

AERODYNAMIQUE

AERODYNAMIQUE ET MECANIQUE DU VOL.....	1
L'AILE	1
<i>Descriptif</i>	1
<i>La forme</i>	1
<i>Les profils</i>	3
<i>Particularité du bord d'attaque</i>	3
<i>Bord de fuite</i>	3
<i>Principaux types de profils</i>	3
<i>Fonctionnement aérodynamique</i>	4
<i>La portance</i>	5
<i>Equilibre portance / poids</i>	5
<i>Portance et incidence</i>	5
<i>Limite de la portance</i>	6
<i>Portance et vitesse</i>	7
<i>Portance et autres paramètres</i>	7
<i>Le calage</i>	8
<i>La traînée</i>	8
<i>la traînée due à l'écoulement de l'air autour de l'avion</i>	10
<i>La traînée induite par la forme de l'aile:</i>	10
<i>Une synthèse</i>	11
LES EQUILIBRES	11
<i>En palier</i>	11
<i>En montée</i>	12
<i>En descente</i>	12
LE FACTEUR DE CHARGE	13
<i>Facteur de charge en virage</i>	13
<i>Les conséquences sur le vol</i>	14
LA FINESSE	15
<i>Le principe</i>	16
<i>La stabilité longitudinale:</i>	16
<i>Le centrage</i>	16
<i>L'empennage horizontal</i>	17
<i>La dérive</i>	19
<i>L'angle de dièdre</i>	20
<i>Roulis induit</i>	21
<i>Effets stabilisateur</i>	21
LES GOUVERNES	23
<i>Les axes de référence</i>	23
<i>Le fonctionnement</i>	23
<i>La profondeur</i>	24
<i>La direction</i>	24
<i>Le gauchissement</i>	24
LIST DES MISES A JOUR	25
PRECISION MINEUR/CORRECTION	25
ADDITION DE CHAPITRE	25
REFONTE DE CHAPITRE:	25

AERODYNAMIQUE ET MECANIQUE DU VOL

Lorsque l'on observe un modèle, on constate qu'il est composé d'un fuselage sur lequel sont montés, à l'avant un moteur (évidemment pas sur un planeur), environ au premier tiers une aile, et à l'arrière des empennages (un plan horizontal et un plan vertical).

Au cours des chapitres suivants, le rôle de chacun de ces éléments sera abordé d'une façon simplifiée. Une étude plus approfondie de l'aérodynamique est disponible dans le livre "initiation à l'aéronautique" disponible à la FFAM.

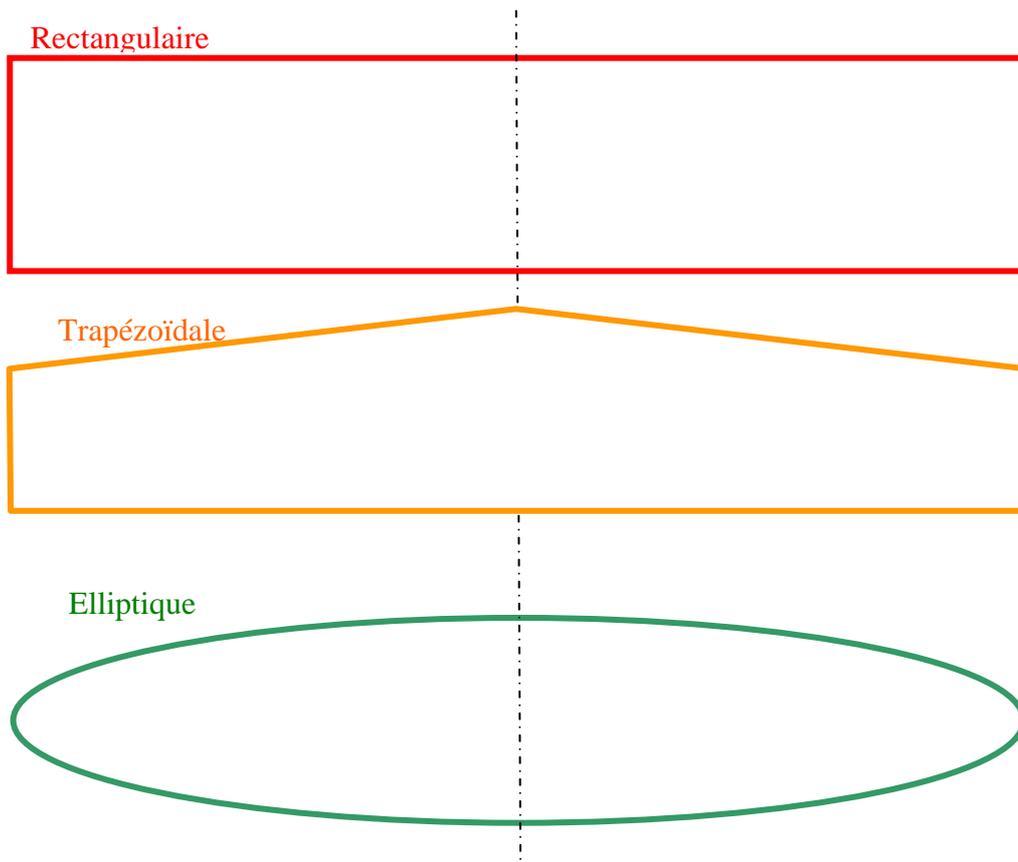
L'AILE

Descriptif

L'aile se caractérise par sa forme et ses dimensions (envergure et corde).

La forme

L'aile la plus simple, et la plus facile à construire, est une aile dont la forme en plan est rectangulaire, mais son rendement sera meilleur si elle est elliptique. Compte tenu des difficultés de réalisation d'une telle aile, une forme trapézoïdale est un bon compromis.



Les dimensions

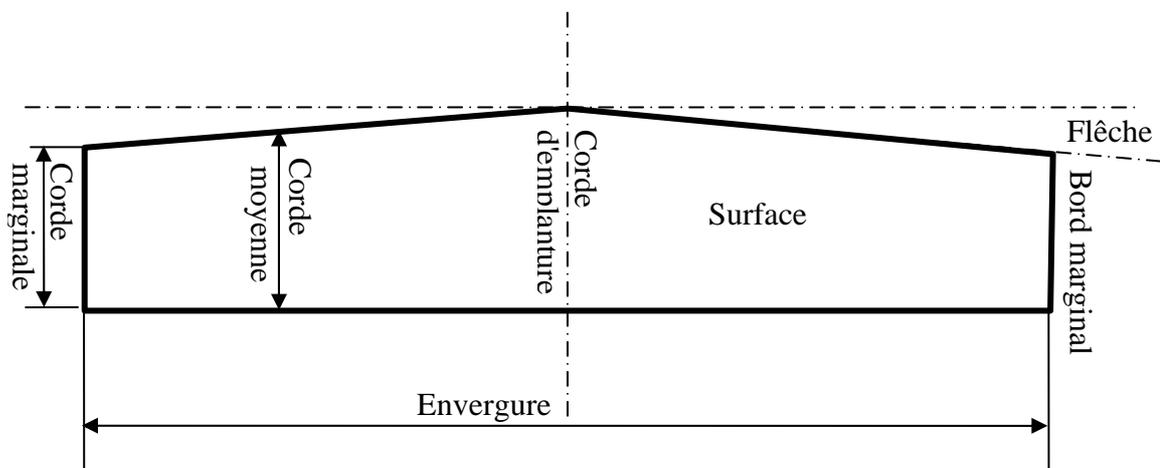
L'envergure: distance d'un bord marginal à l'autre.

La corde: distance du bord d'attaque au bord de fuite.

La corde moyenne: corde du profil située au centre de gravité d'une demie aile (ne pas confondre avec la moyenne des cordes).

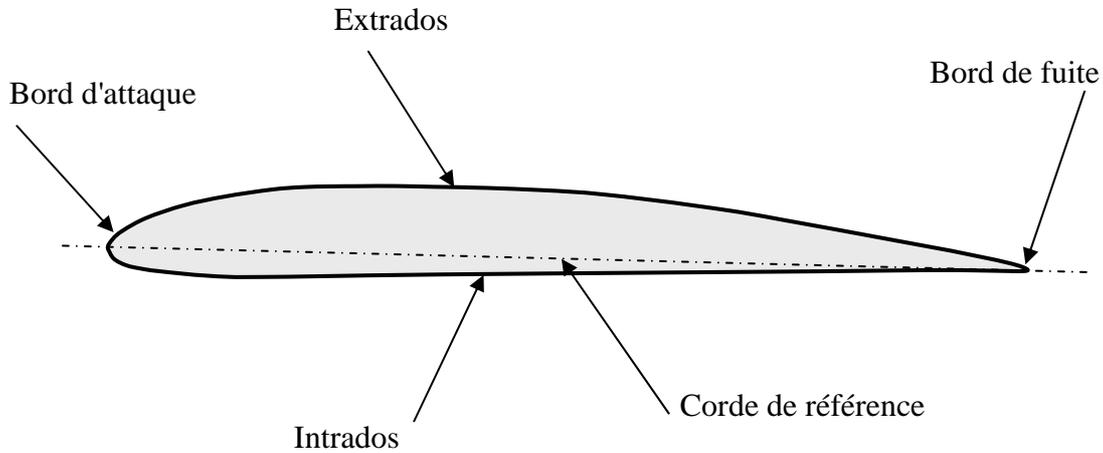
La surface: surface de la voilure, y compris la zone du fuselage

La flèche: angle entre la bord d'attaque (si flèche de bord d'attaque) et une ligne perpendiculaire à l'axe de symétrie de la voilure.



Les profils

La forme générale d'un profil s'articule autour de la corde de référence qui joint la tangente au bord d'attaque à la tangente au bord de fuite. Les principales parties d'un profil sont: le bord d'attaque, le bord de fuite, l'extrados et l'intrados.



Particularité du bord d'attaque

Le bord d'attaque est une zone importante. De sa forme et de son état de surface dépend la qualité de l'écoulement de l'air sur le reste du profil. Il est donc important de respecter sa forme et son état de surface.

- Un bord d'attaque trop pointu ou abîmé détériore l'écoulement aérodynamique, ce qui réduit la portance et augmente beaucoup la traînée.
- Un bord d'attaque tombant donnera un vol instable.

