

L'aérodynamique : du vol à voile à la navette spatiale



Travail de Maturité rédigé par
Mentor

Session de Maturité 2005

Lycée Denis-de-Rougemont

Deborah Mueller
M. Eduardo Principi

Classe Pyam 3MG4

10.12.2004

Remerciements

Tout d'abord, je désire remercier certaines personnes qui m'ont beaucoup aidé à créer ce travail de maturité :

- À M.Claude Nicollier qui a pris le temps de répondre à mes questions
- À M.Hans-Klaus Rummler qui a eu la gentillesse d'effectuer les corrections au niveau mathématique et physique.
- À M.Andrin Landolt et à M.Lukas Prochazka qui a eu l'amabilité de me présenter ses expériences en soufflerie à l'ETHZ.
- À M.Beer qui m'a grandement aidé notamment en répondant à mes questions.
- À M.Eduardo Principi, mon mentor, qui m'a accompagné pendant la rédaction de ce TM.

Un grand Merci à tous et Bonne Lecture.....

Sommaire

TITRE	
REMERCIEMENTS	X
SOMMAIRE	XX
I. INTRODUCTION	1
II. HISTORIQUE	2
III. AERODYNAMIQUE DU PLANEUR	4
III.1. DOMAINE D'APPLICATION DE L'AERODYNAMIQUE DU VOL A VOILE.....	4
III.2. LE PRINCIPE DE BERNOULLI – ÉQUATION DE CONTINUITÉ	4
III.3. LES DIFFÉRENTES PARTIES DU PROFIL D'UNE AILE DÉFINIE	7
III.4. LES COEFFICIENTS C_z ET C_x	8
III.5. LA FORCE DE PORTANCE.....	9
III.6. LA FORCE DE TRAÎNÉE ET LA COUCHE LIMITE.....	10
III.7. AUGMENTATION DE L'ANGLE D'ATTAQUE	11
III.8. DIFFÉRENTS PROFILS D'AILES ET PARTIES DU PLANEUR	14
III.9. TEST AÉRODYNAMIQUE: LA SOUFFLERIE (WIND TUNNEL)	15
III.10. LA FINESSE D'UN PLANEUR	15
III.11. MÉTHODE DE GAINS D'ALTITUDE UTILISÉE PAR LE PILOTE (PRATIQUE).....	16
III.12. ÉCOULEMENT SYMÉTRIQUE OU DISSYMMÉTRIQUE	17
III.13. LES AÉROFREINS (DÉPORTEURS).....	17
III.14. L'INVENTAIRE DES FORCES DANS DIFFÉRENTS ÉTATS DE VOL (PRATIQUE) :	18
III.14.a. <i>Loi de Newton</i>	18
III.14.b. <i>Les forces aérodynamiques appliquées sur différents états de vol</i>	19
IV. LA NAVETTE SPATIALE ET SON AÉRODYNAMIQUE	22
IV.1. COMPARAISON DES DIMENSIONS ENTRE LA NAVETTE SPATIALE ET UN PLANEUR	22
IV.2. LE FONCTIONNEMENT DE L'AERODYNAMIQUE POUR LA NAVETTE SPATIALE	24
IV.2.a. <i>Phase de rentrée dans l'atmosphère</i>	24
IV.2.b. <i>Phase d'approche et d'atterrissage</i>	25
IV.3. MATERIAUX ET AERODYNAMIQUE.....	26
V. CONCLUSION	29
ANNEXE	30
DÉFINITIONS	30
LA GLISSADE (AUSSI DIT VOL PLANÉ LATÉRAL = SLIDE SLIP)	33
LE FONCTIONNEMENT D'UNE SOUFFLERIE.....	33
BIBLIOGRAPHIE	XXX



I. Introduction

S'ENVOLER....

...un rêve aussi ancien que l'humanité existe.

L'air tourbillonne sous votre avion, le paysage défile tel un tableau d'art. L'air pénètre dans vos vêtements et vous sentez la fraîcheur de la nature pure autour de vous.

Vous planez à travers les airs, l'ambiance change de temps en temps, de jour en jour, de lieu en lieu.... C'est une sensation de liberté extraordinaire.

Le vol à voile est un vol plané sans aide moteur qui utilise les courants d'airs chauds ascendants (thermiques) et les vents de colline pour gagner de l'altitude.

Le premier vrai vol plané d'une heure a été accompli par Otto Lilienthal en 1891.

Le sentiment de paix engendré par la possibilité de se mouvoir dans toutes les directions voulues et par-dessus tous les obstacles est une sensation que tout le monde apprécierait.

Le vol à voile est non seulement un sport silencieux mais également invisible, où les spectateurs sont impossibles. On peut observer les atterrissages, les décollages et parfois, si le pilote n'est pas trop haut et trop loin dans le ciel, un virage. Qui a-t-il entre le décollage et l'atterrissage ? Du combat et du jeu, du drame et du romantisme, de la fascination et de la beauté. Tout ceci est ce qu'un pilote peut vivre et apprécier.

Là haut, au-dessus, en dessous ou entre les nuages, chaque situation de vol amène une paix et une tranquillité dans notre esprit. Le grand pouvoir des nuages majestueux et immenses nous impressionne et nous tire à nos limites.

Le vol plané est la chose la plus belle et la plus sensationnelle qui existe.

Nous avançons grâce et avec la nature, sans même l'endommager ou la polluer. L'aviation nous permet de l'observer, de découvrir la Terre et ses phénomènes avec la perspective d'un oiseau.

Il n'est pas très difficile de comprendre pourquoi des êtres vivants, des objets ou animaux spécifiques ont la capacité de voler et d'autres pas. Alors très vite, nous allons comprendre pourquoi notre espèce ne sera jamais capable de dépasser la force de pesanteur sans aide extérieure de poussée mécanique.

L'aérodynamique est un domaine de la physique très précis qui étudie les différents phénomènes naturels qui se déroulent lorsqu'un corps se déplace dans un espace contenant de l'air ou un autre fluide. En d'autres termes, l'aérodynamique est la « science du mouvement de l'air ». Cela implique une bonne connaissance de la dynamique des fluides.

Après une vue d'ensemble historique du vol, j'en présenterai de manière spécifique les aspects liés au vol à voile. Ensuite, je ferai un parallèle avec la navette spatiale, thème très abordé de nos jours.

J'aimerais être capable, après avoir effectué ce travail, de mieux comprendre pourquoi un avion peut voler sans moteur.



II. Historique

Les connaissances actuelles nous viennent des pionniers et de l'engagement de scientifiques dans la recherche de pointe comme l'aérodynamique. Nous pouvons donc appliquer nos connaissances sur l'aérodynamique à des buts beaucoup plus hauts, comme l'aviation militaire, les jets à vitesse supersonique ou l'aérospatial. Pendant des siècles, la science et sa société se sont de plus en plus développées pour arriver à ce qu'on obtient de nos jours.

Depuis le temps des Grecs, le rêve d'imiter les oiseaux fut la base des essais de vol qui perdura pendant des siècles. Il faudra attendre le Moyen-Âge pour que les premières expériences concluantes voient le jour. En 1420, le vénitien Giovanni da Fontana lança un modèle d'oiseau propulsé par fusée, qui fit un vol vertical de 30 mètres. Ce n'est cependant qu'à la Renaissance que la théorie aérodynamique s'installe, avec les premières expériences sur ce thème orchestré par Galilée. Ce dernier cherchait «le principe de la nature de la résistance de l'air en étudiant le mouvement d'un pendule»¹. A cette même période Leonardo de Vinci, obsédé par le mécanisme de vol des oiseaux, terminait des recherches détaillées et basiques sur la physiologie de ces derniers. Il découvrit que les oiseaux planaient à travers des couches d'air assez étanches pour les porter, puis mit en évidence la différence de pression autour du profil d'une aile, différence qui produit la poussée nécessaire au vol. Les découvertes fondamentales de Leonardo da Vinci n'ont été reprises que cent ans plus tard, notamment par Bernoulli.

Au sortir de la renaissance, les premières équations physiques sur l'aérodynamique se mettent en place. A la fin du 17^{ème}, Newton fait une découverte d'importance, appelée principe de Newton : « Si une force extérieure agit sur un corps, son état de mouvement change. On appelle accélération la variation de vitesse survenant alors, par unité de temps. L'accélération intervient dans la même direction que celle vers laquelle agit la force extérieure. Elle est proportionnelle à l'intensité de cette force. »². Ce principe a notamment été utilisé pour la construction des souffleries.

Le suisse Daniel Bernoulli (1700-1782) établit le théorème de l'écoulement des fluides incompressibles, théorème sur lequel on reviendra dans la suite de ce travail. Suite à cela, les découvertes s'enchaînent : Euler (1707-1783) établit pour sa part une théorie sur la résistance d'un fluide au mouvement d'un corps basé sur les effets de pression et Laplace (1749-1829) formule la vitesse de propagation du son dans l'air.

Parallèlement à ces recherches, les scientifiques se consacrent à l'étude des phénomènes supersoniques, qui s'élèvent à des vitesses pouvant aller jusqu'à 1500 m/sec. A la fin du 19^{ème}, le physicien autrichien, Mach, découvre les ondes de choc accompagnants un corps en mouvement se déplaçant à des vitesses supersoniques. Il met en place des techniques d'observation des écoulements supersoniques, nommés méthode strioscopique, encore utilisée aujourd'hui. A ces théories générales, d'autres chercheurs se concentrent plus spécifiquement sur le vol. L'anglais Sir George Cayley développe le premier profil d'aile en s'appuyant sur une coupe transversale d'une truite. Dès lors, le profil de l'aile prend de l'importance dans l'aérodynamique.

L'intérêt pour le vol se généralise alors et commence à conquérir le grand public. L'aérodynamique n'est plus l'affaire de quelques passionnés, mais atteint le statut de science à part entière. Diverses souffleries sont construites partout en Europe, d'abord en Angleterre par Wenham (1871) puis par Phillips (1891), en Russie par Joukowski et en France par Rateau et

¹ LACHNITT Jacques, *L'aérodynamique*, Ch.1 p.7

² GUGGIARI Bruno et WEICHELTL Peter, *Principes du vol*, Ch.2-1-2 p.1



Eiffel. En effet, la tour Eiffel est une construction faisant suite à des mesures de résistance de l'air sur des plaques planes, en fer dans ce cas.



figure 1: Ci-dessus nous pouvons voir un des premiers essais fait par Otto Lilienthal.

Mais l'histoire du vol à voile débute réellement avec Lilienthal (1848-1896). Il comprend, que reproduire le battement des ailes des oiseaux pour voler n'est pas nécessaire, mais qu'il faut utiliser l'énergie potentielle du lieu de départ pour décoller (flans d'une montagne, etc.). Se basant sur des « parapentes » - une couverture de cire et de bois de saule tendu – il fait ses premiers essais de vol à voile en pilotant son engin avec les différents emplacements des poids uniquement.

Le premier vol motorisé des frères Wilbur et Orville Wright découlera du fruit de ces expériences. En effet, avant d'arriver à un vol motorisé, les deux frères font un certain nombre d'essais avec un planeur pour tout d'abord en comprendre le fonctionnement aérodynamique. Ils réussissent à planer en l'air sur une distance de 90 mètres à une vitesse de plus de 20 nœuds. La mécanique de la profondeur du planeur, qui donne à l'avion une meilleure stabilité horizontale, devient alors l'invention la plus importante. Pour perfectionner la pilotabilité du planeur, ils construisent une soufflerie. Ils se rendent également compte qu'une aile plus mince et plus longue donne une plus grande poussée. Ils développent une dérive qui apporta une plus grande stabilité autour de l'axe verticale et qui est la base de leur succès. Cela leur permet de devenir de véritables Champions du vol plané avec plus de 100 vols dépassant les 180 mètres. Leur premier vol moteur réussi avec succès le 17 décembre est équipé d'un moteur à essence 12-PS qu'ils construisirent eux-mêmes, les moteurs électriques de l'époque n'étant pas assez puissants.



figure 2: Portrait des Frères Wright (à gauche) Wilbur et (à droite) Orville Wright dans les années 1903.

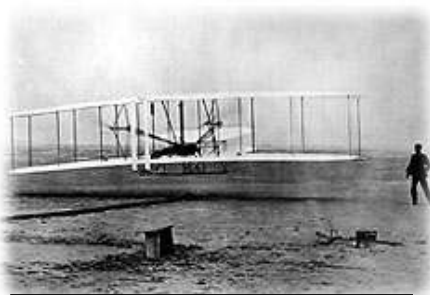


figure 3 1 L'envol des Frères Wright le 17 décembre 1903, grâce à leur avion Flyer 1.

En 1908, Wilbur établit un record mondial, en effectuant un vol d'une durée de plus d'une heure et demie. L'année suivante, Louis Blériot traverse la Manche pour la première fois grâce à un avion motorisé. Le développement de l'aviation prend alors son essor, se concentrant sur les modèles motorisés, le vol à voile étant plutôt réservé aux sportifs.

Les théoriciens ne s'arrêtent pas pour autant, et en 1920 l'aérodynamicien allemand, Prantl explique le comportement de l'écoulement de l'air et le principe de la portance de l'air. C'est le premier à introduire la notion de couche limite, suivi par les conséquences de la compressibilité de l'air lors de vitesses élevées.



figure 4: L'avion de Louis Blériot lors de sa traversée du Manche en 1909.

Le développement de l'aérodynamique a servi et sert encore aujourd'hui à de nombreux autres domaines, comme par exemple le développement de l'automobile, de la Formule 1, mais également de la navigation ou du chemin de fer. Cette technologie est donc présente dans notre vie quotidienne et le sera encore pour longtemps.



III. Aérodynamique du planeur

Dans ce chapitre, je vais tenter d'expliquer comment est-ce qu'un planeur peut voler. Pour ce faire, j'étudierais en détail les principes d'aérodynamiques nécessaires à cette compréhension.

L'aérodynamique dans le domaine du vol à voile se concentre sur l'étude de la dynamique des fluides, c'est-à-dire l'étude des liaisons entre les forces et les mouvements d'un corps. La dynamique du vol est donc l'étude des différentes forces qui s'appliquent en vol à l'ensemble **aile+pilote**. Je vais me concentrer sur celles qui régissent l'aile, car c'est cela qui me permettra de comprendre le fonctionnement du planeur.

III.1. Domaine d'application de l'aérodynamique du vol à voile

La première chose importante en aérodynamique est de savoir dans quel domaine on se trouve. Ces domaines sont au nombre de trois, à savoir :

- le domaine subsonique, inférieur à Mach 1.
- le domaine supersonique, supérieur à Mach 1 mais inférieur à Mach 6-7
- le domaine hypersonique, supérieur ou égal à Mach 7

Ces différents domaines sont déterminés par le nombre Mach, qui est en fait simplement la vitesse du son au niveau de la mer (la vitesse de propagation du son³ dépend de la température et de la pression atmosphérique). A 20°C, sous une pression atmosphérique normale (1 bar), c'est à dire au niveau de la mer, elle est de 340 mètres par seconde soit 1224 km/h. Le nombre Mach 1 correspond donc à une vitesse de 1224 km/h.

