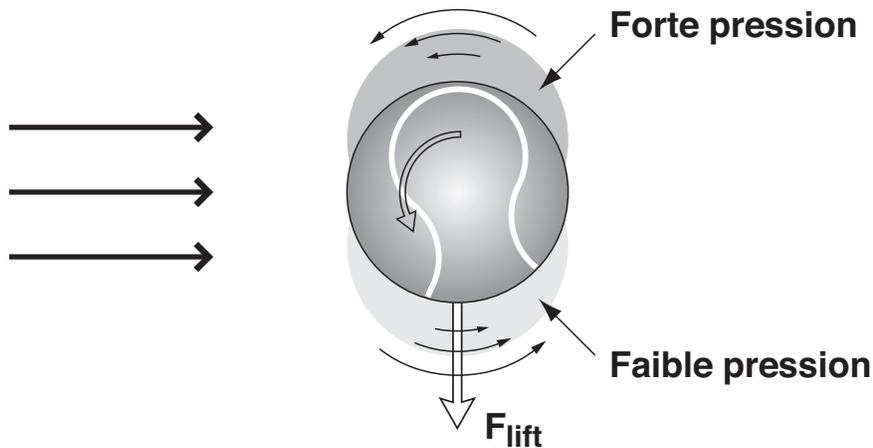


FIG. 7 – Le "lift" de la balle de tennis

Imaginons une balle de tennis qui tourne sur elle-même en restant sur place (figure 7). La rotation de la balle entraîne en son voisinage une rotation de l'air qui l'entoure. Supposons maintenant que cette balle se déplace en même temps qu'elle tourne. C'est ce qui se passe lorsque le joueur de tennis donne un effet de «lift». Au lieu de considérer la balle avec son mouvement de déplacement, il est équivalent de considérer un courant d'air qui arrive sur la balle. La vitesse de ce courant d'air s'ajoute à l'effet de rotation de l'air. Ainsi, sur le dessus de la balle la vitesse de l'écoulement est plus faible que sur le dessous ; en effet, sur le dessus, la vitesse de déplacement de l'air et la vitesse de rotation de l'air se retranchent alors que sur le dessous elles s'ajoutent.

Or, on sait que la pression et la vitesse sont reliées. Imaginons qu'il existe une différence de pression entre deux points voisins dans l'air. À cause de cette différence de pression, l'air est soumis à une force qui tend à l'accélérer vers l'endroit où la pression est plus faible ; en quelque sorte, l'air est poussé par la forte pression. Autrement dit, la vitesse augmente dans la région où la pression est plus faible (figure 8). On peut donc résumer en disant que la vitesse est plus grande là où la pression est plus faible et, de façon équivalente, que la vitesse est plus petite là où la pression est plus forte.

Donc, sur le dessus de la balle, comme la vitesse est plus faible que sur le dessous, la pression y est plus forte. Les différences de pression appliquées à la balle ont donc pour effet de donner une force dirigée vers le bas. C'est bien ce que recherche le joueur ; sa balle monte d'abord assez haut car pour donner l'effet de

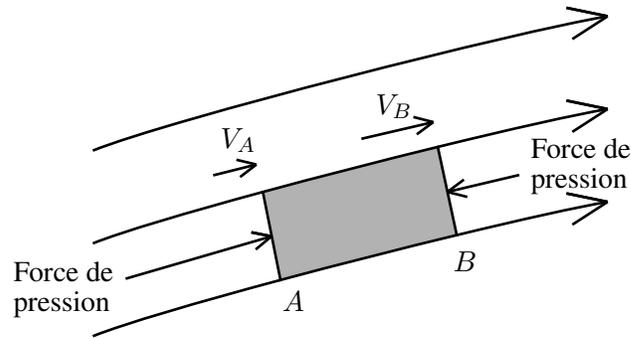


FIG. 8 – L'écoulement d'air est dirigé de la gauche vers la droite ; si la pression est plus forte en A qu'en B, l'air accélère et la vitesse V_B en B est plus grande que la vitesse V_A en A

rotation il doit donner à la raquette un mouvement de bas en haut et il imprime donc une force dirigée vers le haut. Avec sa rotation, la balle subit ensuite une force aérodynamique dirigée vers le bas qui la fait descendre brutalement et elle reste dans le court, en principe.

Une expérience simple. On prend une feuille de papier format A4 par deux coins voisins, le bord entre les deux coins tendu horizontalement. Bien sûr, le poids de la feuille tend à la faire pendre vers le bas. On souffle sur le dessus de la feuille et on s'aperçoit qu'elle se relève. Que se passe-t-il ? La vitesse du courant d'air induit une dépression sur le dessus de la feuille alors que le dessous reste soumis à la pression ambiante. Les forces de pression appliquées à la feuille sont donc dirigées vers le haut et la feuille se soulève (figure 9).

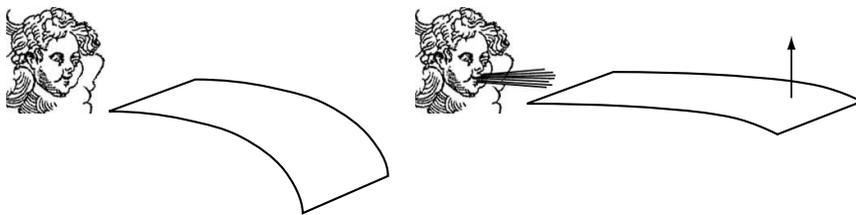


FIG. 9 – On souffle sur le dessus de la feuille de papier : elle se soulève

Comme l'a expliqué Frederik Lanchester (1868-1946), anglais, l'écoulement autour d'une aile d'avion peut être schématisé comme la superposition d'un écoulement uniforme et d'un mouvement circulatoire (figure 10). Ce phénomène est un peu équivalent à celui créé par la balle de tennis qui tourne sur elle-même. Pour

l'aile, le mouvement circulaire est dû à l'existence d'un bord de fuite effilé qui contraint l'air à s'écouler autour de l'aile sans contourner cette arête. Ainsi, sur le dessus de l'aile, qu'on appelle l'extrados, la vitesse est plus grande qu'à l'intrados. L'extrados est donc le siège d'une dépression par rapport à l'intrados. La différence de pression est à l'origine de la portance.

Il est important de noter que la sustentation est essentiellement provoquée par l'effet de dépression sur l'extrados. C'est comme si l'aile était aspirée vers le haut.