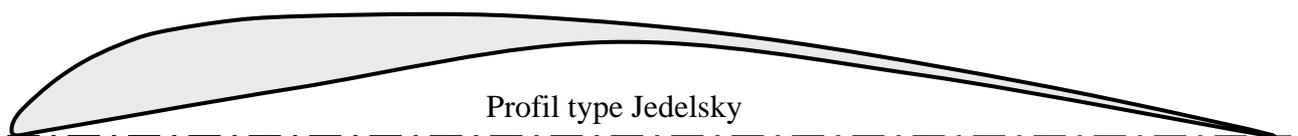
Bord de fuite

Sur les modèles de début, compte tenu des profils utilisés, inutile de transformer le bord de fuite de l'aile en lame de rasoir. Cette zone deviendrait plus fragile, sans pour autant, garantir que l'écoulement aérodynamique influence les performances générales du profil.

Principaux types de profils

Concernant les formes des profils, une simple plaque serait suffisante mais le rapport portance/traînée (finesse) serait déplorable. On emploie donc des profils de formes plus ou moins élaborées selon le résultat à obtenir.

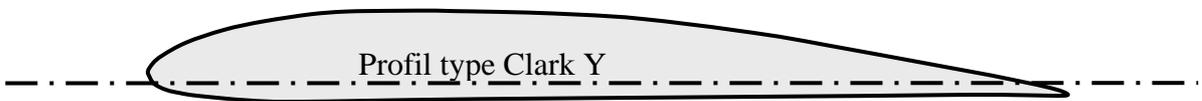
- Un profil concave, communément appelé profil creux, comme un profil Jedelsky, produira beaucoup de portance à faible vitesse mais avec une forte traînée.



- Un profil biconvexe, comme un profil NACA, conviendra bien pour des vitesses plus élevées, la traînée restant faible.

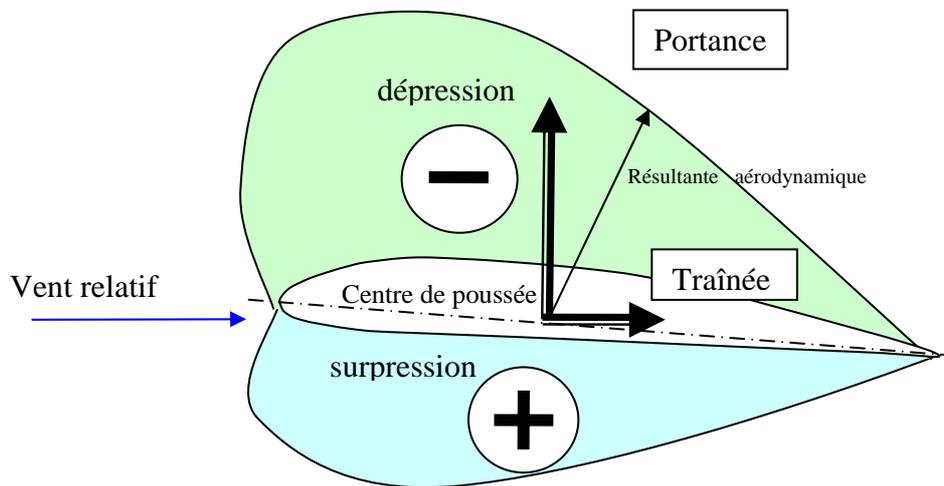


- Une solution intermédiaire est le profil plan convexe comme le profil Clark Y, très souvent nommé profil plat par les modélistes. Ce type de profil, est celui utilisé sur beaucoup d'avions de début. Il donne une portance satisfaisante à une vitesse modérée avec une traînée acceptable. De plus, l'intrados plat sur la plus grande partie de sa longueur facilite sa construction et son calage.



Fonctionnement aérodynamique

Lors du déplacement du modèle, l'air qui circule autour du profil de son aile génère une dépression à l'extrados (dessus) et une surpression à l'intrados (dessous). Cette différence de pression crée une force qui porte l'avion: la portance. Cet écoulement crée également une force résistante qui tend à freiner l'avion: la traînée. La combinaison de ces deux forces s'applique en un point nommé centre de poussée

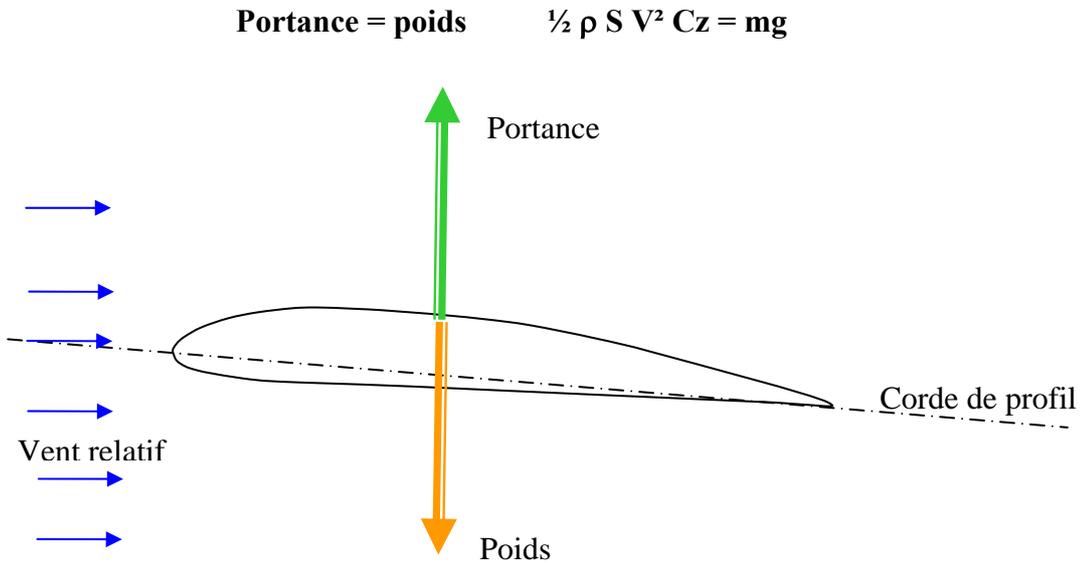


La portance

Equilibre portance / poids

Lorsque l'avion ne monte pas et ne descend pas (vol en palier), la portance équilibre le poids de l'avion.

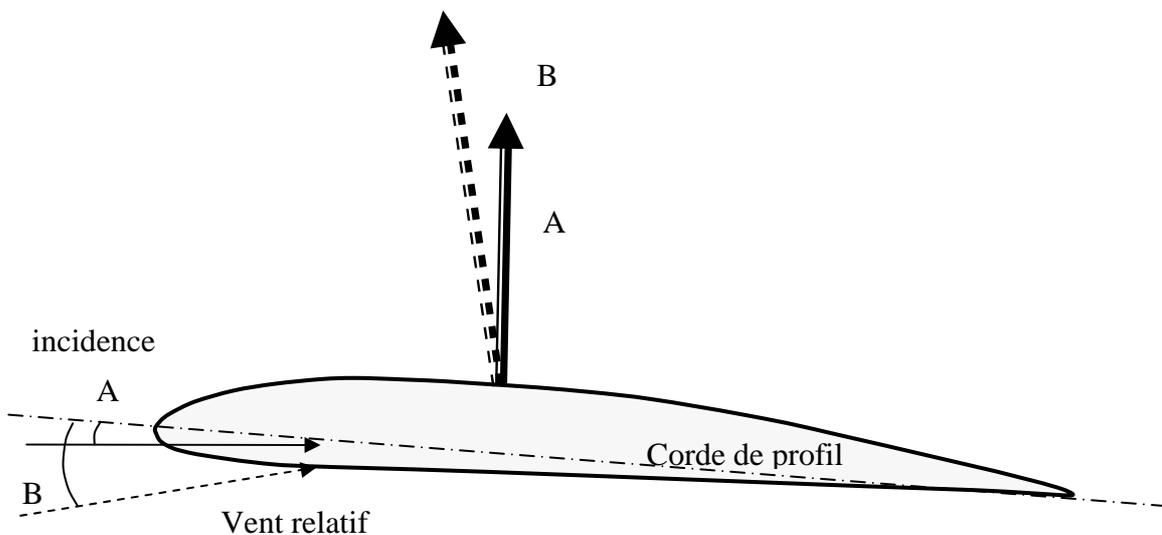
- Si la portance augmente, le modèle monte,
- Si la portance diminue, le modèle descend.



Portance et incidence

Pour que l'aile qui se déplace dans l'air crée une portance, il faut que la corde de référence fasse un certain angle (incidence) avec le courant d'air (vent relatif) qui vient la frapper.

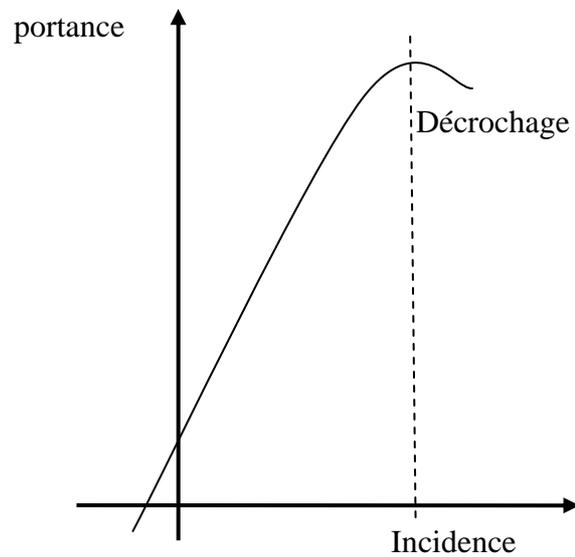
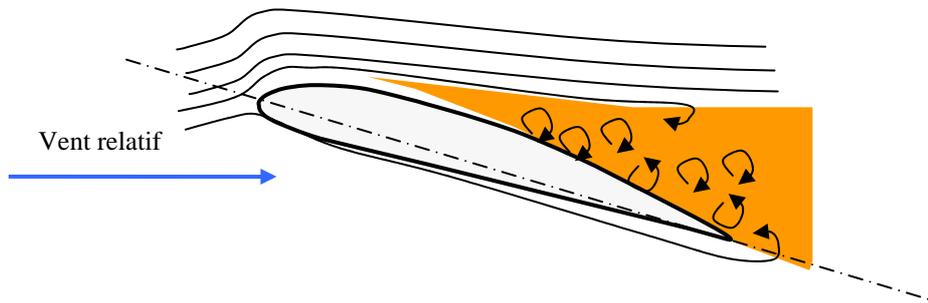
Si l'incidence augmente la portance augmente.