Pour l'aérodynamique du planeur, nous resterons dans le domaine subsonique.

III.2. Le principe de Bernoulli - équation de continuité

Ce principe capital se décline comme suit :

$$\mathbf{H = p + q} = p_2 - p_1 = \frac{1}{2}\rho v_1^2 - \frac{1}{2}\rho v_2^2 + (\rho g y_2 - \rho g y_1) = \Delta p = \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2)$$

H = pression totale (pression globale)

p = pression statique

q = pression dynamique (pression d'engorgement)

ρ = la masse volumique de l'air. Quand la température augmente, elle diminue. De ce fait le planeur porte moins quand il fait chaud. La masse volumique de l'air diminue également avec l'altitude. La portance diminue donc avec l'altitude.

v = c'est la vitesse du planeur dans l'air (vitesse vraie par rapport au vent pas par rapport au sol). Si on multiplie par 2 la vitesse on multiplie par 4 la portance.

³ Le son est en fait un mouvement de vibration des molécules qui composent l'air. Ces vibrations se propagent sous forme d'onde, phénomène appelé onde sonore.



Cette équation cherche à définir H , c'est-à-dire la pression qui s'exerce sur un corps mis dans un fluide (par exemple l'air). Si l'on regarde la première partie de la relation, $H = p + q$, la pression totale est en fait la somme de la pression statique et de la pression dynamique.

Pour comprendre cette relation, nous faisons passer un fluide «parfait et idéal» en mouvement à une certaine vitesse dans un tube de section différente. Maintenir la constance de la masse volumique (densité) d'un fluide est la base fondamentale de la relation de Bernoulli. Les deux pressions - statique et dynamique - dépendent l'une de l'autre comme le montre le schéma ci-dessous :

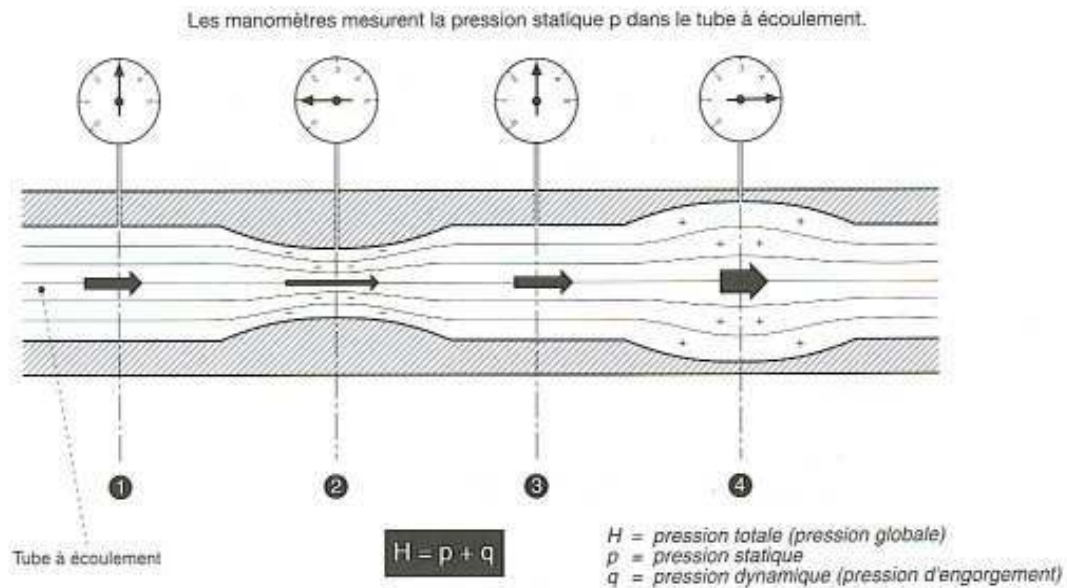


figure 5: Voici ci-dessus le tube d'engorgement où on fait passer l'air dans le sens des flèches.

Sur ce schéma, le fluide représenté est l'air, qui est d'un ρ (densité de l'air) constant.

L'air entre au point **1** (section initiale du tube), où l'écoulement laminaire est normal. Lorsque l'écoulement atteint le rétrécissement de la section transversale du tube au point **2**, la vitesse du fluide augmente pour pouvoir garder la même quantité d'air par volume. On appelle cet état une dépression car la pression statique⁴ diminue à cause de l'augmentation de la vitesse d'écoulement. En quittant le rétrécissement du point **2**, la vitesse d'écoulement au point **3** reprend sa valeur initiale du point **1**, tout comme la pression statique. En atteignant l'élargissement au point **4**, la vitesse d'écoulement ralentit pour à nouveau garder la même densité de flux qu'au départ, ce qui fait augmenter la pression statique. On peut donc constater que l'énergie totale de la masse d'air reste inchangée dans le tube à écoulement. En résumé, on peut additionner la pression statique et la pression dynamique, ce qui nous donne la pression totale, d'où $H = p + q$.

L'énergie de l'écoulement recouvre quant à elle deux éléments :

- L'énergie potentielle, qui se trouve en relation directe avec la pression statique. En effet, elle est aussi due à la situation extérieure du mobile (hauteur, épaisseur, etc).

⁴ Voir Annexe: Définitions



- L'énergie cinétique, qui a un lien direct avec la pression dynamique car liée à la vitesse du mobile.

Il est à noter que cette équation peut aussi s'écrire $\frac{1}{2}\rho v_1^2 - \frac{1}{2}\rho v_2^2 + (\rho g y_2 - \rho g y_1)$ ou, en négligeant la poussée d'Archimède, $\frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2)$ où le ρ est la masse volumique de l'air et $v_1 ; v_2$ la vitesse du fluide parcourant le tube.

Résumons $H = p + q = p_2 - p_1 = \frac{1}{2}\rho v_1^2 - \frac{1}{2}\rho v_2^2 + (\rho g y_2 - \rho g y_1) = \Delta p = \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2)$

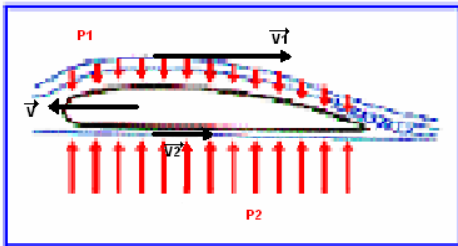


figure 6: Sur cette image nous pouvons voir les différentes parties de la formule.

Si l'on observe cette formule, l'on constate qu'il y a deux vitesses de la masse d'air. Il peut sembler étonnant qu'il y ait une vitesse différente sur le haut et le bas de l'aile, mais nous reviendrons plus en détail sur cet aspect au chapitre III.5 qui traite de la force de portance. Il est à noter également que la force d'Archimède est négligeable car l'air a une faible densité.

Le principe de Bernoulli fait donc le lien entre la pression d'un fluide et sa vitesse, lien qui évolue avec la densité de l'air (altitude). Cette formule est valable à condition que le fluide soit en mouvement et qu'il soit incompressible, non visqueux, avec un écoulement régulier donc laminaire⁵. L'air correspond suffisamment à cette définition pour que la formule s'applique. C'est un modèle non parfait mais proche de la réalité, le fluide idéal n'existant pas.

Cette équation nous permet de comprendre les pressions qui s'exercent autour d'un profil d'aile.

En observant la *figure 6 ci-dessus*, nous pouvons constater que le p_1 représente une dépression due à une augmentation de la vitesse, et le p_2 représente une surpression due à une diminution de la vitesse. Nous pouvons alors en tirer que v_1 est plus grand que v_2 .

La dépression agira pour les 2/3 de la force totale appliqué et la surpression au contraire agira que pour le 1/3 sur la force totale appliqué.

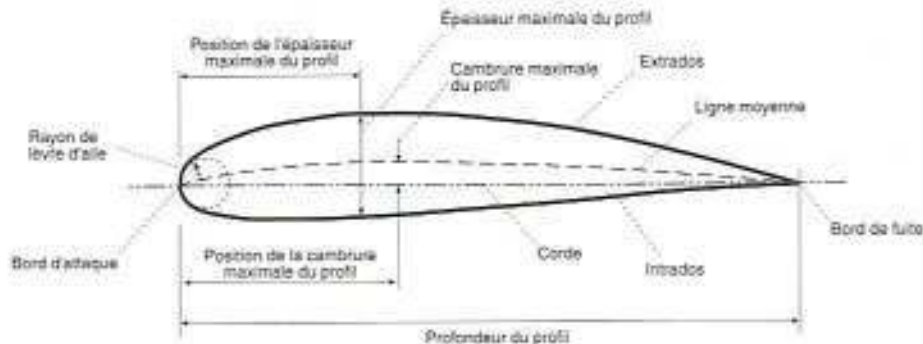
Nous allons expliquer toute cette matière en détail plus loin dans mon travail.

⁵ Voir Annexe: Définitions



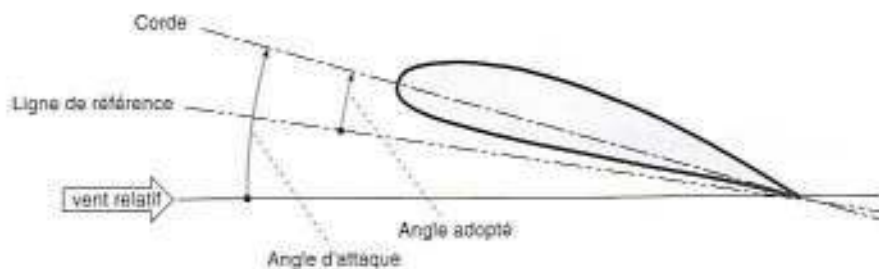
III.3. Les différentes parties du profil d'une aile définie

Expressions définies pour la détermination d'un profil



CORDE DU PROFIL

Sur les profils d'ailes, la ligne joignant le bord avant (bord d'attaque) au bord arrière (bord de fuite) est désignée «corde du profil». C'est sur elle que se fonde la détermination de l'angle d'attaque et de l'angle adopté.



L'angle d'attaque α (angle of attack) d'un profil est l'angle séparant la corde du profil et la direction d'afflux (trajectoire de vol). L'angle adopté β (rigging angle) est l'angle séparant la corde du profil d'une ligne de référence définie par le constructeur (par exemple, l'axe longitudinal du fuselage). C'est l'angle sous lequel l'aile est raccordée au fuselage de l'avion.

figure 7: Voici une image qui représente toutes les parties d'un profil d'aile.

L'aile⁶ ne génère une portance que lorsqu'elle est entourée d'un écoulement. Pour simplifier nous considérerons un écoulement bidimensionnel, c'est-à-dire un écoulement dont les deux dimensions sont la profondeur et l'épaisseur (le volume et la longueur du profil). En supposant une aile de longueur infinie, l'écoulement dans les plans verticaux perpendiculaires à l'axe de l'aile est toujours le même

Grâce à des recherches en aérodynamique appliquées sur un profil⁷ d'aile (voir figure 7 ci-dessus), les scientifiques peuvent définir un profil offrant la meilleure portance tout en apportant le moins de résistance possible. Il n'existe pas de profil idéal, mais plutôt des profils adaptés aux différents besoins et contraintes, comme le poids, le domaine des vitesses utilisées, etc.

⁶ Voir Annexe: Définitions

⁷ Voir Annexe: Définitions



III.4. Les coefficients C_z et C_x

Pour pouvoir comparer et tester les capacités, l'efficacité et la qualité aérodynamique d'un profil d'aile, les scientifiques ont défini 2 vecteurs qui donnent la résultante des forces aérodynamiques.

Ces 2 vecteurs sont nommés coefficients⁸ est ils s'indiquent en pourcentage.

Le premier est le **coefficient de la portance**, qui se note C_z , et qui dépend de l'angle d'attaque et de la forme de l'aile, comme le montre la formule :

$$F_{\text{portance}} = C_z \cdot q \cdot S$$

donc, $C_z = F_{\text{portance}} / q \cdot S$
 $= F_{\text{portance}} / 2 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S$

Plus l'angle d'attaque est grand plus le C_z augmente (voir figure 8 à droite). Ce coefficient augmente jusqu'à une limite maximale, le C_z max. Après avoir dépassé cette valeur nous arrivons à un « stall », à savoir que l'écoulement n'est plus laminaire mais turbulent. Cet état est extrêmement dangereux, comme nous le verrons au chapitre III.7.

Diagramme $C_A - \alpha$
Exemple

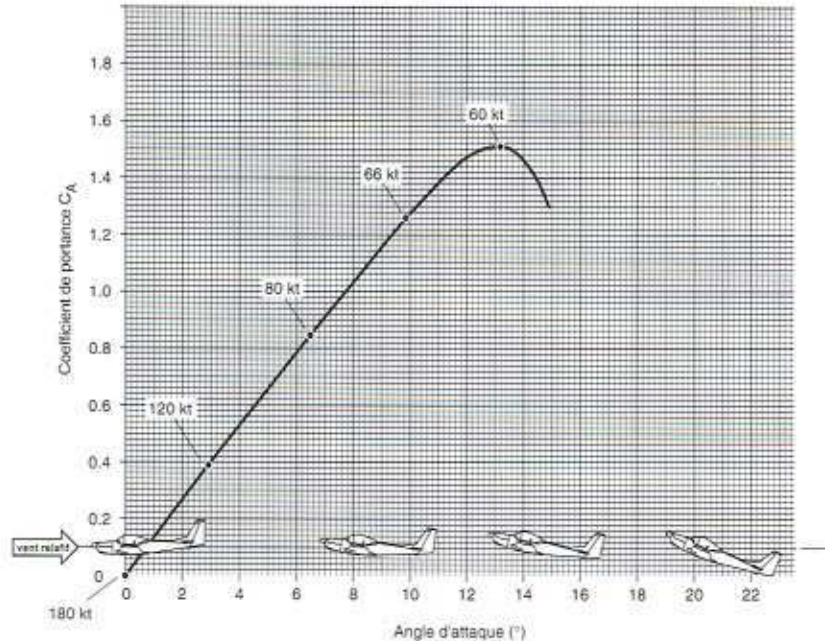
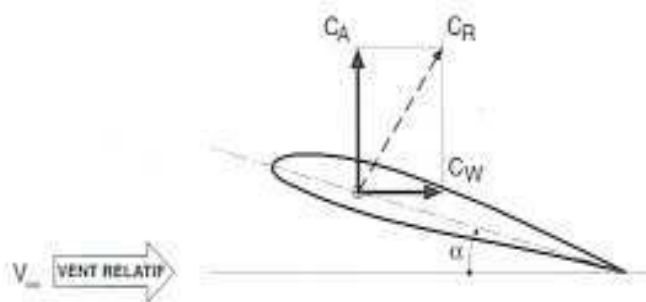


figure 8: Ainsi vous pouvez voir l'augmentation du C_z (sur l'image décrit comme étant le C_A car c'est le terme en Allemand) en fonction de l'angle d'attaque.