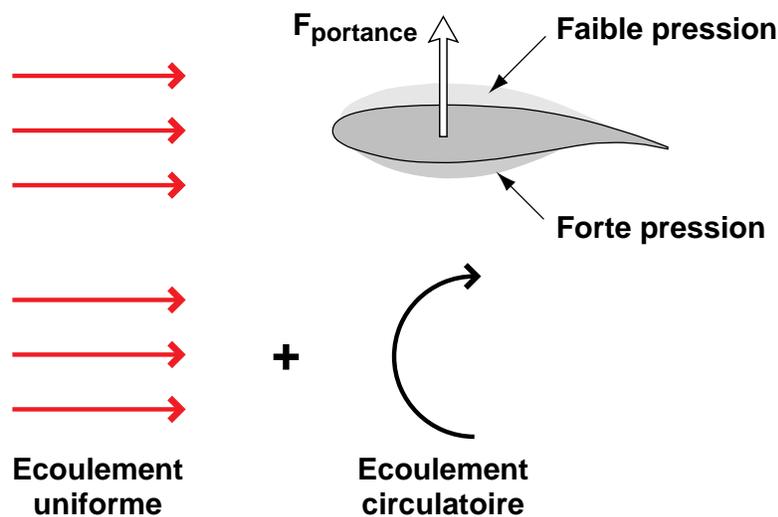


FIG. 10 – Formation de la portance sur un profil d'aile

La traînée résulte du déséquilibre des composantes longitudinales des forces de pression qui s'exercent sur l'avion mais aussi des forces de frottement que l'air exerce en s'écoulant autour de l'avion. Sur un avion de transport tel qu'un Airbus, les deux causes, pression et frottement, participent à parts à peu près égales à la traînée. Sur un avion plus petit, la part de la traînée de frottement est plus forte. Sur un avion supersonique comme Concorde, la pression contribue à la traînée pour environ 70%. La répartition entre la traînée de pression et la traînée de frottement dépend du type d'avion, de sa taille, de son régime de vol (subsonique, transsonique ou supersonique).

De quoi dépendent les forces aérodynamiques ?

Une ligne de référence permet de définir la corde du profil d'aile qui est en gros sa longueur. En outre, cette ligne fait un angle par rapport à la vitesse de l'avion

qu'on appelle l'incidence. Par rapport à la trajectoire de l'avion, en vol de croisière, l'aile est légèrement cabrée. Généralement, l'incidence de l'aile est de l'ordre de quelques degrés.

Quand l'incidence de l'aile augmente, la portance augmente (l'incidence est notée α , lettre grecque alpha). Au contraire, quand l'incidence diminue, la portance diminue aussi et peut devenir négative. L'augmentation de portance avec l'incidence a toutefois une limite ; si l'incidence devient trop forte, la portance chute au-delà d'une incidence limite (figure 11). Ce régime est appelé le décrochage.

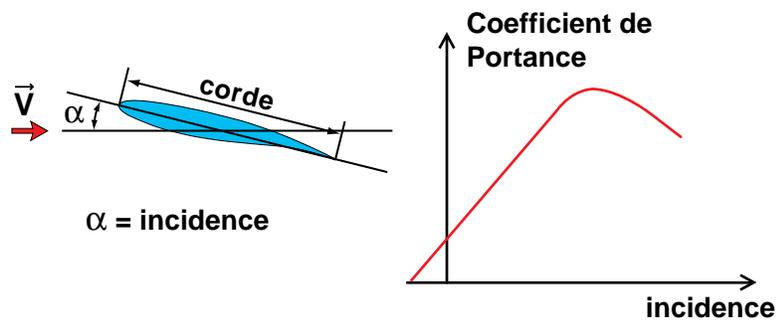


FIG. 11 – Variation du coefficient de portance avec l'incidence

Le décrochage est associé au phénomène aérodynamique de décollement (figure 12). Au lieu de suivre correctement le dessin de l'aile, l'écoulement d'air s'en

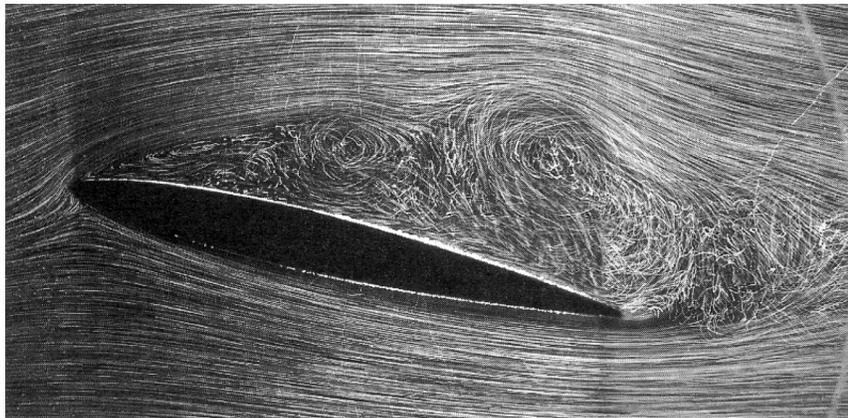


FIG. 12 – Écoulement décollé sur un profil d'aile (photo ONERA, H. Werlé)

écarte fortement et les performances aérodynamiques s'en trouvent dégradées. On

peut observer ce phénomène lorsque l'eau d'une rivière passe autour d'une pile de pont. Sur la partie avant de la pile, l'eau suit régulièrement le contour de la pile alors que sur la partie arrière, elle s'en écarte fortement. Généralement des gros remous se forment en aval.

Le profil de l'aile spécialement conçu pour donner à l'écoulement la forme souhaitée devient totalement inefficace à forte incidence. La portance diminue et la traînée augmente.

L'écoulement est fortement conditionné aussi par le régime laminaire ou turbulent qui règne au voisinage de la paroi (figure 13). En régime laminaire, comme l'indique l'origine étymologique, les couches fluides glissent les unes sur les autres comme des lames. Un écoulement turbulent a une allure très irrégulière ; il est le siège d'agitations et de remous vigoureux qui assurent un brassage efficace du fluide. Le régime turbulent crée des forces de frottement plus intenses sur la paroi de l'avion et la traînée de frottement augmente. Autour d'une aile de planeur, l'écoulement est laminaire sur une grande partie de la région amont de la voilure et, de ce fait, la traînée est faible. Les rugosités qui pourraient se former sur l'aile par suite de l'impact d'insectes par exemple sont un facteur de déclenchement du régime turbulent, ce qui est très néfaste pour la traînée.