Limite de la portance

Mais cette augmentation a une limite au-delà de laquelle l'air ne peut plus s'écouler sur le profil. Selon les profils, lorsque l'angle entre la corde et le vent relatif atteint de 10 à 15°, il se crée des tourbillons qui empêchent les filets d'air "d'accrocher" au profil. Il n'y a plus de portance.

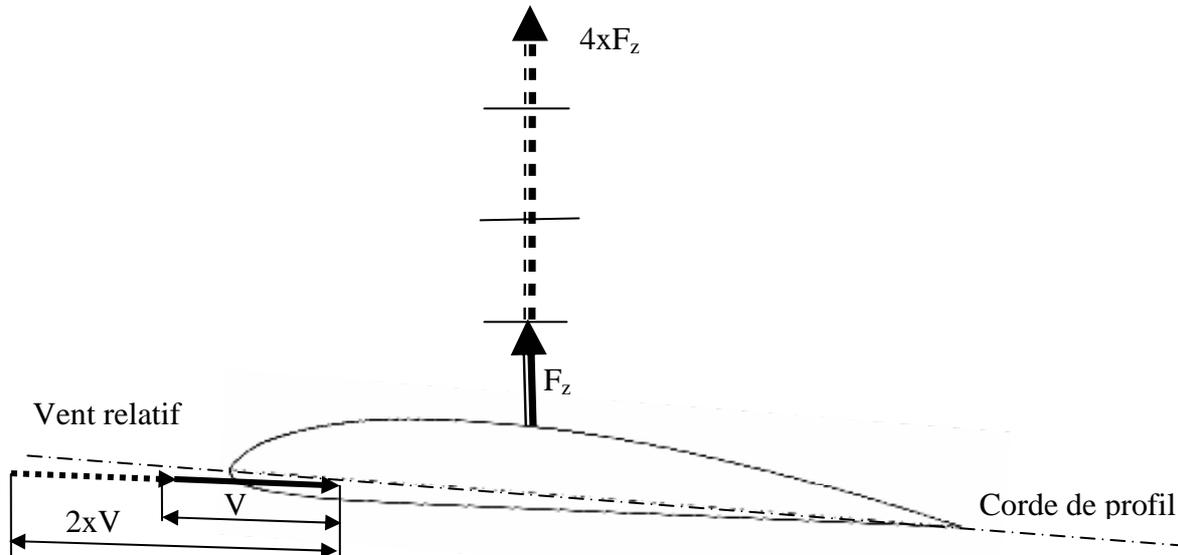
On dit que l'aile (le profil) décroche.



Portance et vitesse

La portance est d'autant plus élevée que la vitesse est élevée, en fait, la portance croît comme le carré de la vitesse:

deux fois plus de vitesse = quatre fois plus de portance.



Portance et autres paramètres

- Toute l'envergure de l'aile crée une portance, cette dernière sera donc proportionnelle à la surface de l'aile.
- La forme du profil permet de déterminer la qualité de la portance. Cette forme est caractérisée par un coefficient nommé C_z .
- L'air dans lequel se déplace l'aile a des caractéristiques dépendant d'autres grandeurs comme la température, la pression...etc. Le paramètre global retenu est la masse volumique en kg/m^3 .

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

ρ : masse volumique de l'air en kg/m^3

S : surface de l'aile en m^2

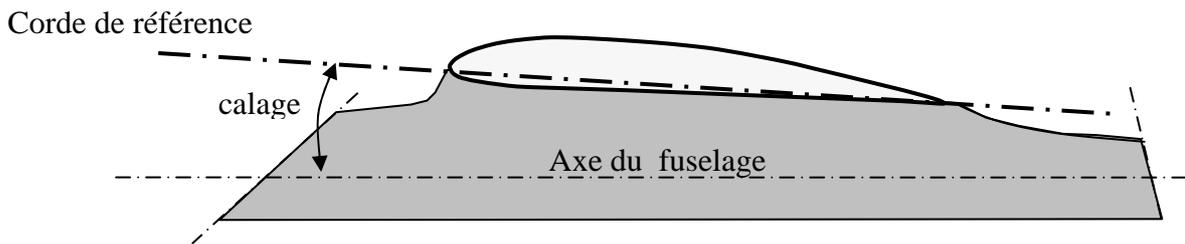
V^2 : vitesse en m/s

C_z : coefficient de portance du profil

Le calage

En vol, l'angle d'incidence ne doit pas donner à l'avion une attitude déplaisante. Pour que l'avion vole fuselage sensiblement horizontal tout en garantissant à l'aile une bonne incidence, l'aile est montée sur le fuselage avec un certain angle: le calage.

Il ne faut donc pas confondre le calage qui est fixé par la géométrie de l'appareil avec l'incidence qui est fonction de la vitesse et de la forme du profil.

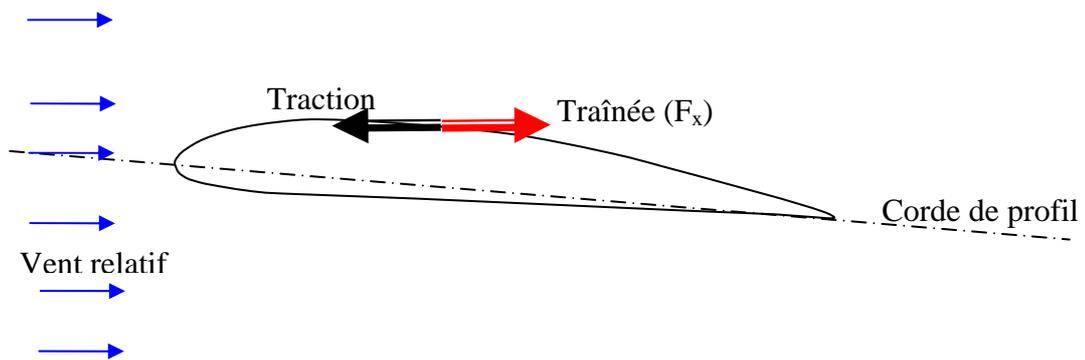


La traînée

C'est une force résistante qui freine l'avion. Pour combattre la traînée, il faut créer une force de traction. C'est le rôle du couple moteur/hélice, et c'est la raison pour laquelle, les planeurs sont obligés de descendre en permanence dans la masse d'air dans laquelle ils évoluent.

Pour que le modèle vole à vitesse constante, il faut que la traction soit égale à la traînée.

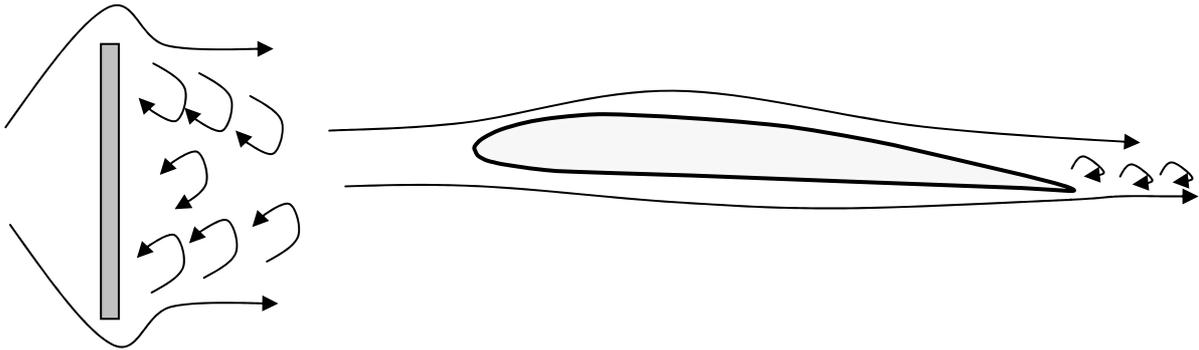
- Si la traction est supérieure à la traînée, le modèle accélère
- Si la traînée est supérieure à la traction, le modèle décélère.



La traînée due à la forme du profil:

Lorsqu'un objet se déplace, il crée une traînée qui résiste à son avancement. Chaque profil est étudié pour que sa traînée soit la plus faible possible mais aucun profil ne peut avoir une traînée égale à zéro. La traînée est caractérisée par un coefficient le C_x , ce qui donne la formule suivante:

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

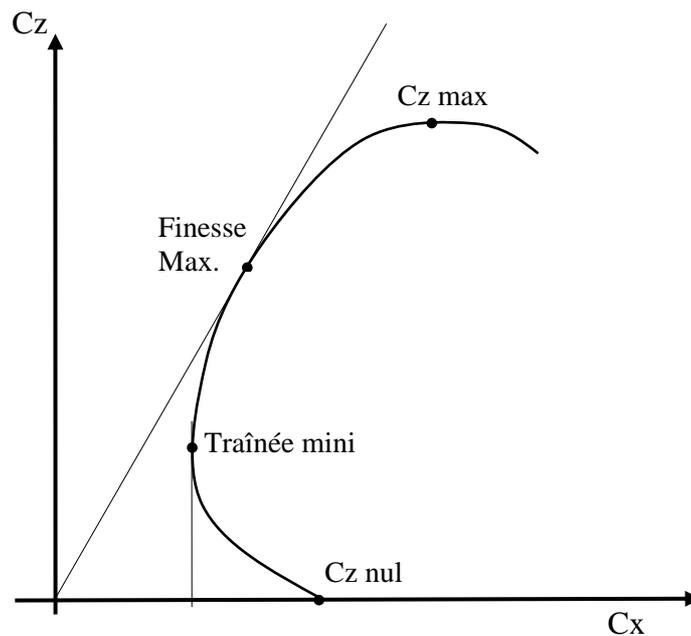


La traînée n'est jamais nulle

La traînée due à la portance:

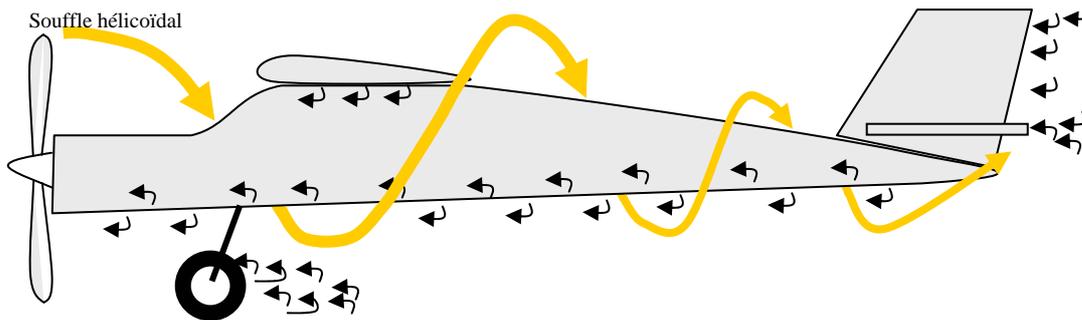
Pour augmenter la portance il faut augmenter l'un des paramètres qui la crée, ce qui aura pour effet d'augmenter également la traînée.