Le deuxième vecteur est le **coefficient de la traînée** qui dépend de la répartition de la pression (la traînée due à la forme) et du frottement contre la surface (la traînée de frottement, qui crée une résistance). Ce coefficient se note C_x . Cette relation nous donne la formule suivante:

$$F_{\text{traînée}} = C_x \cdot q \cdot S \text{ donc, } C_x = F_{\text{traînée}} / q \cdot S = F_{\text{traînée}} / 2 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S$$

Dans notre cas, c'est le planeur lui-même qui est objet, l'air étant le fluide environnant.



- C_R : coefficient de la force aérodynamique (résultante)
- C_A : coefficient de portance
- C_W : coefficient de traînée
- α : angle d'attaque
- Indice : pour une distinction par rapport à d'autres vitesses locales
- V_∞ : vitesse d'afflux non perturbée (correspond, pour l'avion, à la vitesse propre vraie / TAS)

figure 9: Voici une image qui met en évidence l'emplacement et l'importance des coefficients (sur l'image à nouveau le C_A représente le coefficient de portance, qui est pour nous le C_z et le C_W qui est pour nous le C_x).

⁸ Voir Annexe: Définitions



III.5. La force de portance

Un planeur vole à cause de l'air qui s'écoule autour du profil de ses ailes. Ces dernières adoptent une forme aérodynamique créant le moins de turbulences possibles. L'air environnant à une certaine vitesse par rapport au corps (ici : le planeur) qui créent des différences de pression pour pouvoir « soulever » ce corps dans l'air.

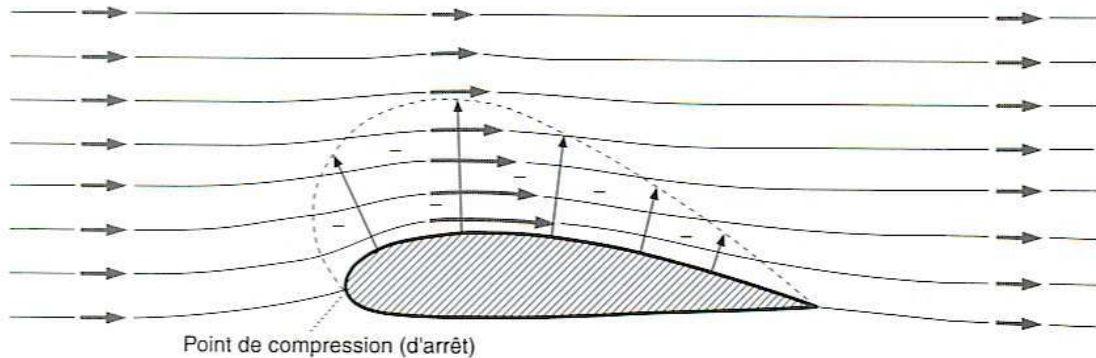


figure 10: Cette image représente l'écoulement du fluide autour d'un profil d'aile. L'écoulement passant au-dessous de l'aile n'est pas représenté car on considère dans ce cas que le fluide est non dévié et non perturbé.

Lorsque l'on place un profil d'aile (asymétrique, le plus souvent) dans la direction et sens du courant d'air, l'écoulement se sépare en deux après avoir touché le point de compression. Une partie de l'écoulement de l'air passe sur la partie au-dessus de l'aile (extrados) et l'autre partie en dessous du profil (intrados). L'écoulement passant au-dessus de l'aile doit s'accélérer car elle a un plus long chemin à accomplir que l'écoulement passant en dessous de l'aile. D'après l'équation de Bernoulli, une augmentation de vitesse (pression dynamique) entraîne une baisse de pression statique. Il apparaît alors sur la face supérieure du profil (extrados) une pression plus basse que la pression environnante de l'air (pression statique), cela engendre alors une force ascensionnelle que l'on appelle la **portance**.

La portance est également influencée par un autre phénomène, à savoir la déviation vers le bas de l'air passant en dessous de l'aile. L'air est en effet accéléré et dévié par la concavité de l'intrados. C'est ce qu'on appelle un écoulement défléchi (down flash).

Mathématiquement, elle s'écrit

$$F_{\text{portance}} = \Delta p \cdot S_{\text{aile}} = \frac{1}{2} \rho S_{\text{aile}} (v_1^2 - v_2^2) + \rho g \Delta y \cdot S_{\text{aile}}$$

puissance d'Archimède qui est négligeable au premier terme

$$F_{\text{portance}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_{\text{aile}} (v_1^2 - v_2^2)$$

Avec V_1 et V_2 vitesses sur l'extrados et l'intrados et qui dépendent de V (vecteur de vitesse = vitesse de l'avion) ainsi que de sa forme et de son angle d'attaque.

On écrit alors $F_{\text{portance}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_{\text{aile}} \cdot C_z \cdot v^2$

Avec V = vitesse de l'avion

C_z = coefficient de portance de l'aile. Il dépend principalement de la forme de l'aile et de l'incidence de vol, mais également du fuselage, du vrillage des ailes, etc. Les profils présentant des courbures importantes ont des bons C_z . Ce coefficient augmente avec l'incidence jusqu'à l'incidence de décrochage. Dépassé cette incidence, sa valeur chute.



S_{aille} = surface de référence de l'aile, également appelée maître-couple, surface du dessus du profil d'aile projetée sur le sol. D'une manière générale, si on augmente la surface de l'aile, on augmente sa portance.

III.6. La force de traînée et la couche limite

C'est la force qui se dirige dans le sens et la direction de l'écoulement et de ses lignes de courant. Cette force de traînée est aussi appelée force de frottements. Elle implique une augmentation de la résistance et diminue alors la portance, ce qui entraîne une perte d'altitude.

On peut distinguer trois catégories de traînée:

- la traînée de forme, qui est liée à la forme du profil. En effet, l'écoulement est différent selon la forme de l'aile, la différence de pression entre l'extrados et l'intrados se modifiant.
- la traînée de sillage, qui est influencée par le décollement de l'écoulement laminaire (filets d'air). Elle dépend de l'angle d'attaque (incidence) et de la vitesse de vol.
- la traînée induite (due à la portance), qui est lié à la différence de pressions entre l'extrados et l'intrados (équation de Bernoulli).

L'air de l'intrados est en surpression et à donc tendance à remonter vers le dessus de l'aile au niveau des coins et des bouts (saumons d'aile). Ce phénomène crée des tourbillons, appelés tourbillons marginaux, qui s'agrandissent lorsque l'on s'éloigne du bord de fuite.

L'air est constitué de gaz différents qui forment une certaine viscosité. Même si elle est faible, cette viscosité joue un rôle dans les vitesses de vol critique. Les particules d'air touchant la surface du profil y adhèrent, leur vitesse d'écoulement devient donc nulle. En s'éloignant de la surface, la vitesse – qui s'accroît perpendiculairement et verticalement à la direction de l'écoulement - remonte très rapidement jusqu'à atteindre la vitesse initiale dans le flux du fluide non perturbé. De plus en plus de particules sont arrêtés en surface par le frottement, créant une zone de forte chute de vitesse nommée «couche limite» par Ludwig Prandtl. L'épaisseur de la couche limite augmente par un effet de stockage, ce qui entraîne une baisse du mouvement et donc une baisse de la vitesse même. La force de frottement augmente ainsi. Lorsque l'épaisseur de cette couche limite devient trop importante, l'écoulement devient turbulent. On peut distinguer vers la fin du profil et après le bord de fuite une zone de

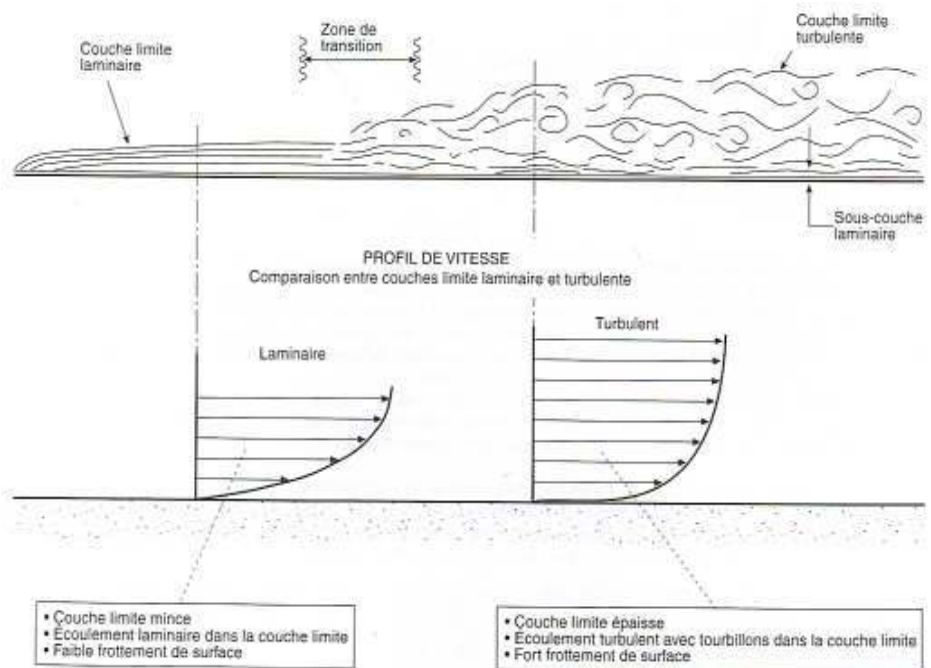


figure 11: Décollement de la couche laminaire et transition de la couche limite



turbulence, que l'on appelle l'«après-flux» (**traînée de sillage**), qui est une zone de perte de mouvement derrière le profil. Le principe de Bernoulli ne s'applique pas dans ce cas de figure car le fluide subit des frottements.

La forme mathématique de la force de traînée se décrit comme suit :

$$\text{Force de frottement} = F_{\text{traînée}} = \frac{1}{2} \rho S C_x v^2$$

Avec V = vitesse de l'avion et C_x = coefficient de traînée de l'aile qui dépend de la rugosité de la surface en contact avec l'air. Il dépend de la forme du profil et de l'incidence de vol. Les profils minces présentent de meilleurs C_x que les profils épais. Ce coefficient augmente continuellement avec l'incidence, et ce même après l'incidence de décrochage. Au-delà de cette incidence, la traînée continue d'augmenter alors que la portance chute.

La traînée est représentée au centre de la poussée, tout comme la portance. C'est cette formule qui permet de définir le coefficient C_x (et analogue pour C_z) : on constate que la traînée est proportionnelle à $\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^2$ et on appelle le facteur de proportionnalité C_x .

La traînée est proportionnelle à la valeur au carré de la vitesse et à la surface exposée au vent. On appelle cette surface S le maître-couple, surface du bord d'attaque projetée contre un mur.

Plus la vitesse de l'écoulement environnant augmente, plus la transition de la couche limite arrive rapidement. Plus l'angle d'attaque est important, plus cette transition sera proche du bord d'attaque. Ce phénomène engendre des difficultés importantes pour le pilote.

L'écoulement autour d'un profil d'aile monte sur le dessus de l'aile, l'extrados, mais également depuis le côté et le bout des ailes, ce qui augmente la résistance. Pour pallier à cette augmentation de la force de traînée, on ajoute parfois des petits bouts d'ailes, nommé les Winglets. C'est la **traînée induite**. (voir sur figure 12 ci-dessous)

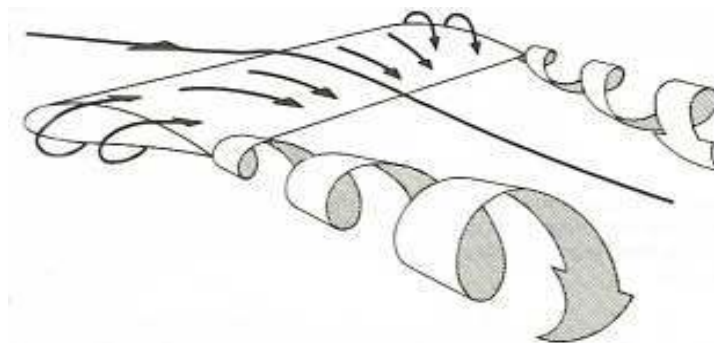


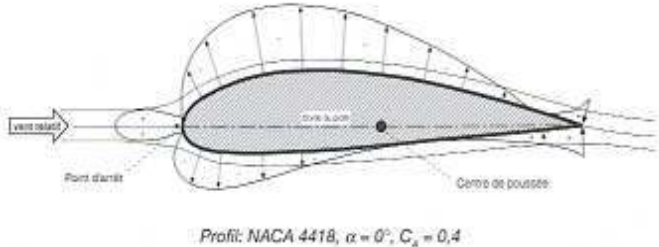
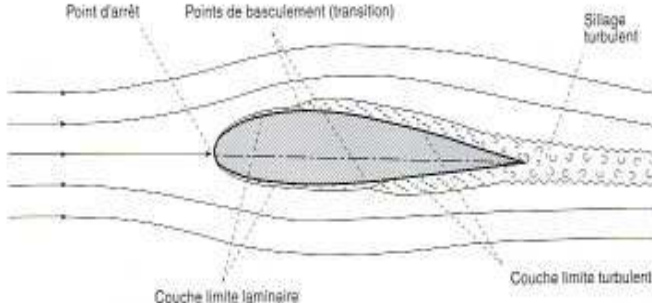
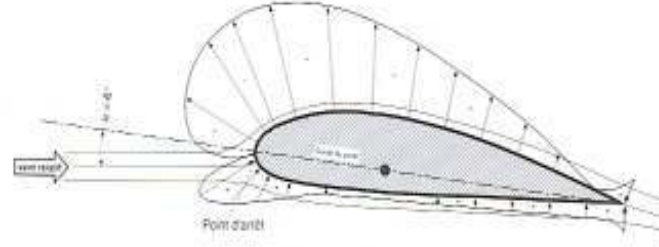
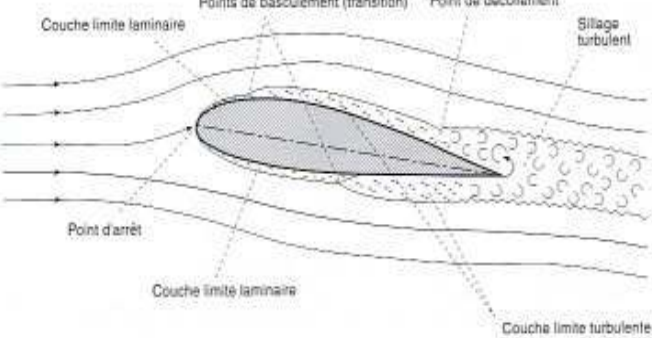
figure 12: Ainsi vous voyez ci-dessus un image qui vous montre le principe des tourbillons marginaux.