FIG. 13 – Écoulement laminaire puis turbulent (photo ONERA, H. Werlé)

Sur l'aile d'un avion de transport comme un Airbus, il est très difficile d'obtenir un régime laminaire. Cependant des études récentes, confirmées par des essais en vol, ont montré la faisabilité d'un procédé permettant de maintenir le régime laminaire afin de réduire la traînée pour économiser le carburant. La technique employée consiste à équiper l'aile ou la dérive par exemple de parois très finement perforées et à aspirer légèrement l'écoulement à travers ces parois. Les trous ont un diamètre de l'ordre de quelques centièmes de millimètre et sont espacés de quelques dixièmes de millimètre.

En régime turbulent, d'autres études ont montré qu'il est possible de réduire la traînée de frottement à l'aide de parois munies de stries très fines appelées riblets. Ces parois sont obtenues à l'aide de feuilles de plastique autocollantes et les stries ont une dimension de l'ordre de quelques centièmes de millimètre en largeur et en profondeur. Les stries doivent être soigneusement alignées avec l'écoulement. Des essais en vol sur un Airbus A320 recouvert très largement de ces surfaces ont

montré un gain de traînée de l'ordre de 1,5% de la traînée totale de l'avion.

Le bang supersonique et le mur du son

Une difficulté majeure à laquelle s'est heurtée l'évolution des avions fut le passage d'une barrière mythique appelée mur du son qui apparaît quand l'avion vole dans le domaine transsonique.

On appelle nombre de Mach, noté M , le rapport de la vitesse de l'avion V à la célérité du son a dans l'air à l'endroit où vole l'avion. Ce nom a été donné en hommage à Ernst Mach, autrichien (1838-1916). La célérité du son représente la vitesse de propagation du son dans l'atmosphère au repos. La célérité du son dépend de la température de l'air et elle augmente quand la température augmente. À une température de 25 °C, elle est voisine de 1250 km/h alors qu'à -50 °C, température qui règne à l'altitude de vol de nombreux avions (environ 10 km), elle est de 1080 km/h. Un avion subsonique vole à une vitesse inférieure à la célérité du son, un avion supersonique vole à une vitesse supérieure à la célérité du son. Par exemple l'avion Concorde vole à $M = 2,04$ en croisière. L'Airbus A320 vole à $M = 0.80$, c'est-à-dire dans le domaine transsonique, le domaine voisin de $M = 1$.

Les lois de l'aérodynamique sont très différentes en régime subsonique et en régime supersonique. Par exemple, dans une canalisation à section variable, la vitesse d'un écoulement subsonique diminue quand la section de passage augmente ; l'observation d'un écoulement d'eau confirme cette conclusion. Au contraire dans un écoulement supersonique, la vitesse augmente lorsque la section de passage augmente.

Une autre différence est liée à la propagation de petites perturbations. Imaginons un petit mobile, une toute petite bille par exemple. En se déplaçant, elle émet une perturbation qui se propage sous la forme d'une onde de pression sphérique : le déplacement de la bille crée une variation de pression qui est localisée à la surface d'une sphère dont le diamètre croît au fur et à mesure du temps. Si la bille se déplace à une vitesse subsonique, l'onde de pression devance la bille puisque la bille a une vitesse inférieure. Au contraire, si la bille se déplace à une vitesse supersonique, la bille devance toujours la perturbation (figure 14). C'est la raison pour laquelle on peut entendre arriver un avion subsonique alors qu'on n'entend un avion supersonique que lorsqu'il est passé.

En fait, les perturbations créées en régime supersonique se rassemblent et focalisent souvent pour former des ondes de choc. Au lieu d'une petite perturbation, un bruit faible, une onde de choc crée un bruit qui peut être très intense. Un avion supersonique forme de telles ondes de choc qui sont liées à l'avion et se déplacent en même temps que lui. En pénétrant dans l'air un avion supersonique comme Concorde engendre une onde de choc dont la forme est à peu près celle d'un cône

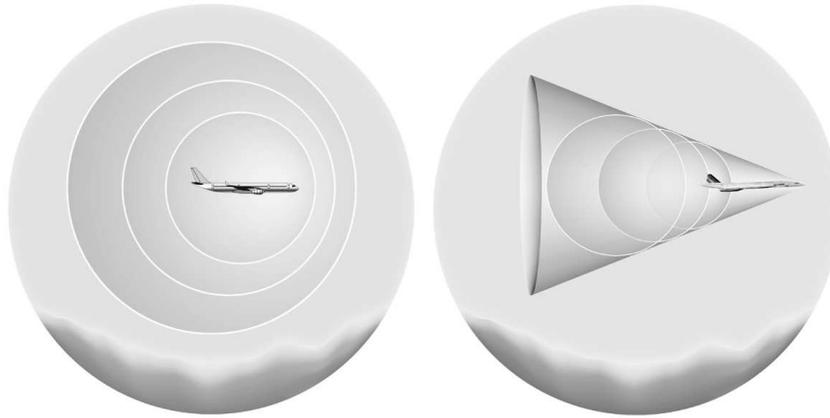


FIG. 14 – Propagation des perturbations en subsonique (à gauche) et en supersonique (à droite)

dont le sommet est attaché au nez de l'avion. Ce cône se déplace avec l'avion. Un observateur au sol entend passer l'avion lorsque ce cône passe sur lui. C'est le bang. En fait, un second bang est émis peu de temps après car une deuxième onde de choc liée à l'arrière de l'avion se forme aussi. C'est le phénomène du double bang.

L'intensité du bruit augmente lorsque la taille de l'avion augmente et lorsqu'il vole à plus basse altitude. Il faut noter que ces ondes de choc sont très peu atténuées et se propagent sur des distances très grandes. Le bang de Concorde est perçu au sol de façon significative sur une bande large d'une vingtaine de kilomètres, de part et d'autre de sa trajectoire.