Plus il y a de portance et plus il y a de traînée



la traînée due à l'écoulement de l'air autour de l'avion.

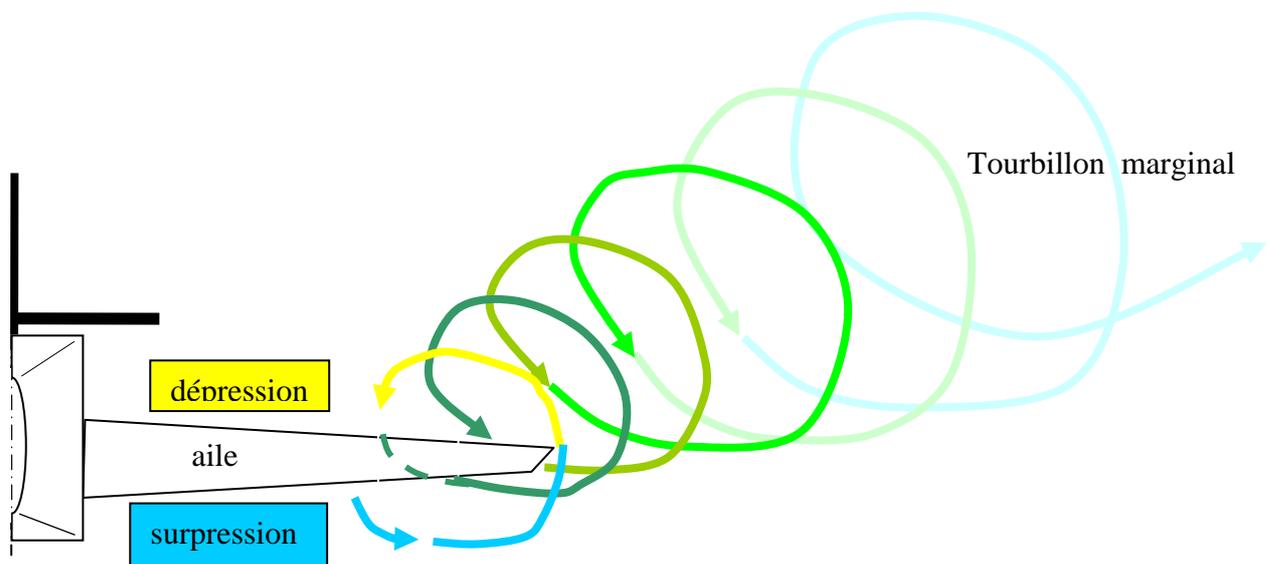
Ce qui a été dit pour l'aile, s'applique également à l'ensemble de l'avion. La diminution de la surface frontale (maître-couple), le profilage et le carénage de tout ce qui dépasse, le soin porté aux jonctions entre les différents éléments (karman) limitera la traînée.



La traînée induite par la forme de l'aile:

L'extrémité de l'aile est une zone où la pression d'intrados rejoint la dépression d'extrados ce qui crée des tourbillons (tourbillons marginaux). Afin de diminuer la traînée induite par ces tourbillons, il est nécessaire de réduire progressivement les champs de pressions lorsqu'on s'approche de l'extrémité de l'aile. Pour cela, à surface d'aile identique, une plus grande envergure sera préférable à une plus grande corde. On augmente l'allongement ($\text{envergure}^2/\text{surface}$.)

Bien entendu, cette augmentation d'envergure crée des problèmes de résistance mécanique: La portance en bout d'aile a tendance à la faire plier et à la casser. Des dispositifs ont été développés, soit pour limiter les effets mécaniques dus à l'allongement (winglet), soit pour canaliser l'écoulement au bord marginal (cloison, tube).



Une synthèse

Lorsqu'on aborde la phase de pilotage, on met facilement en évidence les différents paramètres qui viennent d'être passés en revue.

En vol en *palier* à vitesse constante, l'avion a une *attitude* sensiblement horizontale, le *calage* donne une *incidence* qui garantit une *portance égale au poids* de l'avion. La vitesse est constante donc la puissance délivrée par le moteur donne à l'hélice une *force de traction égale à la traînée de l'avion*.

A partir de cette situation d'équilibre, on veut garder un vol en palier.

Si, par exemple, la puissance diminue, la traînée devient supérieure à la traction: la vitesse chute.

La diminution de vitesse fait chuter la portance.

Comme la portance devient inférieure au poids, l'avion tend à descendre. Pour ne pas descendre, il faut maintenir la portance en augmentant l'incidence.

Mais, cette augmentation d'incidence génère d'avantage de traînée et ce qui diminue la vitesse. La vitesse diminuant, la portance décroît, pour ne pas descendre, il faut contrer cette diminution de portance en augmentant l'incidence etc....

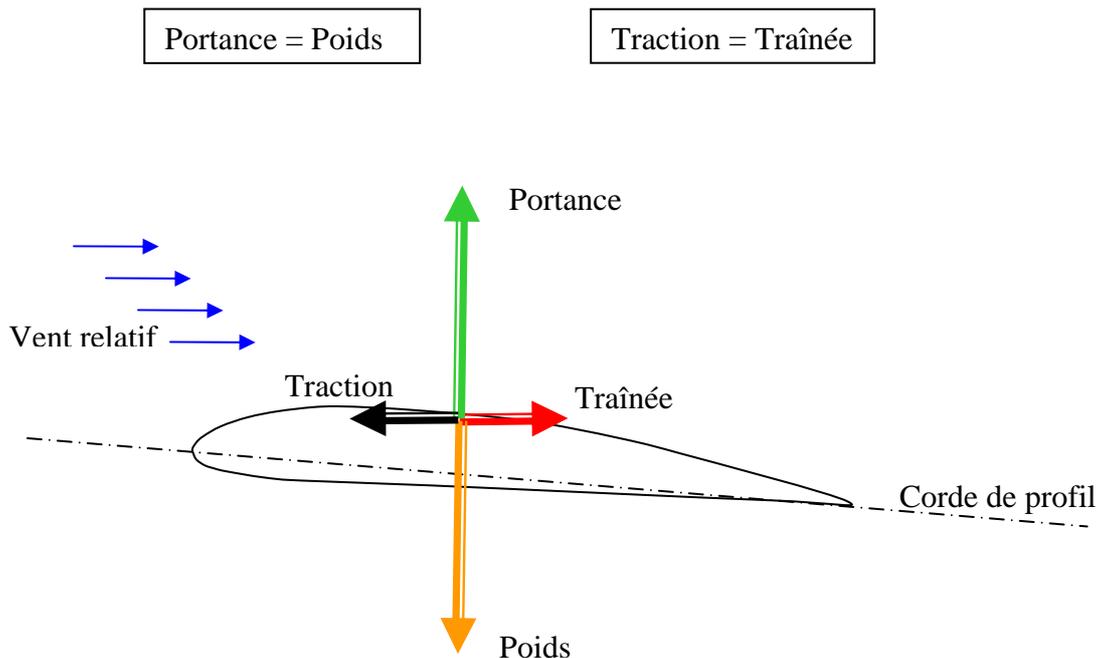
Le système s'écarte de sa position d'équilibre jusqu'au moment où l'incidence arrive à la limite acceptable par le profil. Il y a décrochage. L'avion n'est plus porté et tombe en piquant du nez; on dit qu'il fait une abattée.

On constate que la vitesse est une donnée importante pour tous vols car elle détermine l'angle d'incidence nécessaire pour obtenir la portance souhaitée au cours de la phase de vol.

LES EQUILIBRES

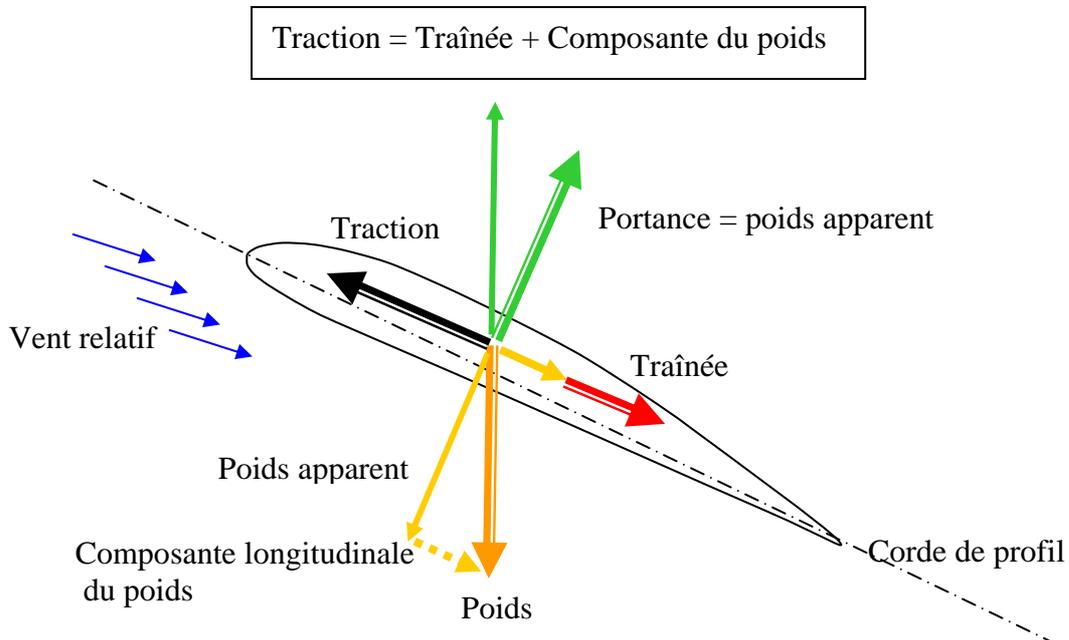
En palier

Ce cas a été vu précédemment, lorsque l'avion est en palier, la portance équilibre le poids et la traction équilibre la traînée