III.7. Augmentation de l'angle d'attaque

Chaque planeur a un angle d'attaque maximal (critique) et minimal. Dans le cas simple, le vol horizontal et la direction du vol n'ont rien à voir avec l'angle d'attaque. Pour voler horizontalement, la force verticale doit porter le poids de l'objet et la traînée doit être compensée par une force de propulsion (moteur ou avion remorqueur). Dans tous les cas, l'angle d'attaque doit être assez grand pour créer la portance.

Nous allons alors observer ce qui se passe en augmentant l'angle d'attaque de l'aile en vol.



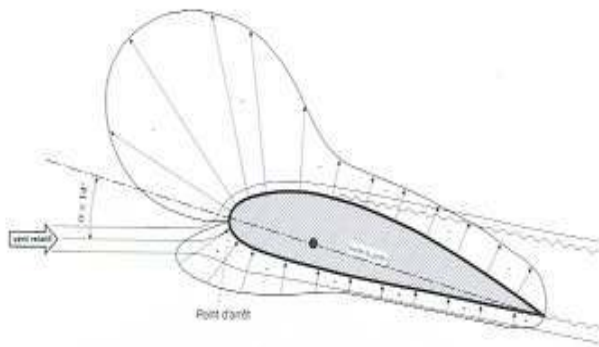
Observations selon l'équation de continuité (Bernoulli, les pressions)	Observations selon les forces de frottements
 <p>Profil: NACA 4418, $\alpha = 0^\circ$, $C_x = 0,4$</p>	
<p>Lorsque l'extrados est plus cambré, l'écoulement doit plus accélérer que sur la face inférieure. Il en résulte une augmentation de la vitesse d'écoulement sur l'extrados et, d'après l'équation de continuité, une baisse de pression statique. Cette pression sur la face de cambrure du profil entraîne l'apparition d'une plus forte dépression que sur la face inférieure. Une force ascensionnelle est créée : la $F_{portance}$.</p> <p>Il ne faut pas oublier qu'il se forme de même une zone réduite de surpression autour du point d'arrêt (ce qui fait que le planeur pique légèrement du nez). De plus derrière le profil (donc près du bord de fuite) l'air est dévié vers le bas (le fameux downwash = descendance). Dans cet état, la force de portance se concentre sur un point précis, appelé «centre de poussée»⁹, qui se trouve à peu près au milieu du profil.</p> <p>On considère que cet état du planeur n'offre pas de frottements.</p>	<p>En parallèle, les forces de frottements sont faibles et le point de transition est plutôt vers l'arrière du profil. Donc la force de traînée n'a pas encore trop d'influence.</p>
 <p>Profil: NACA 4418, $\alpha = 6^\circ$, $C_x = 1,0$</p>	
<p>Lorsque l'on augmente légèrement l'angle d'attaque, le planeur prend une certaine pente (montée). L'air passant sur l'extrados se décroche au moment où l'air ne peut plus suivre la surface du profil.</p> <p>L'écoulement dans la zone avant du profil (bord d'attaque) doit accélérer très fortement. Il y a dans</p>	<p>Lorsqu'on atteint un angle d'attaque critique (alpha critique) il se produit un début de décollement qui forme alors des tourbillons (l'après-flux). La zone de transition s'est déplacée vers l'avant en même temps que le centre de poussée.</p>

⁹ Voir Annexe: Définitions

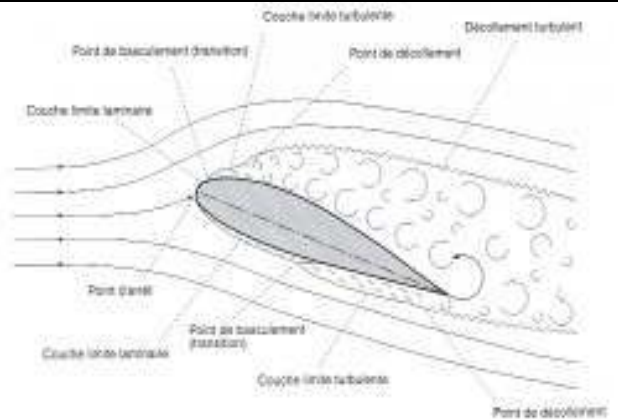


ce cas une forte dépression dans cette zone avant, ce qui entraîne que l'écoulement à l'avant du profil est aspiré par en bas (upwash = ascendance). Cette ascendance s'accroît proportionnellement à l'angle d'attaque. L'écoulement passant sur l'intrados doit ainsi parcourir un chemin plus court que l'écoulement non perturbé, et doit donc diminuer sa vitesse pour être retardé. Cette baisse de vitesse (et, partant, de la pression dynamique) engendre une augmentation de la pression statique, c'est-à-dire une surpression sous l'intrados.

L'écoulement derrière le profil est toujours plus fortement dévié vers le bas (downwash = descendance) lorsque l'on accroît l'angle d'attaque. Finalement, plus on augmente l'angle d'attaque, plus le centre de poussée et le champ de portance se décalent vers l'avant.



Profil: NACA 4418, $\alpha = 14^\circ$, $C_x = 1,5$



Lorsqu'on augmente encore l'angle d'attaque et que l'on dépasse le C_z max, l'air ne parvient plus à suivre la surface de l'aile et se décolle du profil. Cet état est nommé «stall».

L'angle d'attaque critique dépassé, l'écoulement ne suit plus l'extrados, et s'arrache (stall). Ensuite, la zone de dépression est affaiblie dans la partie arrière du profil, à cause des formations de tourbillons. Vers l'avant du profil (bord d'attaque) la vitesse augmente, ce qui génère une forte dépression dans cette zone. En conséquence, l'écoulement dans cette zone avant est fortement aspiré depuis le bas. Chaque accroissement de l'angle d'attaque engendre un ralentissement de la vitesse d'écoulement sur la partie de l'intrados. Et ceci donne une augmentation de la surpression.

Parallèlement, le centre de poussée est déplacé vers l'avant, les tourbillons augmentent, donc les frottements aussi ce qui engendre une grande résistance. La portance sur la partie arrière du profil a fortement diminué.



III.8. Différents profils d'ailes et parties du planeur

Il ne faut pas perdre de vue que les différentes parties du planeur peuvent générer l'obtention d'une portance, que cela soit la forme de fuselage du planeur ou son empennage horizontal (profondeur). Pour un planeur normal, l'empennage horizontal entraîne plutôt une force dirigée vers le bas, pour des raisons de stabilité, et est donc à déduire de la portance de l'aile. Le fuselage quant à lui engendre surtout une traînée, c'est pourquoi il a une forme adaptée à l'écoulement autour de l'aile (queue dirigée vers le bas). De plus, selon les caractéristiques des types de vol, la forme et le vrillage des ailes, l'envergure, les volets, la vitesse de vol, l'altitude de vol et l'angle d'attaque jouent un rôle dans la performance de la force de portance.

Après beaucoup d'expériences faites dans le domaine aérodynamique, les scientifiques ont pu constater que le profil de l'aile actuelle est la meilleure forme possible pour une poussée efficace. Cette forme a été redessinée par rapport à une aile d'oiseau, montrant par là même que nos ancêtres étaient sur la bonne voie.

Selon l'utilisation que l'on veut faire du planeur, différents types d'ailes sont possibles. Il faut alors trouver le profil d'aile le plus efficace, c'est-à-dire le profil offrant le moins de force de frottements pour une utilisation donnée.

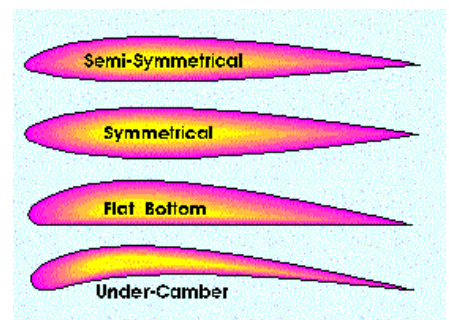


figure 13: Voici une représentation de différentes formes de profil d'aile, avantageux ou désavantageux selon leur utilité.

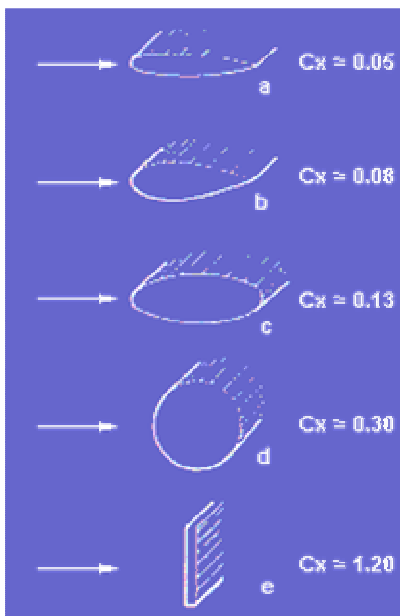


figure 14: Voici ci-dessus quelques formes différentes avec leurs coefficients de traînée indiqués.

Il existe en effet différentes formes d'aile qui sont propres à chaque discipline. Par exemple les anciens planeurs, comme le Grunau Baby de 1944, ont une forme d'aile qui ressemble plutôt au quatrième profil de la figure 16 ci-dessus. Cette forme d'aile était conçue pour les planeurs très lents. La vitesse d'atterrissage (vitesse d'approche) du Grunau Baby est en effet de 65 à 70 km/h. Par contre les planeurs plus moderne, comme le Pilatus B-4 ou les planeurs en plastique Orion DG-505, qui ont des profils d'ailes asymétriques plus faible que celle du Baby, volent à des vitesses supérieures. Une asymétrie relativement faible suffit à créer assez de portance, car leurs propriétés de vol sont beaucoup plus performantes. Avec le B-4 nous atterrissons (vitesse d'approche) à 85 km/h et avec l'Orion à 100 km/h. Les profils symétriques sont quant à eux spécialement conçus pour l'acrobatie (vol sur le dos).

La complexité des différentes interactions des parties du planeur rend les essais indispensables à la bonne marche de l'aviation. C'est pourquoi les modèles sont tout d'abord testés sous forme de prototypes, dans une soufflerie.



III.9. Test aérodynamique: la soufflerie (wind tunnel)

La soufflerie¹⁰ permet effectivement de tester la capacité et les spécificités des différents types d'avions. Le principe d'une soufflerie consiste à placer une maquette d'avion dans un tunnel où l'on envoie un flux d'air à une certaine vitesse. Les forces aérodynamiques et le flux d'air se comportent en effet de la même manière en agissant sur un corps en mouvement avec une vitesse V déterminée dans un flux d'air au repos que sur un corps au repos placé dans un afflux d'air en mouvement à une vitesse V déterminée elle aussi.



figure 15: Voici un profil d'aile dans la 3^{ème} plus grande soufflerie de Suisse à l'ETHZ. Nous avons collé des bouts de fil de laine jaune en diagonale du profil d'aile pour observer l'écoulement de l'air en changeant l'angle d'attaque et la vitesse du flux d'air produit par la turbine (qui va jusqu'à 220 km/h).

Le modèle (prototype), qui conserve les mêmes proportions que l'original, est donc soumis à un souffle. De cette expérience sera tiré des résultats permettant d'améliorer le modèle (écoulements, force de traînée). Cette façon de faire est avantageuse, car au gain de temps et d'argent vient s'ajouter la sécurité, les essais n'étant pas effectués avec les pilotes comme jadis.

La soufflerie se base sur l'étude des coefficients vus précédemment.

Pour garder les effets aérodynamiques réels, les scientifiques introduisent le nombre de Reynolds¹¹. Ce nombre caractérise un écoulement. Il représente le rapport entre forces d'inertie et forces visqueuses. Il est le plus important nombre sans dimension en dynamique des fluides. Il est proportionnel à la vitesse et à la longueur de la profondeur du profil, mais aussi à la

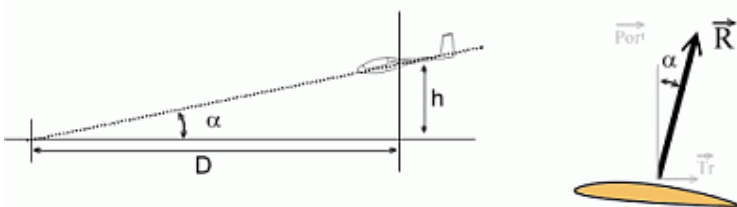


Image d'écoulement avec décollement. Bruno Eck. -Technische Strömungslehre-

figure 16: Voici l'écoulement autour d'un profil d'aile simulé après sur ordinateur.

densité de l'air. Si nous rapetissons un profil d'aile pour le tester en soufflerie à une échelle de $1:n$, alors la vitesse d'écoulement devra être augmentée d'un facteur de n , pour avoir avec ce profil d'aile rapetissé le même nombre de Reynolds. Même nombre de Reynolds veut dire même comportement aérodynamique.

III.10. La finesse d'un planeur



$$f = \frac{D}{h} = \frac{\text{portance}}{\text{traînée}} = \frac{1/2 \rho S V^2 C_z}{1/2 \rho S V^2 C_x} = \frac{C_z}{C_x}$$

figure 17: Ci-dessus nous pouvons voir la représentation et les composantes de la finesse

On définit la finesse d'un planeur comme étant sa capacité de planer par rapport à la hauteur perdue. Plus le chiffre de finesse d'un planeur est important, plus il plane loin et longtemps.

La finesse se définit tant par rapport à l'air que par rapport au sol, et prend en compte le mouvement et la vitesse du vent. En d'autres termes, la finesse est le nombre de fois qu'un planeur

¹⁰ Voir Annexe: Le fonctionnement d'une soufflerie

¹¹ Voir Annexe: Définitions et exemples pratiques



peut parcourir sa hauteur (altitude) par rapport au sol. La finesse est, par définition, le rapport entre la vitesse horizontale et la vitesse verticale (taux de chute). Elle est aussi égale au rapport du coefficient de portance sur le coefficient de traînée (sur l'image le coefficient de portance est caractérisé par C_z et le coefficient de traînée par C_x). Le rapport entre C_z et le C_x est très intéressant car le terme $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2$ se simplifie sur la fraction (voir figure 17 sur la page précédente).

Par exemple, le DG-505 Orion (type de planeur) a une finesse de 40. Cela veut dire qu'il parcourt une distance horizontale de 40 km en perdant 1000 m (1 km) d'altitude.

A ce sujet, deux vitesses sont particulièrement intéressantes :

- La vitesse de la finesse maximale, qui est la vitesse permettant d'arriver le plus rapidement à destination. Pour ce faire, le pilote supprime toute marge de sécurité (théorie Mac Cready). Cette méthode est utilisée lors des compétitions sportives de vol de distance.
- La vitesse du taux de chute minimal, qui est utilisée pour rester le plus longtemps en l'air en perdant le moins d'altitude possible.