Quand l'avion est en régime de vol transsonique, des ondes de choc se forment sur certaines parties de l'avion notamment sur l'extrados. En effet les dépressions qui règnent sur l'extrados sont associées à des survitesses de l'écoulement qui se forme autour de l'avion. Ainsi, même si le nombre de Mach de l'avion est inférieur à 1, l'écoulement sur l'aile peut être en partie supersonique. Les lois de l'aérodynamique étant très différentes en subsonique et en supersonique, il s'ensuit que la portance et la traînée varient rapidement quand l'avion essaie d'entrer dans le domaine transsonique. En particulier la traînée augmente, la portance diminue. Le moment de tangage a également des variations rapides. De plus, des instabilités peuvent apparaître quand les ondes de chocs se forment sur l'aile. Cet ensemble de phénomènes correspond au «mur du son» qui apparaît comme un cap difficile à franchir. Quand la puissance des moteurs a permis d'envisager de tels vols, ces phénomènes aérodynamiques n'étaient pas connus. Le pilotage était très difficile et beaucoup de pilotes y ont laissé leur vie. Le 14 octobre 1947, Chuck Yeager, devenu



FIG. 15 – Charles Yeager et le Bell X-1 qui franchit Mach 1

héros de légende aux États-Unis, fut le premier à franchir le nombre de Mach 1 à bord de l'avion Bell X-1 équipé d'un moteur fusée (figure 15).

Par la suite, ces phénomènes ont été maîtrisés grâce notamment à des profils d'ailes particuliers. L'aile supercritique, développée sous l'impulsion de Richard Whitcomb, a un profil dont la forme en épaisseur procure de bonnes qualités aérodynamiques en régime transsonique. Une autre amélioration aérodynamique consiste

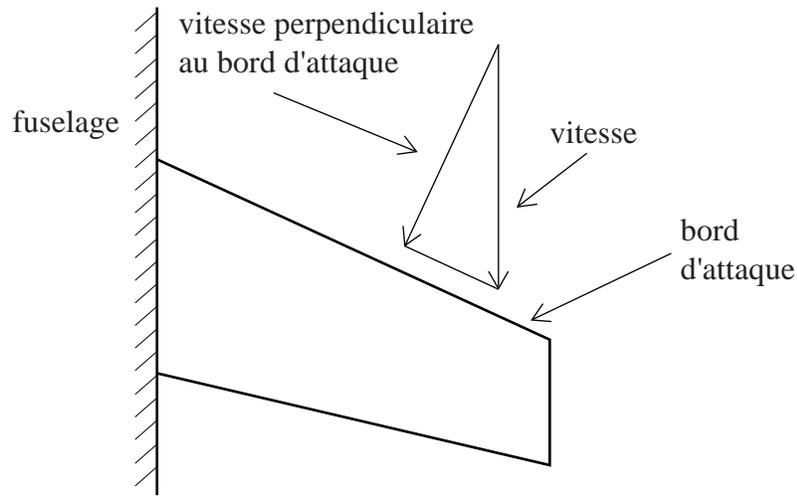


FIG. 16 – Aile en flèche

à mettre l'aile en flèche : l'aile ne fait plus un angle droit avec l'axe longitudinal de l'avion. On sait que le comportement de l'aile est lié à la composante de vitesse qui est perpendiculaire au bord d'attaque de l'aile. Or, cette composante de vitesse représente l'un des côtés d'un triangle rectangle dont l'hypothénuse est la vitesse (figure 16) ; elle a une valeur sensiblement plus faible que la vitesse. Tout se passe donc comme si le nombre de Mach de l'avion était plus faible et les troubles transsoniques sont repoussés. Les avions Airbus, par exemple, sont équipés d'ailes en flèche.

Souvent, le double bang est confondu avec le mur du son. Comme on l'a vu, le double bang est le bruit perçu au sol tout au long du parcours d'un avion volant en régime supersonique. Le mur du son est le nom donné aux troubles qui étaient rencontrés par l'avion lors du passage dans le domaine transsonique. En régime supersonique, les difficultés rencontrées dans ce passage s'effacent et le vol devient plus facile.

La propulsion

Un moteur simple. On gonfle un ballon de baudruche et quand il est bien gonflé, on laisse l'air s'échapper (figure 17). Le ballon se met à voyager. Que s'est-il passé ? Une fois le ballon gonflé, la pression à l'intérieur est plus forte que celle qui existe à l'extérieur, mais les forces de pression s'annulent parce qu'elles sont appliquées à un volume fermé. Quand l'embouchure est ouverte un déséquilibre de ces forces de pression se produit en même temps qu'un jet d'air est éjecté du ballon. On observe que, par un effet de réaction, le ballon se déplace dans un sens exactement opposé à celui du jet d'air. L'air expulsé du ballon est soumis à une force exercée par le ballon et, par réaction, l'air exerce sur le ballon une force opposée. Le principe d'action et de réaction édicté par Newton est très général : si un corps A exerce sur un corps B une force, le corps B exerce en réaction une force exactement opposée sur le corps A.

On montre que la force qui permet au ballon de se déplacer est directement liée à la pression dans le jet et au débit de quantité de mouvement qui s'échappe du ballon, cette quantité étant le produit du débit d'air par sa vitesse.

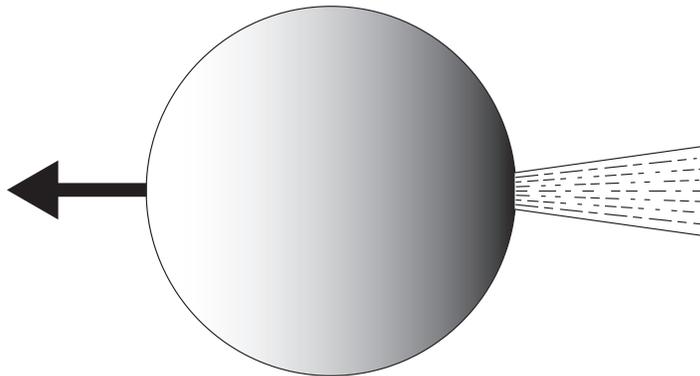


FIG. 17 – Un réacteur simple : le ballon de baudruche

L'expérience du ballon illustre le principe du moteur à réaction. On utilise

d'ailleurs maintenant couramment le mot «jet», prononcé à l'anglaise, pour désigner un avion de transport qui utilise des moteurs à réaction.

Les moteurs-fusées sont une application directe du principe de réaction. Un tel moteur est composé d'un réservoir où s'effectue la combustion (poudre ou mélange hydrogène-oxygène par exemple). Les gaz de combustion s'échappent de la tuyère et forment un jet à grande vitesse. Le décollage très spectaculaire des fusées Ariane est réalisé à l'aide de tels moteurs.