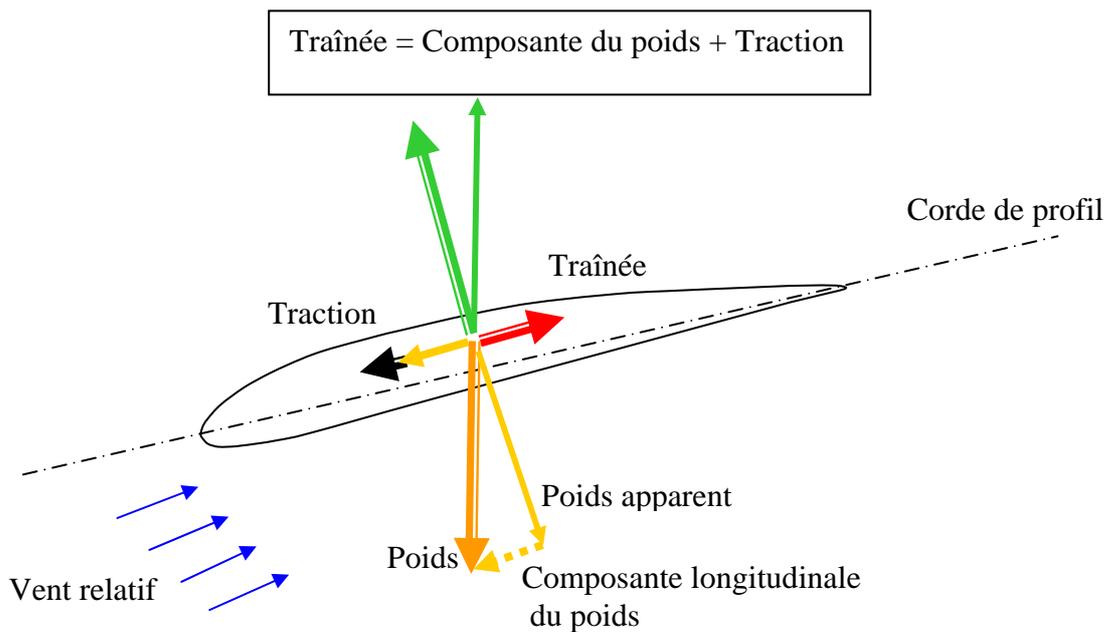
En montée

En montée, la traction doit augmenter pour compenser l'augmentation de traînée liée à la composante longitudinale du poids



En descente

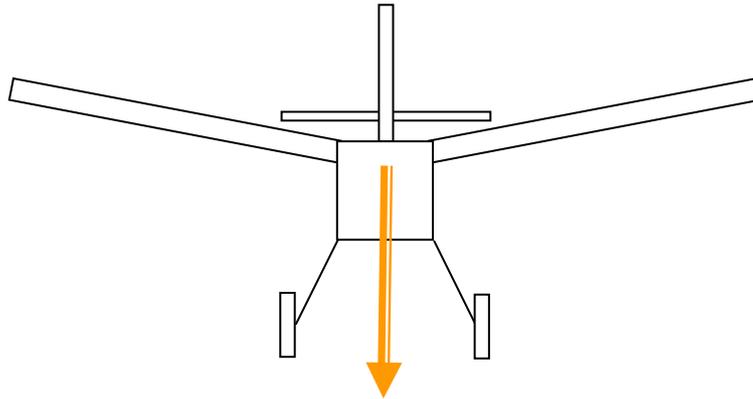
En descente, la traction doit diminuer pour compenser la composante longitudinale du poids qui entraîne l'avion en descente. Dans le cas d'un planeur, c'est cette composante qui donne l'énergie nécessaire pour obtenir la vitesse de vol.



LE FACTEUR DE CHARGE

Lorsqu'un modèle vole en ligne droite en palier, le poids qui s'exerce sur les ailes est égal au poids réel. Le rapport de ces deux forces est égal à un. Le poids apparent du modèle est égal à son poids réel. Le facteur de charge n est égal à un.

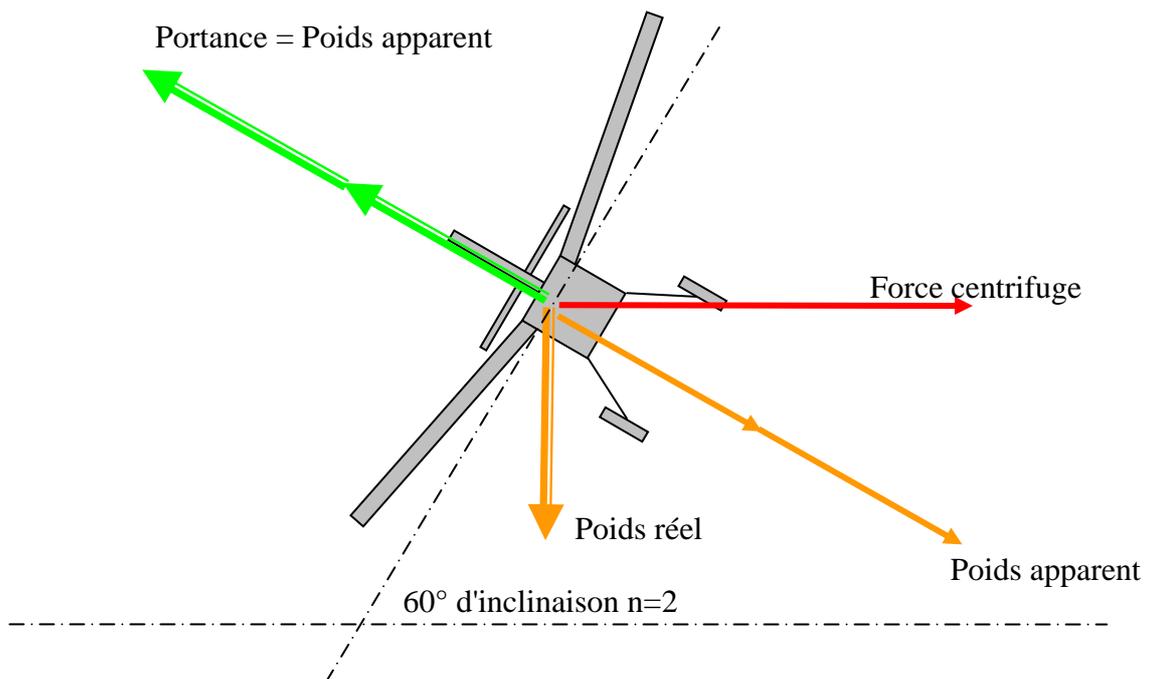
$$\text{Facteur de charge (n)} = \frac{\text{poids apparent}}{\text{poids réel}}$$



Poids apparent = poids réel
Facteur de charge $n = 1$

Facteur de charge en virage

En virage stabilisé, la combinaison des différentes forces qui s'exercent sur le modèle, fait apparaître un poids apparent plus important que le poids réel, ce qui augmente le facteur de charge.



La décomposition des forces exercées en virage, permet de tirer la loi suivante:

$$\begin{aligned}\cos(\text{inclinaison}) &= \text{poids réel} / \text{poids apparent} \\ \text{poids apparent} / \text{poids réel} &= 1 / \cos(\text{inclinaison})\end{aligned}$$

$$n = 1 / \cos(\text{inclinaison})$$

Si inclinaison = 60°

$$\cos 60 = \frac{1}{2}$$

$$1 / \frac{1}{2} = 2$$

$$n = 2$$

Les conséquences sur le vol

Pour maintenir l'équilibre portance / poids apparent, il est nécessaire d'augmenter la vitesse ou l'incidence. Si cette situation intervient au cours du dernier virage, donc à basse vitesse, l'augmentation d'incidence conduira au décrochage.

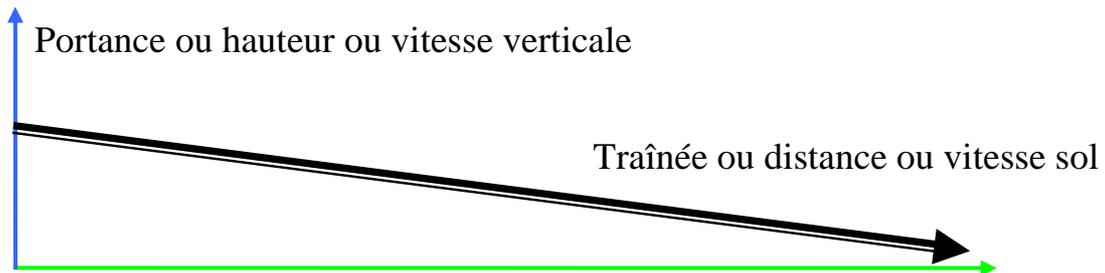
LA FINESSE

Le terme de finesse n'a rien à voir avec l'aspect de l'aéronef. Un gros B747 a plus de finesse que bon nombre de modèles réduits.

La finesse caractérise le rapport portance / traînée. Mais, pour le modéliste, ces grandeurs sont difficilement quantifiables. On peut ramener cette expression de la finesse au rapport de la distance parcourue en fonction du dénivelé. Un planeur qui traverse les 100m d'un terrain de football après un lancé à la main qui l'a monté aux alentours de 10m, a une finesse d'environ 10 (celle d'un B747 est proche de 20). Bien entendu cet exemple est réducteur car la finesse maximum ne peut être obtenue qu'à l'incidence de finesse max et donc avec une vitesse adaptée, ce qui n'est pas forcément le cas de chaque vol plané.

Attention: ne pas confondre la finesse d'un profil et la finesse d'un modèle. La traînée de l'ensemble de l'avion n'est pas la même que celle de l'aile seule!

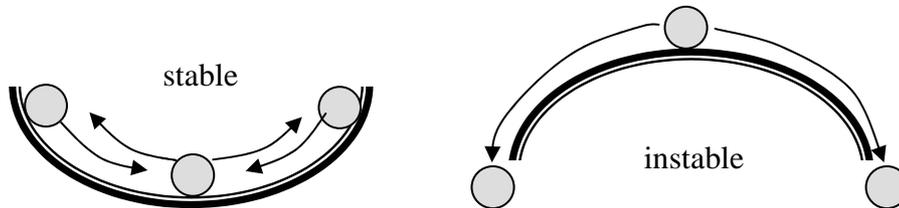
$$\begin{aligned} \text{finesse} &= \text{portance} / \text{traînée} \\ &= \text{distance} / \text{hauteur} \\ &= \text{vitesse sol} / \text{vitesse verticale} \end{aligned}$$



LA STABILITE

Le principe

Un système est stable lorsqu'il retrouve sa condition d'équilibre après une perturbation. Un avion est stable lorsqu'il reprend sa ligne vol après s'en être écarté.