III.11. Méthode de gains d'altitude utilisée par le pilote (pratique)

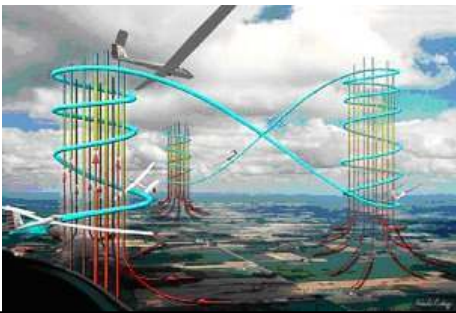


figure 18: Voici la technique utilisée par les pilotes pour gagner de l'altitude. Monter dans les colonnes de thermique en tournant des virages puis voler vers le prochain nuage.

Comme nous venons de le voir, un planeur perd de l'altitude pour chaque mètre horizontal qu'il effectue (finesse). Le seul moyen que le pilote ait de gagner de l'altitude est d'utiliser les courants ascendants (thermique). Pour trouver ces courants d'air chaud, le pilote repère les cumulus. Ces derniers sont en effet créés par des bulles d'air chaud qui, poussées par le vent, butent contre un obstacles, montent en altitude et se condensent sous forme de nuages. Les cumulus, reconnaissables à leur forme de chou-fleur, sont de véritables bornes de signalisation pour les pilotes.

Une autre technique permettant de gagner de l'altitude est les vols de pentes. Ces courants

ascendants dynamiques sont provoqués par le vent frappant les parois d'une montagne, le pied d'une colline, un relief, etc. C'est à cet endroit que le pilote essaie de voler pour gagner de l'altitude. Lorsque le vent atteint le flanc (sommet, crête) du relief, le vent est jeté et dévié encore plus vers le haut ce qui donne la possibilité aux pilotes de longer la crête, de gagner de l'altitude et donc de parcourir de très longues distances. Une partie du flux d'air redescend pour longer le pied de la colline, pouvant entraîner une forte descente. Il ne faut donc pas aller trop loin.

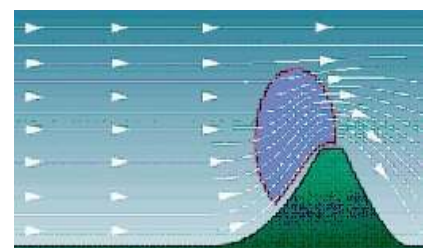


figure 19: Voici une autre technique de gain d'altitude. Nous voyons sur le dessin le flux d'air et sa trajectoire. La zone mise en évidence est l'endroit préférable de voler pour gagner le plus d'altitude.

Une troisième option est le principe de l'onde. Les rotors, à savoir des cycles de vents très puissants et tourmentés, font monter le planeur rapidement de manière assez chaotique. Une fois une certaine altitude atteinte, tout devient calme. Le pilote plane alors au-dessus des nuages, sans cesser de monter. Ces courants permettent d'atteindre des altitudes très élevées, de l'ordre de 6000 mètres.



Pour parcourir de longues distances, un planeur doit voler de thermique en thermique, afin de récupérer l'altitude perdue en avançant. Toutes les thermiques ne sont pas équivalentes, ce qui fait que le gain d'altitude est plus ou moins précieux en fonction de ces dernières.

III.12. Écoulement symétrique ou dissymétrique

Un écoulement symétrique (nous parlons ici de symétrie par rapport au plan défini par l'axe longitudinal et l'axe vertical du planeur) est plus adapté au vol que l'écoulement dissymétrique, car le premier réduit les frottements et les tourbillons ($F_{\text{traînée}}$), comme on peut le remarquer sur ce dessin. Pour matérialiser le flux d'air, on utilise un fil de laine qui permet d'en contrôler l'écoulement depuis le cockpit. Il faut que ce fil soit parallèle à la trajectoire, mais également à l'axe longitudinal pour garantir que ce dernier soit bien parallèle à la trajectoire (voir figure 20). L'écoulement symétrique diminue, pour plusieurs raisons, le risque d'accident.

Un écoulement dissymétrique fonctionne selon le même principe que celui utilisé dans une glissade¹². Il en va de même pour les aérofreins, comme nous allons le voir ci-dessous.

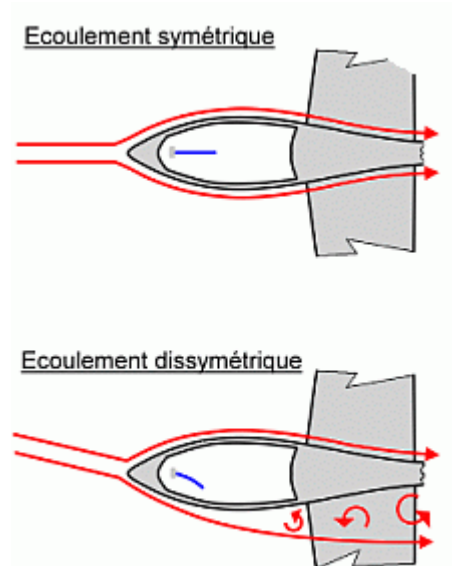


figure 20: Voici deux dessins qui représentent, le premier en haut, un écoulement symétrique et le deuxième en bas un écoulement dissymétrique. La flèche rouge est le flux d'air venant en face du cockpit, et le fil bleu collé sur la verrière montre la trajectoire de l'air autour du planeur.

III.13. Les aérofreins (déporteurs)

Ce sont des freins aérodynamiques qui servent, lorsqu'ils sont sortis, à augmenter la traînée et donc à perturber le profil d'écoulement de l'air. Ils modifient en fait la forme du profil de l'aile et dérangent de ce fait l'écoulement laminaire en provoquant un écoulement turbulent. Les aérofreins sont également nommés spoilers, mot provenant de l'anglais «to spoil» et qui signifie «perturber».

Dans le vol à voile, ils sont utilisés comme volets de freins. Disposés sur les deux ailes, au milieu du profil longitudinal et juste à côté des ailerons (volets), les aérofreins peuvent sortir au-dessus de l'aile et/ou au-dessous.

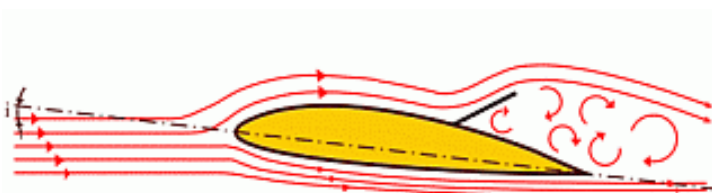
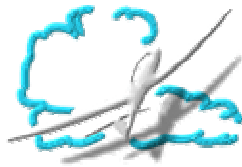


figure 21: Voici l'emplacement et l'effet sur l'écoulement de l'air autour du profil d'aile.

¹² Voir Annexe: Glissade



Les aérofreins servent donc :

- à réduire la finesse en approche d'atterrissage
- à éviter une augmentation de vitesse en vol piqué
- à réduire la longueur du vol plané final lors de l'atterrissage
- A diminuer l'effet de sol (turbulence venant du réchauffement du sol et entraîne une extrême et rapide chute de vitesse de vol)

En modifiant la vitesse minimale de décrochage, les aérofreins modifient également l'angle d'attaque critique, qui diminue. Le comportement de décrochage du planeur change donc aussi. Il est interdit de sortir les aérofreins en vol lent, pour éviter tout risque de tomber dans une vrille. Lorsque l'on vole dans les Alpes ou à basse altitude, les effets de sol et les courants peuvent encore empirer la situation en approche d'atterrissage.

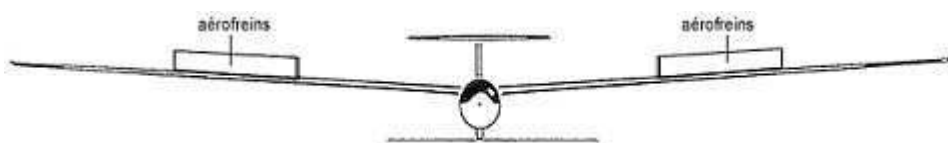


figure 22: Vue du planeur de face et l'emplacement des aérofreins

III.14. L'inventaire des forces dans différents états de vol (pratique) :

III.14.a. Loi de Newton

Pour pouvoir appliquer les trois forces principales (les deux forces aérodynamiques, la F_{portance} et la $F_{\text{traînée}}$, et la force conservative, le Poids) dans différents états de vols, il faut connaître quelques relations de base de la mécanique de Newton.

La mécanique est le domaine d'étude des transmissions des forces et des énergies. C'est le lien entre le mouvement d'un corps, dans notre cas un avion, et les forces appliquées sur ce corps. Ce lien est décrit par les trois lois principales d'Isaac Newton (1643-1727), à savoir :

1. Loi newtonienne de l'inertie¹³:

Tout corps demeure au repos ou conserve un mouvement rectiligne uniforme tant qu'aucune force extérieure n'agit sur lui, ou tant que les forces extérieures sont en équilibre, c'est-à-dire se compensent mutuellement.

2. Loi fondamentale de la dynamique¹⁴:

Si une force extérieure agit sur un corps, son état de mouvement change. On appelle accélération la variation de vitesse survenant alors, par unité de temps. L'accélération intervient dans la même direction que celle vers laquelle agit la force extérieure. Elle est proportionnelle à l'intensité de cette force.

$F = m \cdot a$ (la force ayant la même direction que l'accélération = la résultante)

¹³ GUGGIARI Bruno et WEICHELTL Peter, *Principes du vol*, Ch.2-1-2 p.1

¹⁴ GUGGIARI Bruno et WEICHELTL Peter, *Principes du vol*, Ch.2-1-2 p.1



3. Loi de l'action et de la réaction ¹⁵:

Pour toute force agissant sur un corps, il existe une force d'intensité égale qui lui est opposée, agissant sur un quelconque autre corps.

En aérodynamique et en mécanique du vol, ces deux corps sont d'une part l'avion et d'autre part l'air environnant. Pour toute force de l'air agissant sur l'avion apparaît une force connexe d'intensité égale sur l'air environnant qui lui est opposée.

III.14.b. Les forces aérodynamiques appliquées sur différents états de vol

Les trois forces principales, le poids, la force de portance et la force de traînée sont les trois seules forces qui s'appliquent sur un planeur. Le poids et sa composante (dit vecteur v sur les figures ci-dessous) s'appliquent sur le centre de gravité du planeur, situé à peu près au milieu, mais dépend de l'emplacement de la charge. Par contre la force de portance et la force de traînée s'appliquent sur le centre de poussée, à peu près au centre de la corde du profil d'aile.

Nous allons maintenant observer les différentes forces - représentées par des vecteurs - s'appliquant sur un planeur dans des états de vol différents.

Tout d'abord nous voyons dans la *figure 23* le planeur en position horizontale, dans un vol stationnaire. Cet état de vol est purement imaginaire dans le domaine du vol à voile car nous ne disposons d'aucun moteur nous permettant de tenir sur la même hauteur horizontale.

Il faut supposer que le planeur soit tiré par un avion pour avoir un état de vol stationnaire ce qui est tout à fait réaliste (pendant la phase de remorquage). Les différentes forces s'annulent alors. Le poids est le même que la portance, tandis que la force de traînée est compensée par la force exercée vers l'avant, à savoir celle qui tire le planeur avec une vitesse constante (la force de tension dans la corde qui relie l'avion avec le planeur = c'est la force de traction du remorqueur).

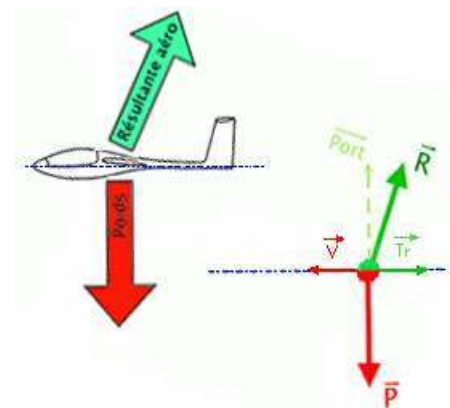


Figure 23: Planeur en vol horizontal et les forces qui s'y appliquent

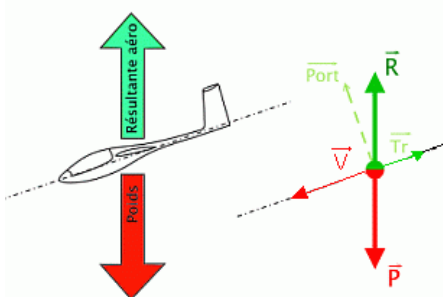


Figure 24: Le planeur en direction de vol pointant légèrement vers le haut.

Le poids est une force toujours présente. Dans un état de vol stationnaire cette force doit être compensée. La seule force de compensation disponible est la force aérodynamique R , la somme vectorielle de la portance et de la traînée. Pour que cette force soit opposée au poids, il faut une ligne de vol pointant légèrement vers le bas (angle d'attaque α négatif), comme on le voit sur la *figure 24*.

C'est le même principe pour un état de vol avec un angle d'attaque α positif. La vitesse diminue mais la $F_{\text{traînée}}$ augmente. La résultante des forces aérodynamique compense le poids, seulement si la lignes de vol pointe légèrement vers le haut.

¹⁵ GUGGIARI Bruno et WEICHELTER Peter, *Principes du vol*, Ch.2-1-2 p.1



Mais que se passe-t-il lors de la **ressource au sortir du vol piqué** ?

Lorsque nous piquons du nez dans un fort angle de descente (angle entre l'horizontale et la ligne de vol), la vitesse augmente et une accélération apparaît. La $F_{\text{traînée}}$ augmente proportionnellement à la vitesse, ce qui va entraîner une diminution de l'accélération. Nous accélérons jusqu'à ce que la **composante du poids**, qui est parallèle à la **vitesse** et à la $F_{\text{traînée}}$, soit égale à la $F_{\text{traînée}}$, donc dans ce cas l'accélération sera nulle.

En piquant, l'énergie cinétique augmente aux dépens de l'énergie potentielle (altitude) ; en remontant, le surplus d'énergie cinétique est de nouveau transformé en énergie potentielle. En utilisant la notion d'énergie, on peut expliquer la perte permanente d'altitude comme suit: la traînée du planeur équivaut à une perte permanente d'énergie. Si l'on veut garder la vitesse constante, c'est l'énergie potentielle qui doit être sacrifiée.

Mais une nouvelle force intervient, c'est la $F_{\text{centripète}}$. Elle est dirigée vers le centre.