Il est important de noter que la force de propulsion est créée par un déséquilibre des forces de pression qui agissent sur la structure du moteur. Le rejet des gaz à l'extérieur ne crée pas directement la force de propulsion ; les deux phénomènes sont étroitement liés car c'est le débit de gaz à l'extérieur qui est à l'origine du déséquilibre des forces de pression internes. Il serait faux de croire que le jet s'appuie sur l'air ambiant pour créer la force de propulsion. En effet, un moteur-fusée fonctionne parfaitement dans le vide.

Tous les moteurs d'avion utilisent le principe de réaction. Trois types de moteurs sont souvent utilisés : le statoréacteur, le turboréacteur, le turbopropulseur.

Le moteur le plus simple, dans son principe, est le statoréacteur (figure 18) car il ne présente aucune partie tournante. Ce type de moteur est intéressant pour les véhicules à grande vitesse, au delà de $M = 3$. La grande vitesse permet une compression quasiment naturelle de l'air qui est admis dans le réacteur. L'énergie dégagée par la combustion du carburant avec l'air est utilisée ensuite pour former un jet à haute vitesse qui s'échappe du moteur au moyen d'une tuyère. Comme pour le ballon, le déséquilibre des forces de pression à l'intérieur du moteur constitue la force de propulsion. Cette force est transmise à l'avion par le système d'accrochage du moteur. Ce moteur offre une simplicité de principe attrayante mais il ne peut pas se mettre en marche tout seul ; l'avion doit déjà avoir une certaine vitesse pour que le moteur puisse développer une force propulsive. Il est nécessaire de l'associer à un autre système de propulsion, par exemple un moteur-fusée. Le statoréacteur a été proposé par le Français René Lorin (1877-1933) en 1913 et a été réinventé par René Leduc (1898-1968) en 1933 sous le nom de tuyère thermo-propulsive. L'avion prototype Leduc 010 muni d'un statoréacteur était accroché à un autre avion, le quadrimoteur Languedoc duquel il était lâché quand une vitesse suffisante était atteinte. Le premier vol avec statoréacteur allumé eut lieu le 21 avril 1949. Plus tard, avec l'avion Griffon, André Turcat battait des records du monde de vitesse ($M = 2,19$ en octobre 1959). Par la suite, André Turcat allait devenir l'un des pilotes de Concorde.

Le turboréacteur est typiquement le moteur à réaction. Un premier projet a été proposé par Jean Delouvrier (appelé aussi Charles de Louvrié) en 1863 ; il soumit à l'Académie des Sciences le projet de son aéronef, un appareil mu par l'éjection d'un fluide sous pression après un apport de chaleur. En fait, l'invention du turboréacteur est attribuée conjointement à un anglais Frank Whittle (1907-1996) et à un

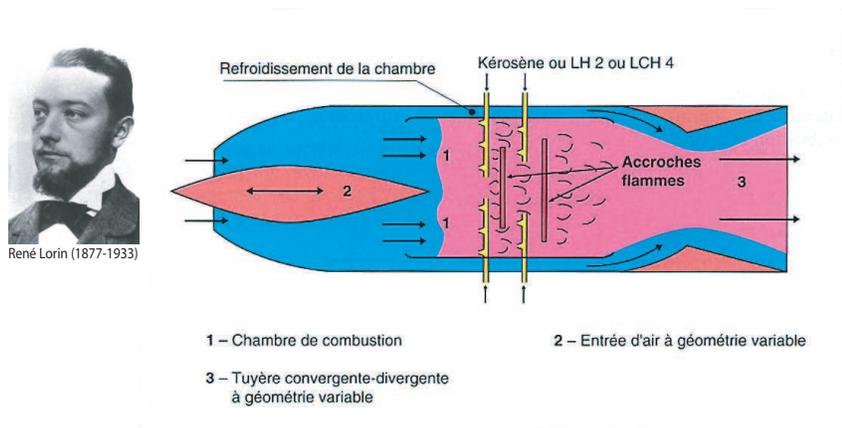


FIG. 18 – Schéma de principe d'un statoréacteur, d'après André Peyrat-Armandy



FIG. 19 – L'avion Leduc 010 et son avion porteur Languedoc



Frank Whittle

Hans von Ohain

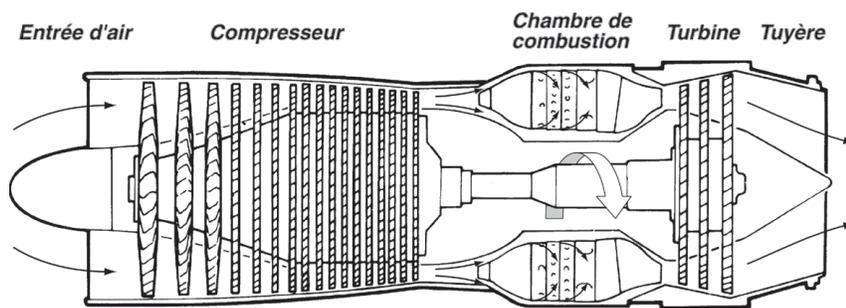


FIG. 20 – Schéma de principe d'un turbo-réacteur

allemand Hans von Ohain (1911-1998). Sir Frank Whittle déposa en 1930 le brevet d'un moteur qui comportait tous les éléments du turbo-réacteur moderne : compresseur axial multi-étage, chambre de combustion, turbine entraînant le compresseur et tuyère propulsive. En Allemagne, Hans von Ohain déposa son brevet en 1934.

Le turbo-réacteur (figure 20) est composé schématiquement d'une entrée d'air, d'un compresseur, d'une chambre de combustion, d'une turbine et d'une tuyère. Dans son fonctionnement, on retrouve les différentes phases d'un moteur de voiture (admission, compression, combustion, échappement). Le compresseur est une partie tournante qui permet d'aspirer l'air et de le comprimer avant d'arriver dans la chambre de combustion. L'énergie produite par la combustion est utilisée en partie pour faire tourner la turbine qui, à son tour, entraîne le compresseur. Enfin, le gaz est accéléré à travers une tuyère et il est rejeté à grande vitesse. Par le principe de réaction, cet échappement de gaz à haute vitesse est associé à une force appliquée au réacteur et donc à l'avion, en sens opposé. Ce moteur ne démarre pas seul. Il faut utiliser un petit moteur auxiliaire pour entraîner le compresseur au démarrage. Une grande partie des avions de transport utilise des moteurs de type turbo-réacteur.