Il faut distinguer deux stabilités: la stabilité longitudinale et la stabilité latérale.

La stabilité longitudinale:

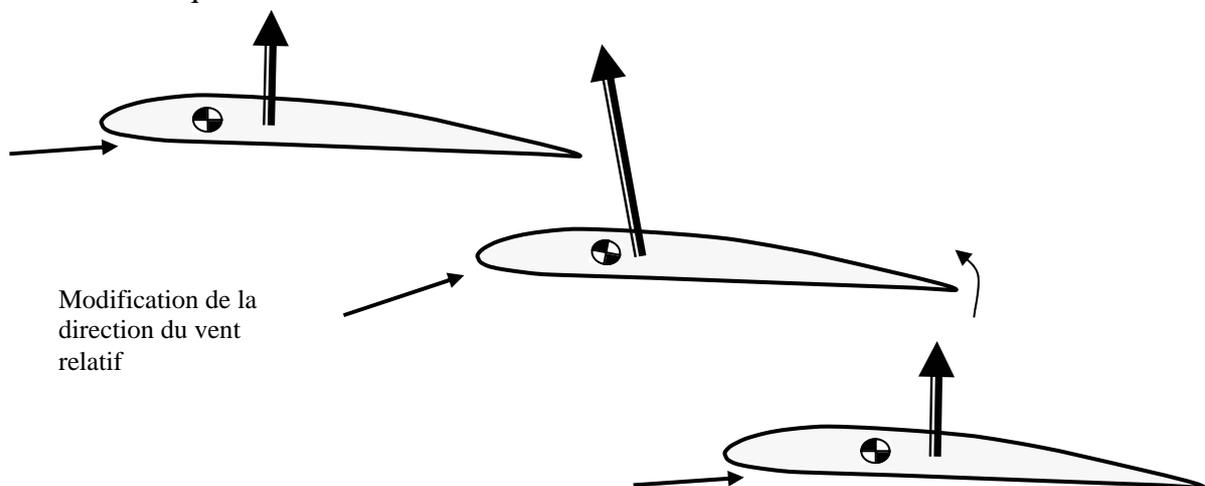
Le centrage

Lorsqu'un élément extérieur modifie la direction du vent relatif, la portance varie. Prenons l'exemple d'une augmentation:

- si la portance s'applique en avant du centre de gravité: son augmentation entraîne un couple qui augmente l'incidence, la portance augmente d'avantage. L'avion ne revient pas à sa position de départ: il n'est pas stable.
- si la portance s'applique en arrière du centre de gravité, son augmentation entraîne un couple qui diminue l'incidence, la portance diminue. L'avion revient à sa position de départ: il est stable.

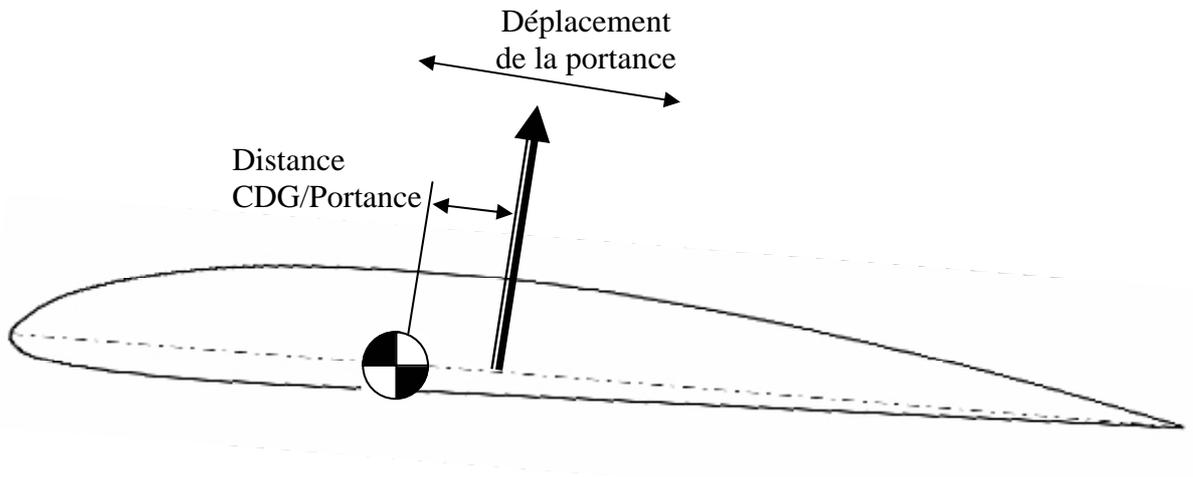
On voit qu'il faut donc que le centre gravité soit situé en avant du point d'application de la portance. Le centrage consiste à équilibrer l'avion pour que le centre de gravité se trouve à l'endroit souhaité. Pour les premiers essais, lorsque le centrage n'est pas connu grâce aux calculs, l'expérience le situe à environ 30% de la corde moyenne par rapport au bord d'attaque.

Un mauvais centrage trop arrière sera la cause d'une instabilité, un centrage trop avant sera la cause d'un manque de maniabilité.



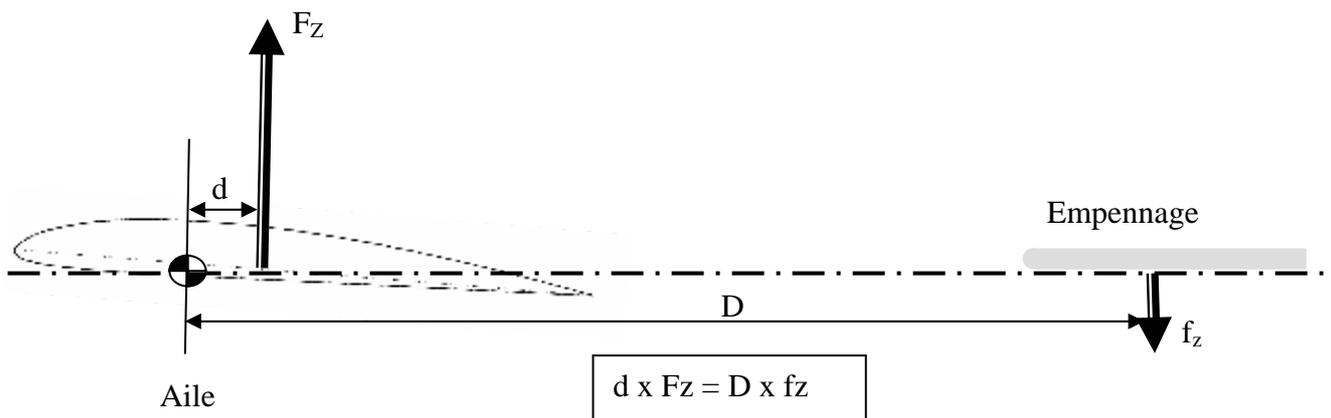
L'empennage horizontal

Une aile seule n'est pas stable. Pour le vérifier, il suffit de la lancer, elle ne planera pas mais tournera autour d'un axe parallèle à son envergure. Ceci est dû, entre autres, au point d'application de la portance (centre de poussée) qui ne se situe pas au même endroit que le centre de gravité (point d'application du poids), et qui avance lorsque l'incidence augmente.



Pour éviter un comportement identique lorsque cette aile est montée sur un avion, le fuselage est équipé d'un empennage horizontal. Le plus souvent, il est constitué d'un plan horizontal situé à l'arrière du modèle. Ce plan agit aérodynamiquement de la même façon qu'une aile; ils créent une portance et une traînée.

L'empennage horizontal crée une portance négative qui, compte tenu de la distance au centre de gravité, équilibre le couple créé par la portance de l'aile.



Le V longitudinal

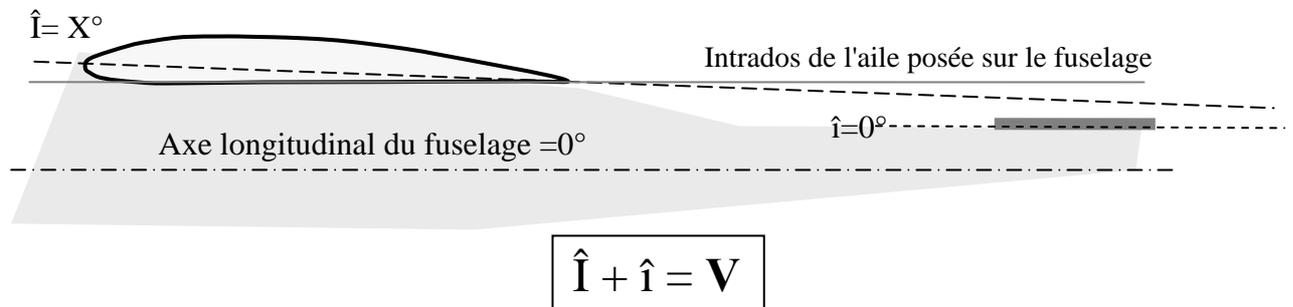
Pour que le vol s'effectue en palier à une vitesse donnée, les critères de stabilité sont respectés en plaçant, par construction, le centre de gravité en avant du point d'application de la portance. Cette distance crée un couple piqueur sur l'avion qui s'équilibre par une portance vers le bas produite par le plan horizontal.

L'angle que fait la corde de l'aile avec l'axe du fuselage est le calage. Ceci est également vrai pour l'angle que fait la corde de l'empennage horizontal avec l'axe du fuselage.

On constate qu'il existe un angle entre le calage de l'aile et le calage de l'empennage horizontal. C'est le V longitudinal.



Compte tenu des profils utilisés sur les avions de début et d'empennages dont le plan horizontal est souvent constitué d'une simple plaque, le V longitudinal est généralement obtenu en reposant l'aile sur le fuselage par son intrados et en alignant le plan horizontal avec l'axe du fuselage. Cette disposition simplifie la construction.