La $F_{\text{centripète}}$ est encore présente mais dépend dans cet état de vol du rayon de la ressource et de la vitesse du vol. C'est qu'avec une certaine vitesse qu'on peut faire une ressource et l'angle d'attaque qu'on tire au moment de la ressource dépend considérablement du rayon et de la vitesse. La $F_{\text{traînée}}$ augmente et le **rapport C_x/C_z** aussi, la vitesse diminue et la **composante du poids** est transformée en $F_{\text{cinétique}}$. Le poids reste toujours de la même grandeur. (voir figure 25 ci-dessous)

La $F_{\text{centripète}}$ nous donne le sentiment des g sur notre corps (produit de l'accélération terrestre $9,81 \text{ m/s}^2$ fois la masse du planeur 421 kg).

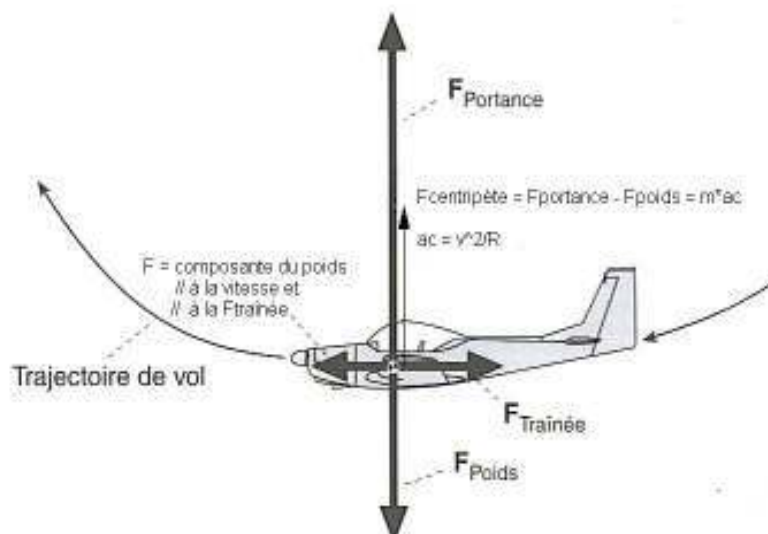


figure 25: Ci-dessus nous pouvons voir un avion (même principe avec un planeur) les forces qui s'applique dessus lors d'une ressource au sortir d'un piqué.

Cas dangereux:

Par exemple, on ne peut pas piquer à 150 km/h et tirer d'un coup sec à fond sur le manche. Le planeur se placerait directement à la verticale et sa structure ne le supporterait pas.

Pour autant, des figures acrobatiques sont toujours possibles. J'ai pu en expérimenter une, la parabole qui consiste à flotter pendant quelques secondes en apesanteur, à 0g.



Les calculs et techniques de ressources sont indispensables dans l'acrobatie, car sans de solides connaissances physiques, les différentes figures (looping, tonneau, etc.) s'avèreraient bien trop dangereuses.

Maintenant nous allons observer les forces qui s'appliquent sur un planeur dans **un virage**.

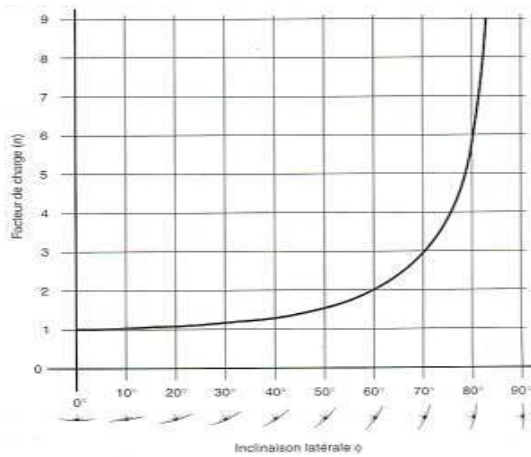


figure 26: Voici le graphe qui montre le load factor rapport de $F_{portance}/F_{poids}$.

La portance est perpendiculaire à l'axe de tangage. Si on la décompose en une composante verticale et horizontale, on a la partie compensant le poids et la partie représentant la force centripète. Plus l'inclinaison latérale est grande plus la force centripète doit augmenter. Plus le facteur de charge¹⁶ augmente (load factor = rapport de $F_{portance}/F_{poids}$), et plus la vitesse minimale ($V_{stall} = V_{décrochage}$) doit être augmentée. En conséquence, plus le virage est serré plus la vitesse doit s'élever. La $F_{portance}$ se projette sur la $F_{centripète}$, qui s'oppose à la F_{poids} .

La $F_{traînée}$ est compensée par la composante du poids (la force vers l'avant, décrit par la vitesse, c'est une force parallèle à la vitesse et la $F_{traînée}$) du planeur.

Le planeur tournant en virage perd de toute façon de l'altitude. Le pilote peut changer l'angle d'attaque et l'importance de la perte d'altitude en augmentant ou en diminuant la vitesse de vol.

Comme nous l'avons vu à de nombreuses reprises, l'angle d'attaque est important. Le problème est que l'on ne le connaît jamais vraiment! Dans la pratique, nous nous occupons de la vitesse du planeur et du fil en laine collé sur la verrière.

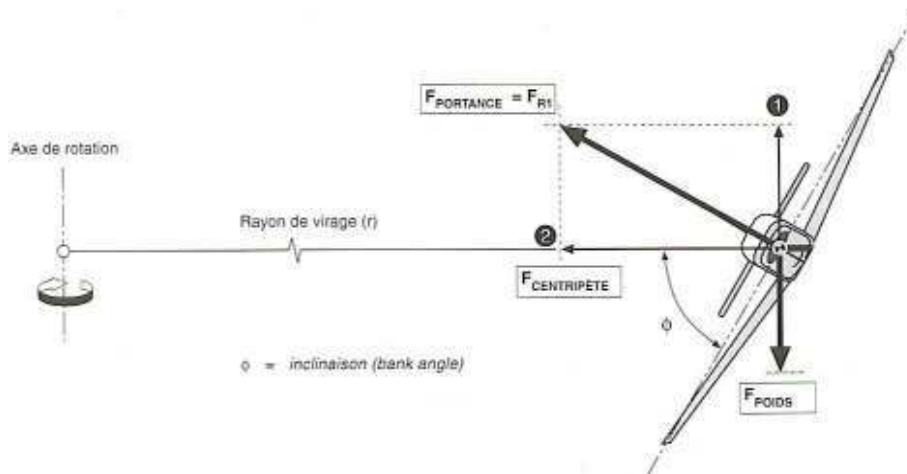


figure 27: Planeur en virage avec l'influence des forces.

¹⁶ Voir Annexe : Définitions



IV. La navette spatiale et son aérodynamique

L'histoire de la navette spatiale est bien entendu plus courte que celle du vol à voile. Il faudra attendre 1972 pour que le président Richard Nixon lance les premières constructions de navettes et 1981 pour qu'ait lieu le premier envol. Cette première navette était Columbia. Challenger la suivit en 1983, puis Discovery en 1984, Atlantis en 1985 et la dernière, Endeavour, en 1992.

La navette spatiale ne s'appelle ainsi qu'à son retour dans l'atmosphère lors de l'atterrissage. Elle est dite « Orbiter » lorsqu'elle est lancée en orbite dans l'espace. Elle est prévue pour 7 personnes restant 10 jours ou plus en orbite. La navette spatiale est le plus énorme planeur qui existe au monde, à la différence qu'il peut être utilisé tant sur la terre que dans l'espace. C'est la première fusée qui a été développée pour pouvoir être récupérée et réutilisée dans l'histoire de l'aéronautique, ceci afin de diminuer les coûts importants de telles missions.

Durant les 42 ans de cette brève histoire, il y a eu 2 accidents, celui de Challenger le 28 janvier 1986 et celui, plus récent, de Columbia le 1^{er} février 2003. Ceci nous rappelle cruellement que le voyage aérospatial, s'il est devenu possible, n'en reste pas moins dangereux, et que la plus haute technologie n'est pas à l'abri de défaillances dramatiques.

IV.1. Comparaison des dimensions entre la navette spatiale et un planeur¹⁷



figure 28: Voici la navette spatiale dans la phase d'approche d'atterrissage avec les roues déjà rétractés.



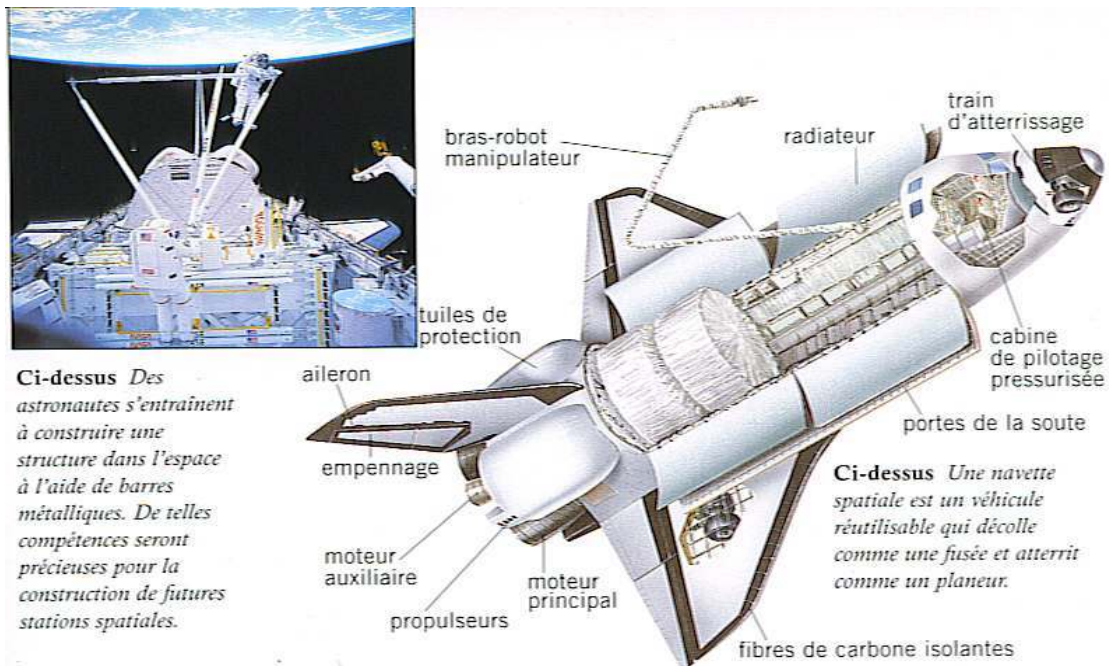
figure 29: Un planeur biplace pendant un vol, du type DG-505 Orion.

Navette spatiale	Planeur biplace type DG-505 Orion
Longueur	Longueur
37,24 m	8,66 m
Hauteur	Hauteur
17,25 m	1,665 m
Envergure des ailes	Envergure
23,79 m	Variable entre 17,20 et 20 m

¹⁷ Les objets en gras ont une influence sur l'aérodynamique



Masse 75 tonnes à vide Charge maximum 30 tonnes	Masse 424,4 kg vide Charge maximum dans les deux sièges 210 kg
Nombre de membre d'équipage 7 personnes	Nombre de pilotes 2 personnes au maximum
Masse maximum à l'atterrissage 96'163 kg	Masse à l'atterrissage 424,4 kg + 210 kg = 634,4 kg Même que dite au-dessus, sauf que le ballaste d'eau doit être lâché avant l'atterrissage
Longueur de la soute cargo 18,28 m	Il n'existe pas de soute dans un planeur pour mettre de la charge, on prend tout dans le cockpit, avec place limitée.
Diamètre de la soute cargo 4,57m	Même explication qu'au-dessus
Vitesse en Orbite 27'875km/h (17'321 mph)	Vitesse en vol normal 90 à 100 km/h
Vitesse d'atterrissage 343 à 364km/h	Vitesse d'atterrissage 100 km/h
Longueur piste d'atterrissage 4,6 km	Longueur piste d'atterrissage 433 m
Longueur de la marge à chaque fin de la piste d'atterrissage 300 m	Des marges de sécurité au bout des pistes 5 m
Largeur de la piste d'atterrissage 90 m	Largeur de la piste d'atterrissage 30 m



Ci-dessus Des astronautes s'entraînent à construire une structure dans l'espace à l'aide de barres métalliques. De telles compétences seront précieuses pour la construction de futures stations spatiales.

Ci-dessus Une navette spatiale est un véhicule réutilisable qui décolle comme une fusée et atterrit comme un planeur.

figure 30: Voici à gauche des travaux de réparations extravéhiculaires et à droite quelques parties d'une navette spatiale.

Conclusion de la comparaison des dimensions entre la navette spatiale et le planeur :

On peut se demander comment un avion d'une telle taille et d'un tel poids peut encore se comporter comme un planeur, à savoir qu'il n'utilise pas de moteur pour se mouvoir dans l'air.

Il est à noter que la navette se comporte en « planeur » uniquement lors de sa rentrée dans l'atmosphère. On ne s'occupera donc que de la phase d'atterrissage où la navette utilise uniquement l'aérodynamique sans l'aide de son moteur.

Il peut paraître étonnant au prime abord de ne pas utiliser un système motorisé pour l'atterrissage. Il s'agit en fait d'une obligation, et ceci pour des raisons de sécurité. En effet, les températures élevées dues au frottement de l'air interdisent toute réserve de gaz dans la navette sinon elle exploserait. L'atterrissage de type « planeur » est donc inévitable.

IV.2. Le fonctionnement de l'aérodynamique pour la navette spatiale

IV.2.a. Phase de rentrée dans l'atmosphère

Avant la rentrée dans l'atmosphère, l'équipage s'installe dans les sièges et les pilotes font leurs checks. Ils allument légèrement les moteurs pour ralentir l'orbiter afin de pouvoir changer d'orbite. En ralentissant la navette, ils lui font changer son angle d'attaque pour qu'elle puisse rentrer dans l'atmosphère avec un angle adéquat (40 Neon, angle spécifique au voyage aérospatiaux). Cette opération est supervisée par un système de guidage appelé OMS (Orbital Maneuvering System). L'angle est mesuré par rapport à la trajectoire de l'orbite dans une couche d'atmosphère qu'on appelle en terme scientifique EI (Entry Interface) à environ 400 000 ft, c'est à dire 120 km. L'EI (Entry Interphase), phase de remplacement dans la bonne position de la navette dans une couche extérieur d'atmosphère, se passe à une altitude de 400 000 ft, à 4'300 nautical miles (n.mi.) de la piste. La manœuvre de changement d'orbite prend 1 h (+ ou -) 1 min.



Dans cette couche d'atmosphère extérieure, l'enveloppe extérieure de la navette doit pouvoir supporter des températures pouvant aller jusqu'à 1'650°C. A ce moment l'aérodynamique joue un rôle majeur car la navette devient un « planeur », puisqu'elle n'a plus la possibilité d'utiliser ses moteurs. Elle est à ce moment-là piloté manuellement par le chef pilote capitaine et vole à une vitesse de Mach 18.