Historiquement, les avions à hélice utilisaient un moteur à piston pour faire tourner l'hélice. Celle-ci fournit la force de propulsion par un effet de réaction. En effet, l'accélération communiquée à l'air qui traverse l'hélice est associée à une force de réaction sur l'hélice. Aujourd'hui, l'hélice fonctionne avec un générateur

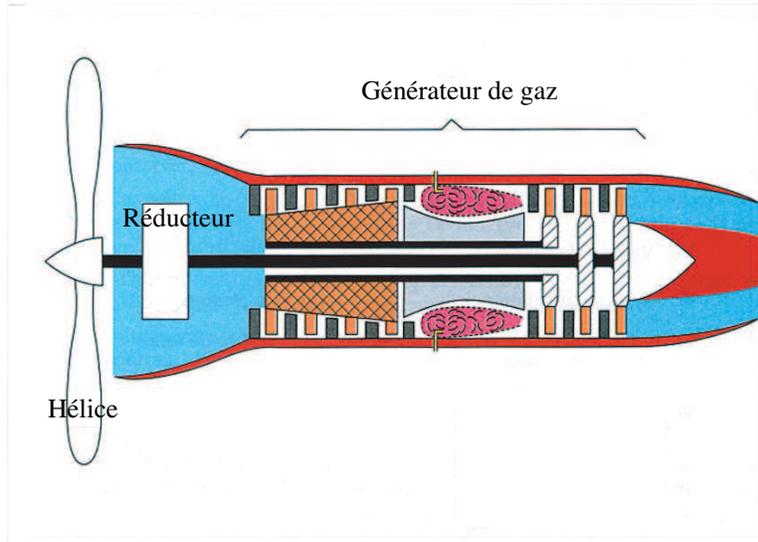


FIG. 21 – Schéma de principe d'un turbopropulseur, d'après André Peyrat-Armandy

composé d'un compresseur, une chambre de combustion et une turbine. La plus grande partie de l'énergie récupérée sur la turbine sert à faire tourner l'hélice. Le turbopropulseur (figure 21) est utilisé sur les avions de transport régionaux ; il a de bonnes performances au décollage et autorise des pistes courtes. Bien que le fonctionnement de l'hélice repose sur un principe de réaction, ce type de moteur n'est pas classé dans les réacteurs.

Stabilité statique d'un avion

Comment faire planer une feuille de papier ? Une feuille de papier ou de carton n'a pas tendance à planer très bien. Prenons une feuille de papier de format A4 que l'on replie en deux ; on obtient un rectangle $21 \times 14,85$ cm formé des deux replis de la feuille initiale (figure 22). On pose cette feuille sur les mains, la pliure du papier en avant, et on essaie de lancer la feuille pour la faire planer. Même avec beaucoup d'entraînement on n'y arrive pas car la feuille se déplace dans un mouvement désordonné. Alors, on replie la partie supérieure sur elle-même deux ou trois fois et on agrafe bien le tout ensemble pour éviter de former un accordéon. On obtient donc un rectangle $21 \times 14,85$ cm, l'une des parties est formée d'une feuille simple et l'autre est le résultat des pliages successifs. On essaie de la faire planer

de la même façon que précédemment et maintenant, avec un peu d'entraînement, ça fonctionne très bien. Que s'est-il passé ? L'opération de pliage a eu pour effet de modifier la répartition des masses, le centre de gravité s'est déplacé vers l'avant. Le fonctionnement aérodynamique n'a pas été modifié de sorte que la répartition des pressions n'a pas bougé. Le simple fait d'avancer le centre de gravité a donc permis un vol stable.

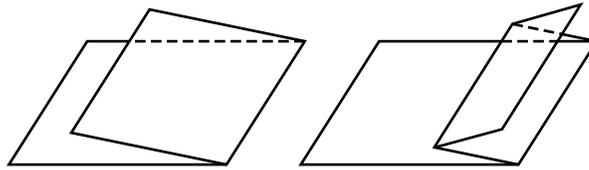


FIG. 22 – Pliage d'une feuille de papier pour la faire planer

Pour un avion en vol de croisière, la force de portance équilibre exactement le poids et la force de propulsion équilibre exactement la traînée. En outre, pour que l'avion ne tourne pas sur lui-même autour de son centre de gravité, il faut que le moment résultant des forces par rapport au centre de gravité soit nul.

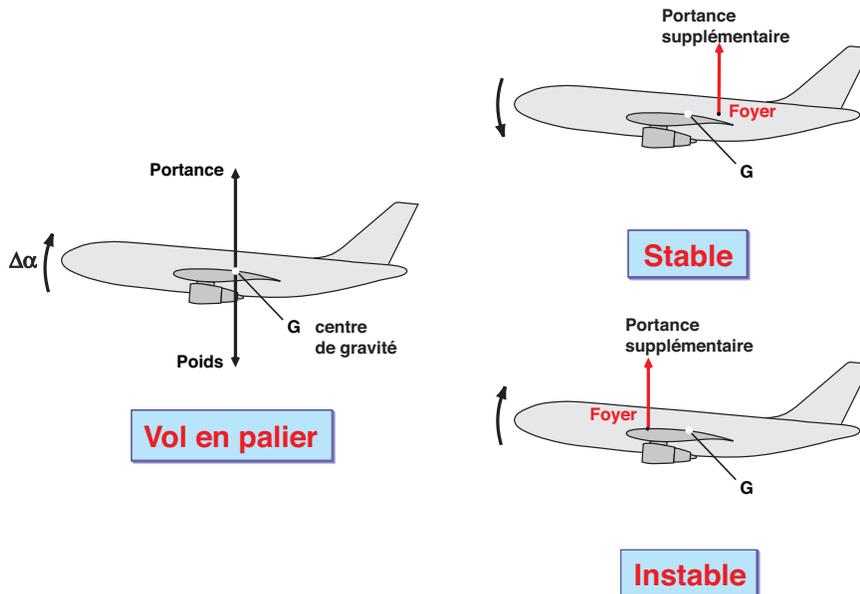


FIG. 23 – Stabilité statique d'un avion

Imaginons qu'une bourrasque de vent fasse cabrer un peu l'avion (figure 23). L'incidence augmentant, la force de portance augmente et l'on montre que, pratiquement, la portance supplémentaire ainsi créée est appliquée en un point particulier appelé le foyer. La position du foyer est une caractéristique purement aérodynamique de l'avion. La portance supplémentaire a tendance à faire pivoter l'avion autour d'un axe horizontal passant par le centre de gravité, appelé axe de tangage. Supposons que le foyer soit en arrière du centre de gravité. Alors, la portance supplémentaire a tendance à faire piquer l'avion. C'est comme si on tirait l'arrière de l'avion vers le haut. L'avion revient donc vers sa position initiale. On dit qu'il est stable (statiquement) ; c'est le cas du centrage avant. C'est ce qui se passait pour la feuille de papier repliée plusieurs fois.