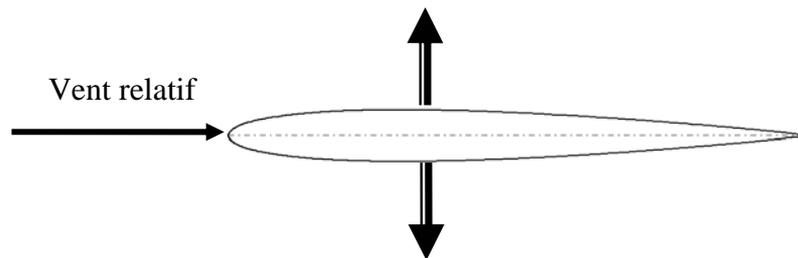
La stabilité latérale

La stabilité latérale est un vaste sujet car, en plus d'une stabilité de route, il est nécessaire de maintenir une stabilité en inclinaison et une symétrie de l'écoulement aérodynamique sur l'ensemble de l'avion. Les deux dispositifs principaux sont la dérive et l'angle de dièdre. Dans le cadre restreint de ce livret d'initiation, leurs fonctionnements, seront abordés d'une façon simplifiée. Pour approfondir les connaissances, consulter le livre « initiation aéronautique »

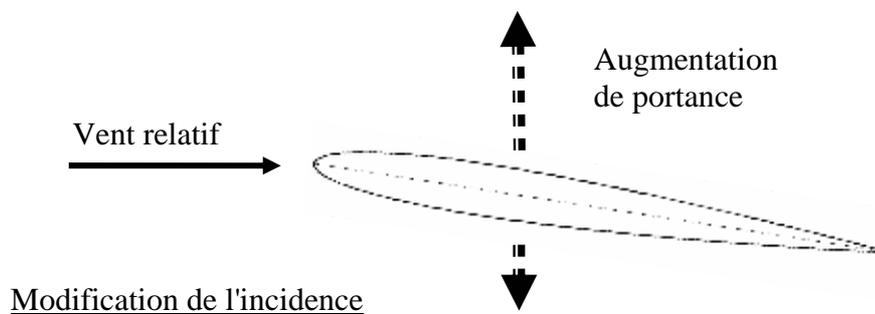
La dérive

L'empennage vertical est comparable à la dérive d'un bateau, c'est d'ailleurs le nom qui lui est donné. Elle permet de conserver sa route malgré les perturbations extérieures et de maintenir un écoulement symétrique sur l'ensemble du modèle.

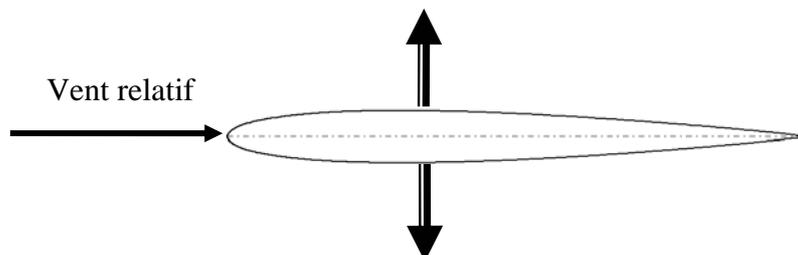
Lorsque le modèle se déplace, le vent relatif crée une portance identique de chaque côté de l'empennage vertical.



- Si, en raison d'une perturbation momentanée, le modèle pivote autour de son axe de lacet (tout en maintenant sa trajectoire grâce à son inertie), l'angle par rapport au vent relatif varie, provoquant une modification de l'incidence et une différence de portance.

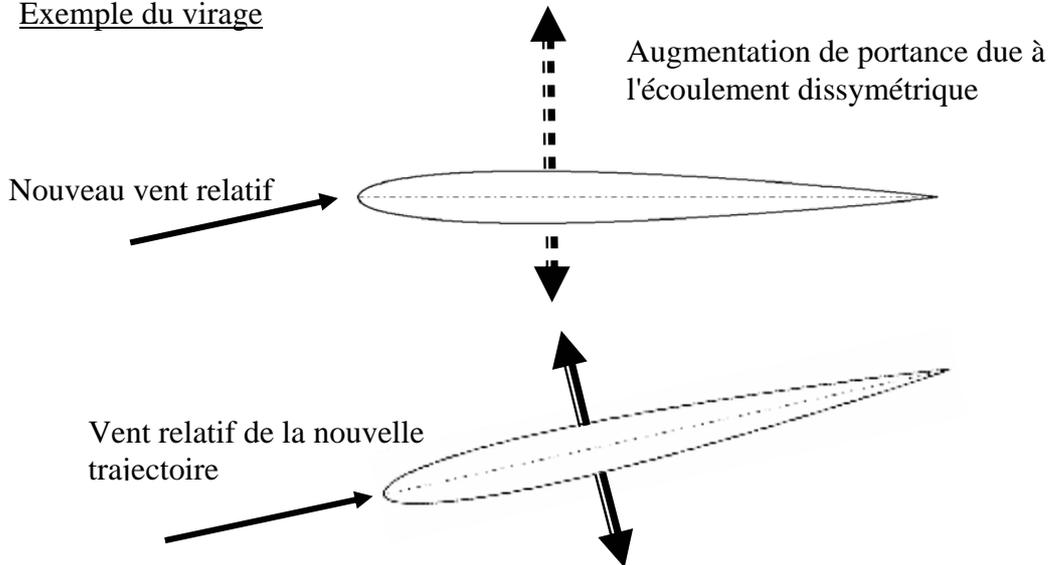


L'augmentation de portance d'un côté de la dérive ramène le modèle sur son axe, permettant de retrouver un écoulement symétrique.



- Si la dissymétrie est due à un phénomène établi (mise en virage, vent de travers ...) la dérive permet de maintenir un écoulement symétrique.

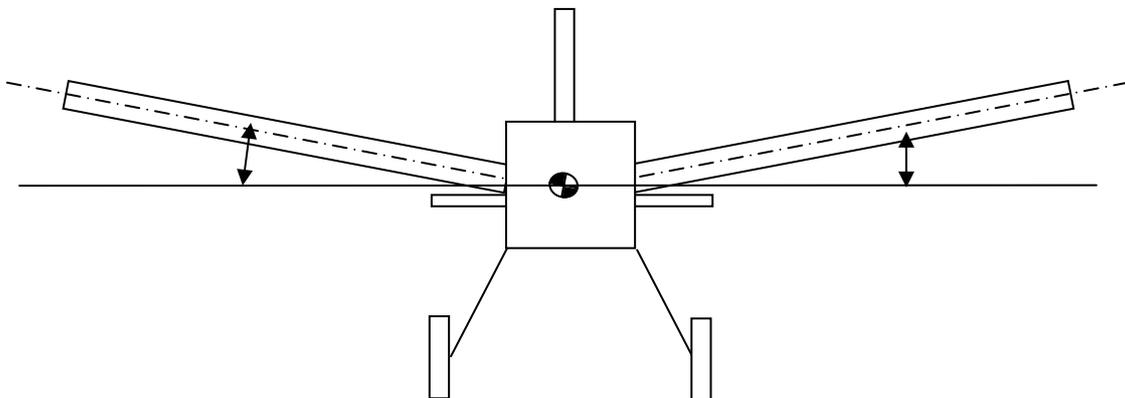
Exemple du virage



L'angle de dièdre

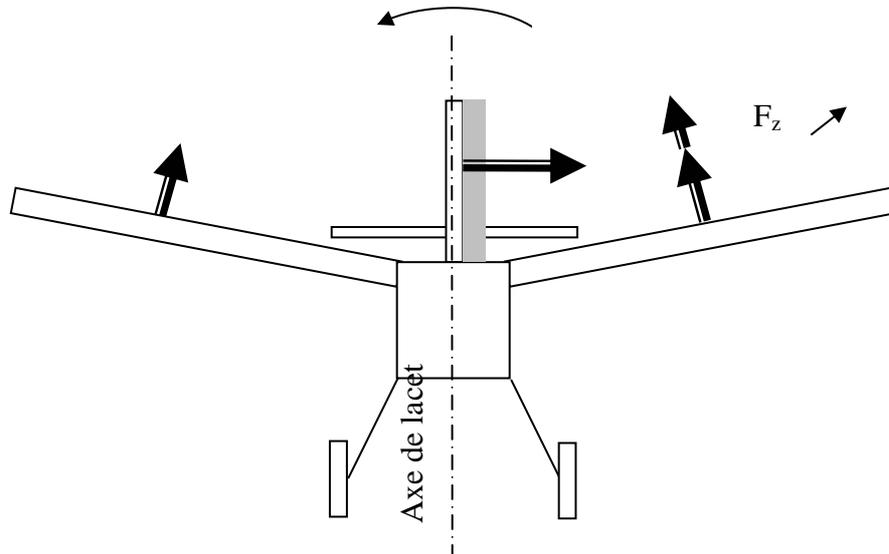
C'est l'angle formé entre chaque demie-aile et l'horizontale. Ce dièdre agit de différentes façons sur le modèle.

Sur un avion sans aileron, dièdre 5° à 8°



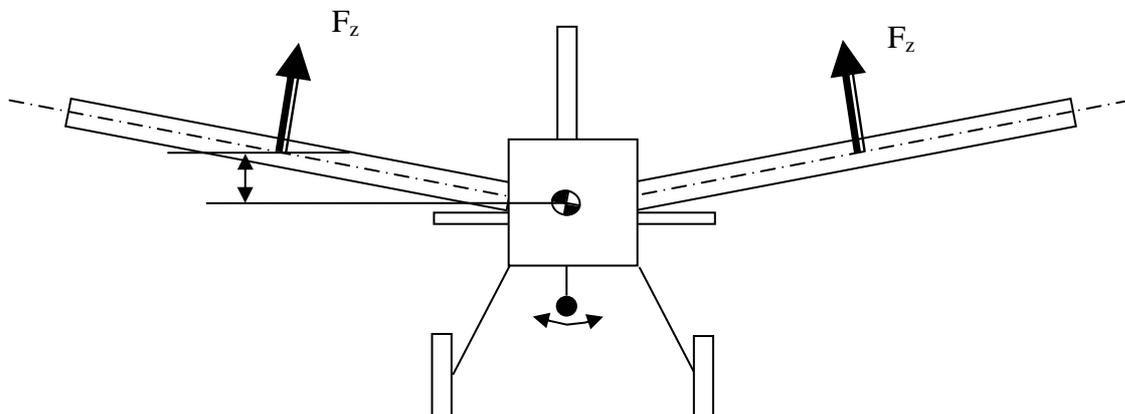
Roulis induit

Lorsque la gouverne de direction crée un mouvement de rotation du fuselage autour de l'axe de lacet (axe vertical passant par le centre de gravité), l'angle de dièdre favorise l'augmentation de portance de l'aile extérieure au virage, ce qui induit du roulis et provoque l'inclinaison. Sur un modèle non équipé d'aileron, ceci est indispensable pour virer.