Les informations utiles pour les prochaines phases de vol proviennent des calculs d'algorithmes effectués par les ordinateurs. Ces calculs sont faits entre l'EI et l'arrêt de roue. Ils sont classés dans des sous-ensembles et représentent les différentes procédures à suivre pour arriver en sécurité sur la terre ferme, à savoir:

- le guide de rentrée, ou Check-list (notamment l'usage des aérofreins et le changement de direction de vol en un angle parfait dirigé vers la piste)
- le management de l'aréa,, région aérienne dans laquelle la navette se trouve à ce moment-là, d'énergie et communication dans le terminal, zone de vol dans laquelle s'effectue l'approche (la gestion des couloirs aériens de l'énergie de la navette) (Terminal Area Energy Management (TAEM))
- la gestion de la phase d'approche et finalement, l'atterrissage (Approach and Landing (A/L)).

L'angle d'entrée dans l'atmosphère doit être parfaitement constant. La trajectoire est peu à peu dirigée vers la latitude de l'aérodrome d'atterrissage. La latitude géographique de la trajectoire est alors constamment corrigée selon l'altitude et la vitesse de vol. Le nez de la navette doit être légèrement levé pour protéger la plus grande surface possible de la chaleur provoquée par les frottements. Dans la dernière phase de vol, les pilotes n'osent pas dépasser une certaine limite d'inclinaison (Bank) dans un virage, à cause de la haute vitesse de la navette et des importantes sollicitations qu'elle subit.

IV.2.b. Phase d'approche et d'atterrissage

La finesse d'une navette varie entre 1 en hypersonique et 4 en subsonique. Ce sont des chiffres qui s'approchent de la finesse d'un fer à repasser.



figure 31: Cette image nous donne une bonne représentation de l'angle d'attaque que la navette adopte en phase d'approche pour l'atterrissage.

C'est d'abord sous forme de spirale (virages) que la navette perd de l'altitude et de la vitesse, puis elle continue sous forme de «S» pour se diriger vers la piste d'atterrissage.

Les astronautes adoptent cette méthode car si la navette devrait faire décroître sa vitesse et son altitude en ligne droite horizontale, des milliers de km seraient nécessaires.

La dernière phase de vol, approche et atterrissage (Approach and Landing) commence à une altitude de 3333,33m et s'arrête à l'arrêt des roues. L'autopilote n'est plus appliqué, cette phase est en effet pilotée essentiellement par les astronautes eux-mêmes.



Il est nécessaire, dans l'approche de type planeur, d'avoir selon la charge à bord un angle d'attaque de 20° ou 18° pour atteindre la vitesse de 300 Noeuds nécessaire à la phase d'atterrissage.

La pré-phase de flair¹⁸ est initialisé à environ 666,66m d'une transition de steep glide slope avec un angle de 18°/20° au shallow glide slope dans lequel la navette a un angle de 1,5°. Cette transition permet de rapetisser l'angle de descente¹⁹ en un angle mieux adapté à l'atterrissage, afin que la navette ne s'écrase pas au sol le nez en premier.

Aux environs de 26,66m, la navette entre dans la phase finale du flair. Après le contact des deux roues arrière de la navette (touchdown), le système de guide va faire une dérotation²⁰ du nez pendant que les pilotes guident la navette sur la ligne centrale de la piste. Finalement, le parachute se déclenche pour ralentir la navette. Cette dernière atterrit sur la piste de Houston, au Texas, qui a une longueur de 4'570 m. La vitesse d'atterrissage varie entre 343 à 364km/h.



figure 32: Voici un atterrissage de la navette spatiale, Endeavour, et ralentissement grâce au parachute.

La navette doit créer une grande portance pour pouvoir supporter la résistance de sa charge et arriver en toute sécurité sur le sol.

Les ailes de la navette sont basses et sont placés sous le «ventre» afin de pouvoir protéger le plus possible la navette de la chaleur. De ce fait, la navette aura besoin de bien moins de tuiles que si les ailes étaient placées au milieu du fuselage comme pour les planeurs. L'emplacement des ailes influence également l'aérodynamique.

Nous allons passer des points communs entre la navette spatiale et le planeur aux différences entre ces deux.

IV.3. Matériaux et Aérodynamique

Nous allons comparer par la suite les matériaux et leurs effets sur l'aérodynamique.

Matériaux de construction de la navette spatiale	Matériaux utilisés dans la construction d'un planeur
<p>La surface supérieure (extrados) de la navette (aile), qui est blanche, est recouverte de tuiles en céramique qui peuvent supporter des températures s'élevant jusqu'à 1'260°C. Ces tuiles recouvrent le 70 % du corps d'aluminium de la navette. Elles isolent l'orbiter de l'énorme chaleur induite par la rentrée dans l'atmosphère. Ces tuiles peuvent être réutilisées, car contrairement aux vaisseaux spatiaux d'autrefois, elles ne brûlent pas.</p>	<p>Il existe différents types de matériaux utilisés dans la construction de planeurs. Jusqu'au milieu des années 60, pratiquement tous les planeurs ont été fabriqués avec un fuselage en treillis de tubes d'aciers et entoilé. C'est à la fin des années 60 que les premiers planeurs en «plastique», c'est-à-dire fibres de verre et résine époxy (matériaux composites), ont été fabriqué en série.</p>

¹⁸ Voir Annexe: Définitions

¹⁹ Cf. image précédente figure 31 sur p.25

²⁰ Orientation exacte du nez par l'action du gouvernail de dérive



Les parties de la navette qui deviennent le plus chaud pendant la rentrée, à savoir le bord d'attaque des ailes, la gouverne, l'empennage et le nez, sont recouvertes d'un matériel carbone spécial qui peut subir des températures s'élevant jusqu'à 1'650°C.

La rentrée dans l'atmosphère, entraîne une température de 1'460°C sur le dessous de la navette, ce qui nécessite 32'000 tuiles de carbone spécial. Cela représente une surface de 1'102 m² et une masse de 7'245 kg.

Le reste de la navette qui ne subit pas l'intensité d'une grande chaleur est fait à partir d'un matériel conventionnel léger, l'aluminium. C'est le cas pour les portes de la soute cargo, par exemple.

L'intérieur de la navette est fait d'un aluminosilicate tempéré de verre pour garder la pression dans le compartiment de l'équipage.

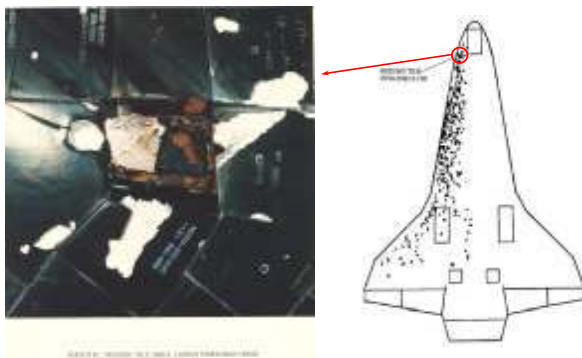
Figure 33: Voici ci-dessous une image de dégâts de matériaux au nez où une tuile manque après le retour d'une mission spatiale.

Les planeurs en matériaux composites sont plus lourds que les anciens planeurs faits de bois et de toile, et la rigidité n'en est pas toujours meilleure. Ces planeurs coûtent cher, mais la fabrication d'un planeur « à l'ancienne » serait actuellement encore plus onéreuse.

L'utilisation de matériaux composites s'explique principalement par la qualité de la surface ainsi obtenue. A une construction très précise s'ajoute en effet une meilleure protection contre les rayons UV et des propriétés aérodynamiques optimales.

La construction de la forme des ailes (vrillage), de celle du fuselage, de l'envergure et de la surface de portance dépend par contre des caractéristiques que l'on aimerait obtenir avec notre planeur. Les spécificités ne seront pas les mêmes selon que l'on veuille un planeur rapide ou un planeur de performance de distance par exemple.

STS 27R Missing Chine Tile





Conclusion de la comparaison des matériaux pour la navette spatiale :

Quelques points importants se dégagent de cette comparaison. Tout d'abord, l'utilisation des tuiles, qui ne peuvent pas forcément être construites de la manière la plus aérodynamique possible, diminue les qualités aérodynamiques de l'ensemble de la navette. De plus, ces matériaux protecteurs sont lourds afin de pouvoir résister aux énormes contraintes qu'elles subissent.

Dans le futur, les scientifiques vont sans doute revenir aux capsules, qui sont à la fois moins chers, plus fiables et plus sécurisantes. La navette a toujours des charges inutiles en réserve, ce qui augmente un poids déjà conséquent et nécessite donc plus de carburant pour la phase de décollage. La phase de rentrée en est également compliquée, car la stabilité et la pilotabilité de la navette en sont affectées. Les astronautes risquent donc bien d'être envoyé séparément de la charge pour éliminer ces lourdes contraintes.

L'idée de construire un jet à moteur à réaction fonctionnant à l'hydrogène reste cependant un rêve pour de nombreux scientifiques.

Conclusion de la comparaison des matériaux pour le planeur :

L'utilisation de nouveaux matériaux composites a permis d'améliorer la forme des planeurs et d'optimiser leur aérodynamique (diminution de la résistance et augmentation de la portance).

Avec les nouvelles recherches en nanotechnologies, les scientifiques cherchent à créer des couches de molécules extra fines et à les placer dans des structures différentes, ceci dans le but d'obtenir des propriétés spécifiques. C'est le cas, par exemple, des textiles qui n'attireraient plus la poussière. Ces possibilités m'ont amenées à la réflexion suivante : Ne pourrait-on pas développer des matériaux qui amélioreraient la basse pression sur l'extrados, et donc offriraient une meilleure force de portance ?

Cette question reste encore ouverte, car les scientifiques cherchent encore à définir si ces particules sont nuisibles à l'homme puisqu'elles ont une taille d'un millième de micron et peuvent pénétrer dans la peau.

Il faudra tout de même comparer les gains potentiels pour l'homme avec les risques que ces produits pourraient toutefois créer.



V. Conclusion

Aussi étrange que cela puisse paraître, les premiers Grecs qui tentaient de voler en fabriquant des fausses ailes d'oiseaux nous ont permis, au fil du temps et des découvertes, d'arriver aux vols sub-orbitaux. La conquête de la troisième dimension s'est faite tant par l'arrivée de nouvelles théories que par les essais, parfois dramatiques, de pionniers aventureux. Les sciences fondamentales se sont donc étroitement mêlées à l'un des plus vieux rêve du monde : voler.

J'ai moi-même commencé par voler sans vraiment connaître toutes les lois et principes qui régissaient ce phénomène. Ce travail de maturité m'aura donc permis d'approfondir mes connaissances en aérodynamiques, et je peux maintenant en expliquer les fonctionnements de base aux jeunes élèves qui veulent apprendre à voler.

Le fait de comparer le vol du planeur à celui de la navette spatiale paraît surprenant au prime abord. Connaissant bien le vol à voile pour le pratiquer personnellement et me passionnant pour les voyages aérospatiaux, j'ai voulu mêler ces deux sujets pour tenter d'en extraire les similitudes. Si au niveau des matériaux utilisés ces deux domaines sont complètement différents, notamment au niveau des technologies employées, des affinités importantes voient le jour au niveau du vol. En effet, bien que totalement différents dans leurs conceptions et dans leurs buts d'utilisation, ils sont régis tous deux par les mêmes principes aérodynamiques. Le planeur fait en sorte de manière perpétuelle ce que la navette n'amorce qu'à la phase d'atterrissage.

La comparaison permet également de mesurer le chemin parcouru. Si le planeur était possible à partir de matériaux simples, tels que le bois ou le papier, la navette spatiale nécessite quant à elle une technologie de pointe faisant appel aux plus récentes découvertes. En effet, en rentrant dans l'atmosphère la navette subit des contraintes énormes (rayons UV, chaleur, accélération terrestre, etc.) que ne connaît pas ou rarement le planeur.

On peut se demander dès lors si les vols spatiaux deviendront aussi accessibles que l'est le vol par planeur, et si dans quelques siècles l'aviation deviendra un mode de transport aussi répandu que l'est l'automobile. C'est, tout du moins, ce que j'espère !



...AND ALWAYS HAPPY LANDING !!!



Annexe

Définitions

Aile (wing)

Surface d'un aéronef assurant la part principale de la portance.
(Tiré du livre : Principes du vol Ch.

centre de gravité

La force de pesanteur d'un corps passe par son centre de gravité. En mécanique de vol, le centre de gravité est pris comme origine (point central) de divers systèmes de coordonnées. Les trois axes de l'avion passent par le centre de gravité.

Sont importantes pour la stabilité et la pilotabilité d'un avion : la position du centre de gravité, de même que ses déplacements.

Position du centre de gravité

La position du centre de gravité est son emplacement relativement aux axes de l'avion, fixés de par sa construction.

Déplacement du centre de gravité

Variation de la position du centre de gravité d'un avion pendant le vol, du fait du largage de charges.

(Tiré du livre : Principes du vol Ch.6-4-1 p.1-2)

centre de poussée (center of pressure)

Le centre de poussée est le point supposé de l'application des forces aérodynamiques sur le profil. C'est le point où toutes les forces se concentrent.

La portance se crée sur chaque partie de l'aile. Pour simplifier sa représentation, on la représente en un point en regroupant l'ensemble des petits éléments de portance. Le point d'application de la portance globale s'appelle le centre de poussée. Lors des différentes phases de vol il se déplace sur l'aile en fonction de la vitesse et de l'incidence. Plus ces déplacements sont importants et plus l'avion sera délicat à piloter.

(Tiré du livre : Principes du vol Ch.6-4-1 p. et Ch.2-1-3 p.8)

coefficient

Les coefficients employés en aérodynamique sont sans dimension. Par exemple, au lieu d'une force en « Newtons », seul un chiffre est indiqué. Ils sont employés pour la description des forces aérodynamiques et des moments.

(Tiré du livre : Principes du vol Ch.2-1-3 p.2)

écoulement laminaire

Un écoulement laminaire est un écoulement d'un fluide régulier et à vitesse constante. Toutes les couches adjacentes du liquide glissent uniformément l'une sur l'autre. Chaque couche successive de molécules du fluide se déplace lentement et doucement et surtout régulièrement l'une à côté de l'autre. La laminarité n'implique pas la constance de la vitesse. Si la vitesse de l'écoulement de l'air autour d'une aile était constante, il n'y aurait pas de portance. En effet, les différences de vitesse sur et sous l'aile ont comme conséquence une différence de pressions, et c'est cette différence de pressions qui porte le planeur. L'équation de Bernoulli décrit la relation entre vitesse et pression.