Si, au contraire, le foyer est en avant, tout se passe comme si on tirait l'avant de l'avion vers le haut. Il se cabre encore plus. On dit que l'avion est instable (statiquement) ; c'est le cas du centrage arrière.

On pourrait en tirer la conclusion qu'il vaut mieux que l'avion soit conçu pour être stable. Pour un avion de transport, c'est préférable. Pour un avion militaire, ce n'est pas forcément vrai car l'agilité est meilleure si l'avion est instable. Dans ce cas, le pilotage assisté par ordinateur donne des performances remarquables.

Avant chaque vol, un pilote de ligne ou un pilote privé doit faire un bilan de masse (étude de la répartition des masses au sein de l'avion) afin de s'assurer que le centrage avant est correct ; le décollage est interdit pour tout centrage arrière.

La position relative du foyer par rapport au centre de gravité peut varier en cours de vol parce que du carburant est consommé et aussi parce que la position du foyer dépend du régime de vol, subsonique ou supersonique. Ainsi, sur l'avion Concorde, pour respecter une position correcte du centre de gravité par rapport au foyer, un système de transfert de carburant a été mis en place. Sur certains avions de transport, ce système de transfert a été implanté aussi pour optimiser les performances de l'avion.

Gouvernes d'un avion

Un avion classique dispose de différents éléments qui peuvent être commandés par le pilote pour déplacer l'avion dans l'espace (figure 24) :

- La gouverne de profondeur est un volet mobile situé sur l'arrière de l'empennage horizontal qui lui-même est placé vers la queue de l'appareil. En modifiant l'angle de la gouverne de profondeur, le pilote modifie la force agissant sur l'empennage horizontal et, grâce à un bras de levier important, cette variation de force fait piquer ou cabrer l'avion autour de l'axe de tangage, axe horizontal passant par le centre de gravité de l'avion. Cette commande permet de régler l'incidence de l'avion.
- La gouverne de direction est un volet mobile situé sur l'arrière de la dérive, elle-

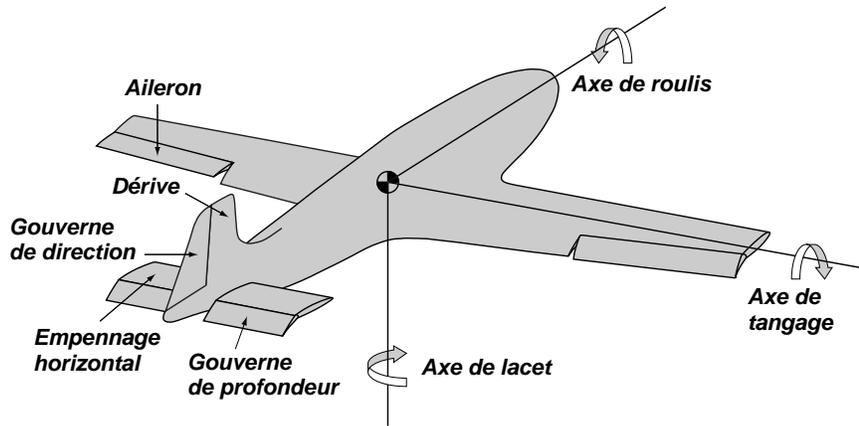


FIG. 24 – Gouvernes d'un avion

même étant la partie verticale située à l'arrière de l'avion. La commande de direction fait tourner l'avion autour d'un axe vertical appelé axe de lacet.

- Les ailerons sont des volets mobiles placés en bout et vers l'arrière des ailes. La commande de gauchissement actionne les volets des deux ailes en sens inverse de sorte que les ailes sont soumises à un différentiel de portance qui fait tourner l'avion autour d'un axe longitudinal appelé axe de roulis.
- Une série de volets attachés à l'aile peut être déployée pour modifier la forme de

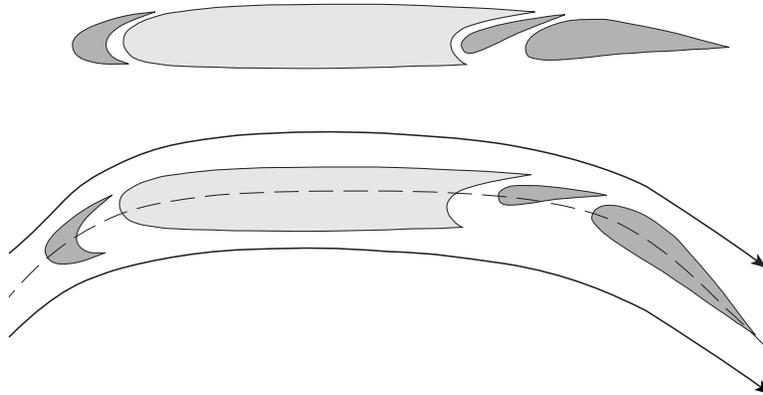


FIG. 25 – Le déploiement des volets modifie la forme de l'aile ; la courbure de l'aile est accentuée et, de ce fait, un supplément de portance est obtenu : c'est l'hypersustentation

l'aile, sa cambrure, et créer un effet d'hypersustentation (c'est-à-dire d'augmenta-

tion de portance) utilisé à basse vitesse, au décollage ou à l'atterrissage (figure 25).

- Des aérofreins, placés sur l'extrados de l'aile, peuvent être sortis pour augmenter la traînée de l'avion.
- Enfin, le moteur peut être commandé pour délivrer différentes valeurs de la poussée.