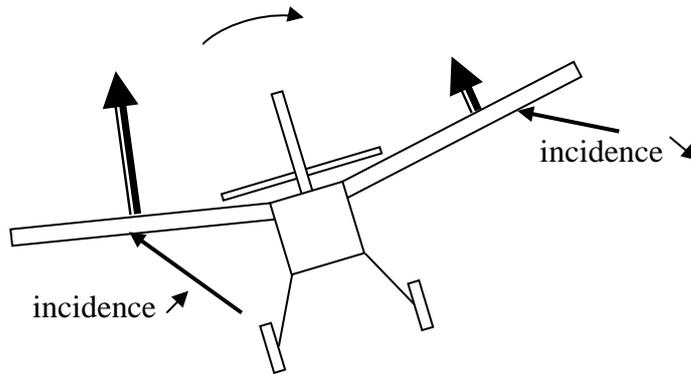


Effets stabilisateur

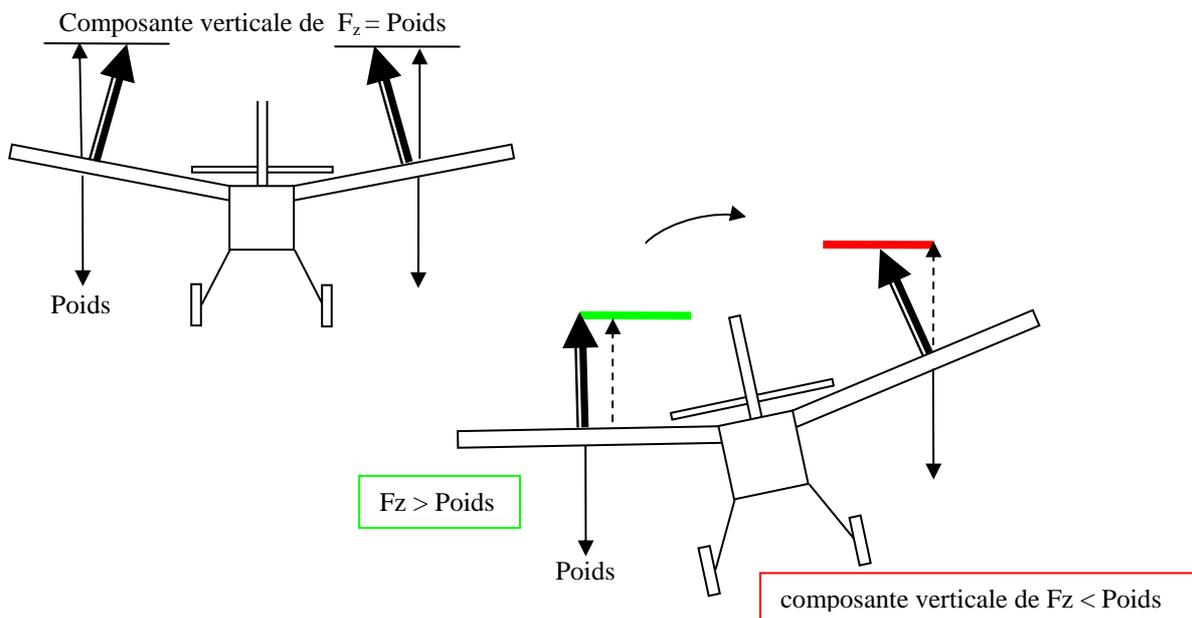
- du fait du dièdre, le fuselage est plus bas que le point d'application de la portance sur chaque demi aile. Ainsi le centre de gravité est descendu et l'avion se comporte comme un pendule, ce qui le rend plus stable en roulis (inclinaison droite/gauche).



- lorsque le modèle subit une perturbation qui l'incline, l'angle de dièdre provoque une différence d'incidence entre les deux demi-ailes qui modifie la répartition de portance et ramène l'avion en position ailes horizontales.



- la portance étant perpendiculaire au plan de l'aile, c'est sa composante verticale qui s'oppose au poids. Lorsque le modèle s'incline, tout étant supposé identique par ailleurs, du fait du dièdre, la composante verticale de la portance n'est plus identique sur les deux demi-ailes et favorise le retour à la position initiale.

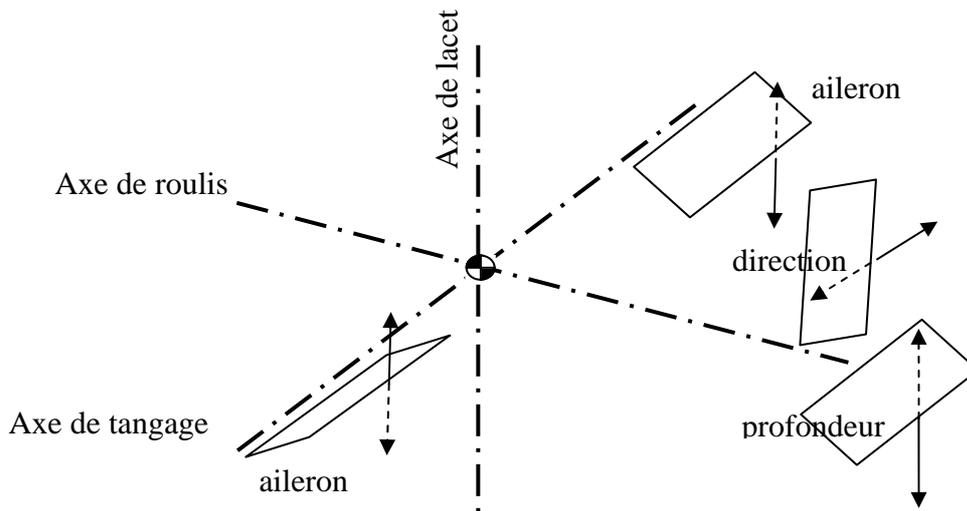


LES GOUVERNES

Les axes de référence

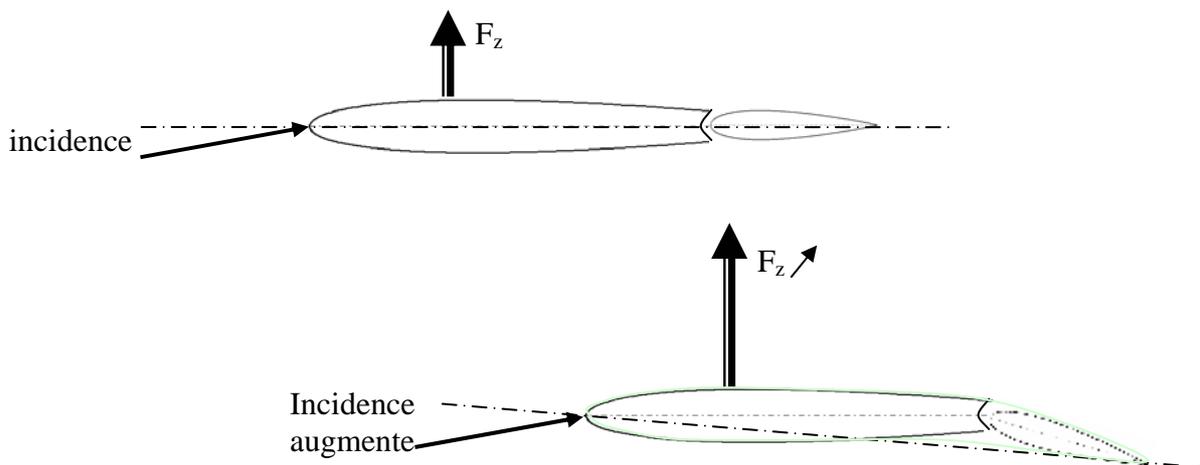
Pour piloter un modèle, on agit sur des surfaces mobiles: les gouvernes. Ces gouvernes font évoluer le modèle autour de 3 axes:

- l'axe longitudinal : l'axe de roulis
- l'axe vertical passant par le centre de gravité : l'axe de lacet
- l'axe parallèle à l'envergure : l'axe de tangage



Le fonctionnement

La déflexion de la gouverne crée une modification de la forme du profil ce qui fait varier la portance du côté opposé au braquage. L'équilibre longitudinal est modifié



La profondeur

La gouverne de profondeur est articulée sur le bord de fuite de l'empennage horizontal. Cette gouverne est utilisée pour monter ou descendre.

La déflexion de la gouverne modifie la répartition de portance sur l'empennage, ce qui entraîne une modification de l'incidence de l'aile et provoque une variation de trajectoire.

La direction

Sur le bord de fuite de la dérive est montée la gouverne de direction. C'est le nom couramment utilisé, même si on devrait plutôt l'appeler gouverne de symétrie compte tenu de sa fonction. En effet, si le modèle n'est pas équipé d'aileron, l'action de la gouverne de direction provoque la dissymétrie de l'écoulement aérodynamique nécessaire à la mise en virage puis à son maintien. Si le modèle est équipé d'ailerons le braquage de la gouverne rétablit un écoulement symétrique lorsque l'inclinaison provoque le virage.

Le mode de fonctionnement de la gouverne de direction est le même que celui de la gouverne de profondeur. La déflexion entraîne une variation de portance sur la dérive ce qui modifie l'équilibre latéral.

Le gauchissement

Les ailerons sont articulés sur le bord de fuite de l'aile. Ces gouvernes sont utilisées pour s'incliner à droite ou à gauche. Là aussi le principe est de modifier la forme du profil pour modifier la portance.

Sur les modèles réduits, on trouve deux types d'ailerons:

- les ailerons montés sur une portion du bord de fuite de l'aile et manœuvrés soit par une timonerie complexe, soit chacun par un servo-moteur
- les ailerons fullspan, ce qui se traduit par "sur toute l'envergure". Cette disposition simplifie le montage car un seul servo-moteur monté au centre de l'aile permet de les manœuvrer avec une commande courte et simple.

LIST DES MISES A JOUR

Date: 13/07/05

Précision mineur/correction

Page 9

Addition de chapitre

Facteur de charge

Refonte de chapitre:

L'aile

Stabilité