(Tiré des livres : Physique d'EUGENE Hecht et Physique 1Ch.11 Les fluides p.416-417 , Mécanique et Thermodynamique de SERWAY Ch.15 Mécanique des fluides p.550)

écoulement turbulent

L'écoulement turbulent correspond à un écoulement irrégulier et chaotique. Cet écoulement provient d'une augmentation de la vitesse d'un écoulement laminaire couplé à une rencontre avec un obstacle ou une discontinuité. Les molécules (qui forment les lignes de courant) créent alors des tourbillons, ce qui



engendre une résistance. Celle-ci va finir par tourner en boucles les lignes de courants. La vitesse de l'apparition de l'écoulement tourbillonnaire dépend de la forme géométrique et de la viscosité du fluide entourant. Dans notre cas, le fluide entourant est l'air, fluide qui a une faible viscosité.

(Tiré des livres : *Physique* d'EUGENE Hecht et *Physique 1* Ch.11 Les fluides p.416-417 ,
Mécanique et Thermodynamique de SERWAY Ch.15 Mécanique des fluides p.550)

flair

C'est la phase d'arrondi précédant l'atterrissage. Les pilotes en approche arrondissent l'angle de descente en un angle plus à l'horizontale. Pour ce faire, on tire le nez du planeur vers le haut pour avoir un bel et doux atterrissage avec - pour la navette - les deux roues arrière puis la roue avant sur le sol. Pour les planeurs, il serait plus joli et plus doux que la roue centrale touche en même temps le sol avec la roue de devant.

(Tiré de ma mémoire et de mes expériences pratiques, composé moi-même)

force de portance

Perpendiculaire à la direction d'afflux et à la vitesse de vol, et perpendiculaire à l'envergure de l'aile portante (on admet que la force de portance F_z passe par le centre de gravité)

(Tiré du livre : *Principes du vol* Ch.2-1-2 p.4)

force de traînée

Parallèle à la direction d'afflux et à la vitesse de vol (on admet que la force de traînée F_x passe par le centre de gravité)

(Tiré du livre : *Principes du vol* Ch.2-1-2 p.4)

foyer

Les variations de la portance sont quant à elles appliquée en un autre point que l'on appelle le foyer. Il se situe entre le quart 25% et le tiers 33% de la corde en partant du bord d'attaque. Ces déplacements sont limités.

(Tiré d'internet : *Encyclopédie universalis*)

facteur de charge n

Le facteur de charge est la portance aérodynamique totale agissant sur l'avion, perpendiculairement à sa trajectoire, divisée par la masse de l'avion. Le facteur de charge n , en tant que multiple de l'accélération gravitationnelle terrestre, est défini comme une valeur sans dimension.

$$n = F_{\text{portance}} / F_{\text{poids}}$$

(Tiré du livre : *Principes du vol* Ch.7-2 p.1)

lignes de courant

Les particules (dans notre cas les molécules contenues dans l'air) se suivent les une après les autres et tracent des lignes rectilignes dans la même direction à une distance égale. Chaque particule suit l'itinéraire de la particule précédente. Ces trajectoires invariables et régulières s'appellent des lignes de courant.

Elles sont régulières dans le cas d'un écoulement laminaire mais à partir d'une turbulence, ces lignes sont dérangées.

(Tiré du livre : *Principes du vol* Ch.2-1-3p.7)

nombre de Reynolds

Ce nombre caractérise un écoulement. Il représente le rapport entre forces d'inerties et forces visqueuses. Il est le plus important nombre sans dimension en dynamique des fluides. Il est proportionnel à la vitesse et à la longueur de la profondeur du profil, mais aussi à la densité de l'air.

Aux faibles valeurs du Reynolds, les forces de viscosité sont prépondérantes ce qui maintient l'écoulement laminaire. Aux fortes valeurs du Reynolds, les forces d'inertie sont prépondérantes et les turbulences peuvent s'amplifier jusqu'au régime de transition. De la même manière la couche limite laminaire diminue.



Exemple pratique : Lorsqu'on désire tester l'aérodynamique d'un avion à une vitesse de 100km/h et nous disposons d'un modèle à l'échelle 1:4, il nous faudra dans la soufflerie un écoulement à une vitesse de 400km/h. Puisque le nombre de Reynolds est aussi proportionnel à la densité de l'air, nous pouvons faire intervenir dans la soufflerie des surpressions ou travailler avec d'autres gaz que l'air pour ne pas devoir augmenter trop énormément la vitesse d'écoulement. Si le « l'air » est deux fois plus épaisse, alors il nous suffit pour le modèle 1:4 des vitesses d'écoulement s'élevant jusqu'à 200km/h, pour pouvoir tester les comportements de l'avion original volant à des vitesses de 100km/h.

Ce nombre est aussi très important pour les avions modèles : Un modèle B4 avec 3 mètres d'envergure avec la même forme que l'original devrait voler cinq fois plus rapide s'il a le même profil d'aile. C'est pour cette raison là, que les profils d'aile des avions modèles sont souvent différents que l'original.

Voici ci-dessous la formule :

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\eta} \quad \text{ou bien} \quad Re = \frac{v_s D}{\nu} .$$

avec :

- v_s - vitesse du fluide,
- D - diamètre hydraulique (égal au diamètre pour une section circulaire et de façon plus générale, à 4 fois la surface de la section droite sur le périmètre de cette section),
- η - (absolu) viscosité du fluide,
- ν - viscosité cinématique du fluide : $\nu = \eta / \rho$,
- ρ - masse volumique du fluide.

pression dynamique

La pression dynamique représente la pression d'engorgement du tube. C'est la pression du fluide lui-même, ce qui nous donne la vitesse d'écoulement. C'est la pression exercée sur le fond d'un tube fermé (tube de Pitot).

(Tiré du livre : Principes du vol Ch.2-1-1 p.2)

pression statique

La pression statique est la pression extérieure de l'objet en question. C'est la pression environnante. Donc dans le cas de ce tube ou dans l'aviation en général, la pression statique représente la pression de l'air environnant l'avion.

(Tiré du livre : Principes du vol Ch.2-1-1 p.2 et)

profil (en aérodynamique)

Coupe transversale de l'aile. Coupe à travers une aile dans la direction de l'écoulement

(tiré du livre : Principes du vol Ch. 2-1-1 p.2)

point d'arrêt

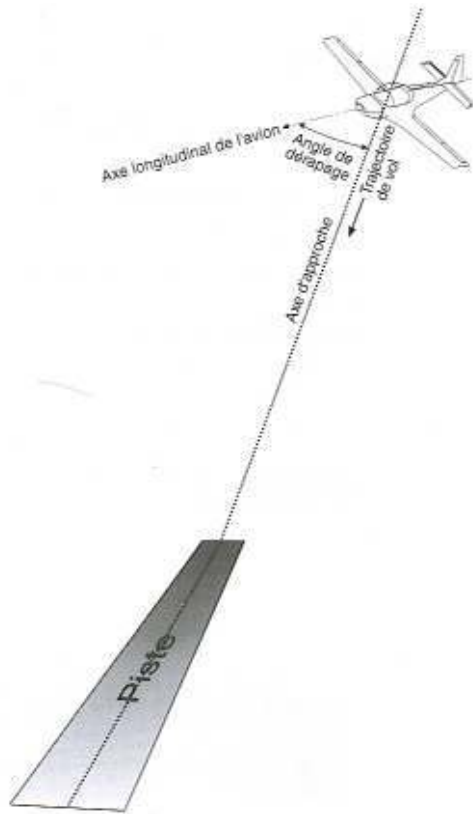
Le point d'arrêt est le point où les lignes de courant se séparent, la vitesse d'écoulement y étant nulle.

(Tiré du livre : Principes du vol Ch.2-1-3 p.8)



Pour aller plus loin

La glissade (aussi dit vol plané latéral = slide slip)

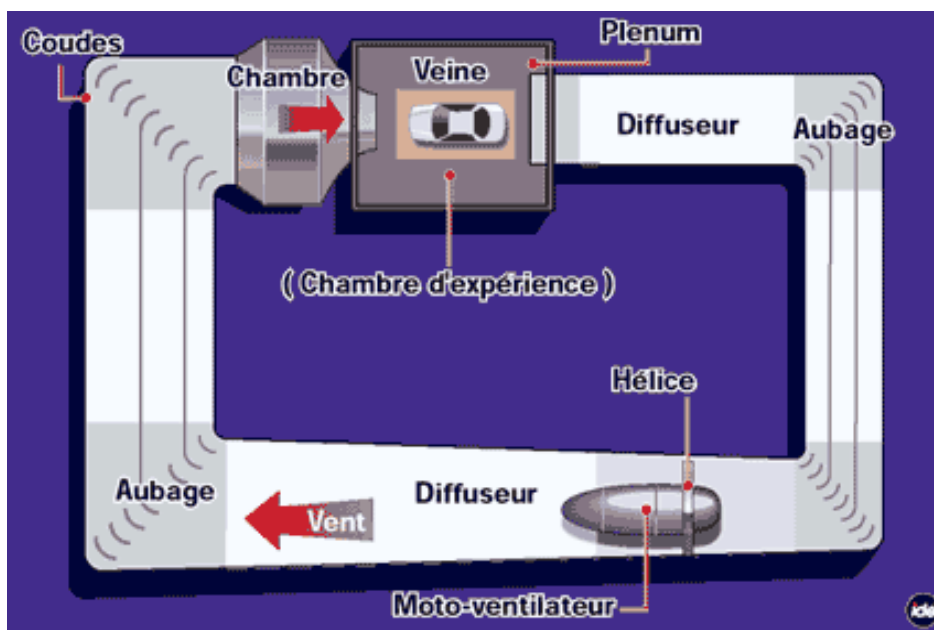


Autrefois, avec les anciens planeurs, les aérofreins pour l'approche d'atterrissage étaient assez petits et peu efficaces. La glissade était donc nécessaire.

Pour ce faire, le planeur se place transversalement en diagonal (la face latérale du planeur), contre le vent. Il augmente ainsi la traînée grâce à une plus grande surface du fuselage en face du vent relatif. Le pilote se met intentionnellement dans une situation de dérapage. Cette position de vol est utilisée comme un moyen de correction de l'angle de plané. Plus le pilote augmente l'angle de dérapage (angle de vol plané) plus l'intensité de la traînée va augmenter. La direction du nez du planeur, donc dans le cockpit, montre dans une direction de l'axe longitudinal de l'avion, mais la vraie direction de trajectoire de vol parcouru est sur l'axe d'approche, donc dans la vraie direction et l'axe de la piste d'atterrissage.

Quelques planeurs avec un fuselage assez arrondi et mince, et surtout les planeurs modernes en matière composite ou plastique, ont de tels bons aérofreins que la glissade est presque moins efficace. Il faut cependant faire attention, tous les avions ne peuvent effectuer une glissade.

Le fonctionnement d'une soufflerie



Voici ci-dessus un schéma du fonctionnement d'une soufflerie. Normalement pour les tests dans le domaine aéronautique, la voiture est remplacé par un profil d'aile ou un modèle d'avion construit à l'échelle.

Bibliographie

Source de livre et d'ouvrages

Introduction :

BALIBAR Françoise et HINTERMAIER-ERHARD Gerd et MAURY Jean-Pierre, *Luft und Wasser, Der Mensch im Spannungsfeld der Natur*, Paris, Hachette, 1985.

BOYNE Walter et GWYNN-JONES Terry et MOOLMAN Valerie, *Le vol et l'aérodynamique*, Amsterdam, Time-Life Books Inc., 1990.

MAIER Dieter, *Das Spiel mit dem Aufwind*, Stuttgart, Motorbuch Verlag, [s.d.].

Historique :

LACHNITT Jacques, *L'Aérodynamique*, Vendôme, Presses Universitaires de France, coll. Que sais-je ?, 1957.

REYES Gary, *Flugzeuge, Der Traum vom Fliegen*, Hamburg, Xenos Verlagsgesellschaft mbH, 1992.

Aérodynamique du planeur :

GUGGIARI Bruno et WEICHELTER Peter, *Principes du vol dans le domaine subsonique*, Lucerne, Aéroclub-club de Suisse, 1999.

SERWAY, *Physique 1, Mécanique et Thermodynamique*, 3^e éd., De Boeck Université, [s.l.n.d.].

HECHT Eugene, *Physique*, ITP De Boeck Université, [s.l.n.d.].

KANE et STERNHEIM, *Physique*, InterEditions, [s.l.n.d.].

EICHENBERGER Willy, *Aerodynamik und Flugmechanik*, Bern, Bundesamt für Zivilluftfahrt, 1974.

Aérodynamique de la navette spatiale :

De, Mr. « Rutans privater Trip ins All, Erster voller Flug des « Space Ship One » am 21.Juni », *Neue Zürcher Zeitung, Vermischte Meldungen*, Nr. 132, 10 Juin 2004, p.19.

MOCHÉ Dinah L. et D. Ph., *Astronomy Today, Planets Stars Space Exploration*, New York, Random House, 1982.

OXLADE Christopher, *L'Univers, voyage dans l'infiniment grand*, Paris, Éditions Nathan, 1997.

National Aeronautics and Space Administration, *Entry Guidance Workbook*, Houston (Texas), NASA Johnson Space Center, 1996.

Source d'Internet

perso.wanadoo.fr/.../bia_aerodynamique.html (*aérodynamique*)

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Finesse> (*aérodynamique : terme spécifique, définitions*)

www.aviation-fr.info (*images en aérodynamique, schéma et explications*)

<http://members.fortunecity.com/mathsetplus/aero.html> (*principes Aérodynamique, exemples...*)

<http://space.balettie.com/Shuttle/Orbiter.html> (*informations sur les dimensions de la navette spatiale, et ses matériaux de construction*)

<http://spaceflight.nasa.gov/shuttle/reference/basics/index.html> (*dimensions de la navette spatial, les bases des missions et de l'atterrissage*)

<http://www.esa.int> (*fonctionnement des fusées, futurs projets envisagés par l'ESA*)

www.ruag.ch (*fonctionnement de la soufflerie, liens pour d'autres sites techniques*)

www.pilatus-aircraft.com (*procédés de tests en aérodynamique*)

www.mitucci.com (*images et schéma, explications et fonctionnement aérodynamique*)

<http://nkma.ksc.nasa.gov/projects/lst/personnel/Karczub.html> (*nouveaux projets envisagés dans l'aéronautique par la NASA, concept et idées de nouvelles navettes, sa structure et son principe de fonctionnement*)

http://www2.ac-lille.fr/ciras/BIA/Cours_BIA/A%C3%A9rodynamique%20et%20m%C3%A9canique%20du%20vol%202003.pdf (*images, explications des formules physiques*)

www.google.ch (*moteur de recherche*)

Source de CD-ROM

Microsofe Encarta, Encyclopédie ENCARTA 2001 De Luxe, Etats-Unis d'Amérique, 2001 (*aérodynamique du planeur, de la navette spatiale, informations en plus*)

Source de DVD

STANEK, Raumfahrt Lexikon 2004, Arth, Astrosoftware Dr.B.L. Stanek, 2004 (*aérodynamique de la navette spatiale*)