En vol stabilisé, si la pente de la trajectoire est assez faible, on peut considérer que la portance équilibre le poids de l'avion. Or, la portance est donnée par la formule

$$\text{Portance} = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_z$$

où ρ est la masse volumique de l'air, V est la vitesse de l'avion, S est une surface de référence caractéristique de l'avion et C_z est le coefficient de portance. La formule de la portance indique donc que la portance augmente quand la surface S augmente (avec des ailes plus grandes) et quand la vitesse V de l'avion augmente. En outre, le coefficient de portance est une fonction de l'incidence et, à une altitude donnée, la masse volumique de l'air est connue. Donc, si l'incidence est fixée, la vitesse de l'avion est fixée. De plus, l'incidence de l'avion est réglée par le pilote grâce à la commande de profondeur. On peut donc dire que le pilote règle la vitesse de l'avion en agissant sur la gouverne de profondeur. La pente de la trajectoire dépend alors de la différence entre la poussée et la traînée. Or, la traînée est donnée par la formule :

$$\text{Traînée} = \frac{1}{2} \rho S V^2 C_x$$

Au coefficient C_x près, la formule est la même que celle qui donne la portance ; la notion de coefficient de traînée C_x a été utilisée pour la publicité de certaines automobiles. Si la vitesse et l'incidence sont fixées, le pilote peut encore agir sur la poussée du moteur pour modifier la pente de la trajectoire. Si la poussée est augmentée, l'avion aura une pente plus forte. Ces éléments donnent les paramètres utilisés pour faire monter ou descendre l'avion.

On pourrait penser que le virage est produit par le pivotement de la gouverne de direction. Cette procédure est très peu efficace car l'avion dérape plutôt qu'il ne vire ; il se comporte comme un navire lorsque le gouvernail est braqué. Cette manœuvre n'est utilisée que pour produire des virages longs avec une très faible variation de cap. L'autre solution consiste à agir sur la commande de gauchissement qui fait pivoter l'avion autour de l'axe de roulis. La portance de l'avion pivote en même temps autour de cet axe ce qui entraîne l'existence d'une force horizontale amenant l'avion dans une trajectoire circulaire, un peu comme un motard qui, à grande vitesse, penche sa moto pour tourner. En même temps, pour compenser un effet de dérapage de l'avion (effet de lacet induit), il faut agir sur la gouverne de direction. On conjugue alors deux commandes, gauchissement et direction, pour maintenir la symétrie du vol et tourner de façon optimale sans déraper.

Au décollage, l'avion acquiert une vitesse suffisante en s'élançant sur le sol pour que la force de portance devienne supérieure au poids de l'avion. Les volets hypersustentateurs peuvent être utilisés pour augmenter la portance. En règle générale, un avion décolle face au vent ce qui permet d'augmenter la vitesse relative de l'avion par rapport à l'air et de diminuer la distance de décollage. Cette question n'a pas toujours été comprise et certains croyaient que pour s'envoler il valait mieux avoir le vent dans le dos.

À l'atterrissage, les aérofreins et les systèmes hypersustentateurs sont mis en œuvre. La vitesse d'atterrissage doit être faible ; de ce fait, si rien n'était fait, la portance diminuerait considérablement et l'avion tomberait sèchement sur le sol. Le système hypersustentateur a donc pour objet de maintenir une portance assez forte, légèrement inférieure au poids de l'avion, même lorsque la vitesse est devenue faible. Les aérofreins permettent de ralentir efficacement l'avion sans toucher au régime moteur.

Et aujourd'hui ?

Le contraste entre le Flyer des frères Wright et l'Airbus A380 est immense. La passion des pionniers est toujours vivace mais il s'y est ajouté le défi industriel et commercial ; l'aboutissement technique relève encore de l'exploit. L'Airbus A380 est la concrétisation d'une création collective.

On pourrait croire qu'aujourd'hui tout est connu et que tous les problèmes sont résolus. C'est loin d'être le cas. Même les techniques de base comme l'aérodynamique et l'énergétique n'ont pas achevé leur développement. Certes, la progression a été importante. Les bases théoriques sont connues et l'on dispose des méthodes permettant de fournir des solutions numériques aux équations de la mécanique des fluides. Pour autant, on ne sait pas encore tout faire et il n'est pas question de construire un avion uniquement sur la base de calculs. Il est vrai que les calculs prennent de plus en plus de place dans la définition d'un avion mais les essais en soufflerie gardent un rôle majeur notamment quand l'ensemble de l'avion a été défini. Quand l'avion est construit, les essais en vol sont aussi indispensables. Ce processus est en fin de compte celui qui a permis aux frères Wright d'aboutir au succès.

Les efforts de recherche portent actuellement sur la réduction des coûts, l'environnement, la sécurité. Des progrès sont attendus grâce à des avancées dans tous les domaines : aérodynamique, propulsion, matériaux, avionique, conception d'ensemble. La prise en compte des interactions entre les différentes disciplines est devenue essentielle et c'est l'optimisation globale de l'appareil qui est visée.

Pour ne citer qu'un seul exemple, l'emploi de matériaux composites laisse entrevoir des perspectives particulièrement prometteuses car ils permettent des gains

de masse sensibles. Il s'ensuit que la portance nécessaire est plus faible, la traînée aussi. La puissance délivrée par les moteurs peut donc être plus faible, d'où des gains sur la pollution et le bruit.

Plus que jamais, l'aéronautique a besoin des efforts conjugués des chercheurs, des ingénieurs et des techniciens qui participent à la réalisation d'un rêve encore inaccessible il n'y a qu'un siècle : voler, mais voler dans les meilleures conditions.

Bibliographie

Jean-Pierre Petit. Si on volait ? Les aventures d'Anselme Lanturlu. Editions Belin.
Commentaire : une bande dessinée scientifique bien réussie, très pédagogique, qui mène progressivement au principe de l'aile.

André Peyrat-Armandy. Les avions de transport modernes et futurs. Editions teknea 203, avenue de Fronton, 31 200 Toulouse.

Commentaire : un ouvrage un peu technique mais qui contient des notions assez accessibles et bien dépouillées. C'est un ouvrage très pédagogique.

John D. Anderson, Jr. A History of Aerodynamics and its Impact on Flying Machines. Cambridge University Press.

Commentaire : un ouvrage apprécié par les spécialistes.

Pierre Lissarague. Premiers envols. Editions Joël Cuénot.

Commentaire : un très joli livre avec de magnifiques photographies des premiers avions.

Edmond Petit. Nouvelle histoire mondiale de l'aviation. Editions Albin Michel.

Commentaire : un ouvrage qui couvre toute l'histoire de l'aviation.

Histoire de l'aviation, une épopée du XXème siècle. CD-ROM fonctionnant sur PC édité par Montparnasse multimedia.

Commentaire : ce CD retrace une grande partie de l'histoire de l'aviation depuis les pionniers. Des ateliers interactifs sont proposés sur les principes de vol, la propulsion, le pilotage.