



Théorie vol à voile

80 Principes de vol

Aérodynamique

et

Mécanique du vol

Cours pour élèves pilotes de vol à voile

Auteur : Eric Lindemann

Edition 2, Janvier 2011

ERIC LINDEMANN



Eric Lindemann, dans son IS28

Né en 1943, l'auteur a d'abord une formation d'ingénieur mécanicien puis un Diplôme de physicien en astrophysique à l'Université de Genève. Après une période durant laquelle il se partage entre un enseignement d'aérotechnique à l'Ecole d'Ingénieurs et de la recherche à l'Observatoire de Genève, il travaille dans le domaine de la pollution atmosphérique pour un bureau d'ingénieur. Il enseigne ensuite la physique au Gymnase, à Lausanne puis à Nyon. Lors de sa retraite, prise en 2005, il s'occupe de mettre sur pied des travaux pratiques d'astronomie pour des jeunes à l'Observatoire de St-Luc (OFXB).

Moniteur de vol à voile depuis 1968, il est aussi expert à l'OFAC pour les examens de pilote de planeur ; il est toujours actif en 2011.

Préambule

Ce fascicule de *Principes de vol* est le fruit d'un long travail qui s'inscrit dans un vaste projet d'élaboration de matériel pédagogique mené par la Fédération Suisse de Vol à Voile (FSVV).

Loin d'être parfait, ce petit manuel est là surtout pour rendre service; tant aux élèves, qu'aux moniteurs qui enseignent cette branche. Grand merci de me signaler les fautes et coquilles que vous repérerez très probablement (mon e-mail: lindem@bluewin.ch).

J'ai tenté de mettre tout ce que les questionnaires OFAC peuvent demander et je crois être resté au plus près de ce qui est abordé lors des examens. Ce fascicule contient pourtant un peu plus de matière car il ne s'agit pas seulement de réussir l'examen officiel, mais aussi de bien comprendre pourquoi et comment on vole. Qu'on se rassure cependant, il n'est pas nécessaire de savoir manipuler des formules pour passer l'examen, ni même pour apprendre à piloter !

Les choses à savoir absolument ont été signalées en fin de chaque chapitre.

Les recouvrements et les répétitions avec d'autres branches théoriques sont nombreux (mais la pédagogie n'est-elle pas faite aussi de répétitions?). Ces liens sont le plus souvent signalés.

Bonne lecture et bonne chance aux élèves pilotes vélivoles qui s'embarquent dans cette belle aventure dont les à-côtés théoriques, contrairement à leur mauvaise réputation, ne sont pas si insurmontables et rébarbatifs qu'ils en ont l'air !

Eric Lindemann

Arzier, janvier 2004

L'édition 2 de janvier 2011 se distingue de la première version par des corrections et améliorations proposées par l'auteur.

Table des matières

Chapitre 1 : La Terre et l'atmosphère	9
1.1. La Terre:	9
1.1.1. Taille et masse:.....	9
1.1.2. Accélération de la pesanteur:	9
1.2. L'atmosphère:.....	9
1.2.1. Composition et grandeurs caractéristiques:	9
1.2.2. Atmosphère standard:	12
Chapitre 2 : Lois des écoulements et vitesses.....	13
2.1. Lois des écoulements:.....	13
2.1.1. Loi de continuité :.....	13
2.1.2. Loi de Bernoulli:	13
2.2. Vitesses :.....	15
2.2.1. Mesure de la vitesse :.....	15
2.2.2. Vitesse indiquée (IAS), vitesse vraie (TAS) et vitesse sol (GS):	16
Chapitre 3 : Les forces aérodynamiques	19
3.1. La résistance de l'air (traînée):.....	19
3.1.1. De quoi elle dépend:.....	19
3.1.2. Aspect quantitatif:	19
3.2. La force de sustentation (portance):.....	21
3.2.1. Effet de l'angle d'attaque:	21
3.2.2. Effet du profil:.....	21
3.2.3. Portance de profil:.....	22
Chapitre 4 : La résultante aérodynamique	25
4.1. Sa constitution et son point d'application:	25
4.2. Contribution des forces de pression:	26
4.3. Contribution des forces de frottement:	27
5.1. Causes et conséquences:	31
5.2. Influence de la géométrie de l'aile:	32
5.2.1. Effet d'allongement:	32
5.2.2. Effet de forme en plan de l'aile:	33
5.3. Dispositifs particuliers:	33
5.3.1. Formes en bout d'aile :	33
5.3.2. Vrillage de l'aile:	34
Chapitre 6 : Le vol rectiligne	39
6.1. Les lois du mouvement:.....	39
6.1.1. Enoncés des lois:.....	39
6.1.2. Exemples:	39
6.2. Le vol horizontal rectiligne et uniforme:	40
6.3. Le vol plané stabilisé :	41
6.3.1. Equilibre des forces :	41
6.3.2. La polaire des vitesses:	42

Chapitre 7 : Le vol non rectiligne.....	45
7.1. Le vol en virage:	45
7.1.1. Principes mécaniques du mouvement circulaire:.....	45
7.1.2. Forces sur l'avion en virage horizontal uniforme:	45
7.2. Le facteur de charge:.....	46
7.2.1. En virage:.....	46
7.2.2. En ressource:.....	47
7.3. Polaires en virage et polaires en spirale:.....	48
Chapitre 8 : Décrochages et vrille	51
8.1. Décrochage:	51
8.1.1. Vol aux grands angles	51
8.1.2. Décrochage en vol cabré (stall) :	51
8.1.3. Décrochage dynamique :	52
8.2. La vrille (autorotation):.....	53
Chapitre 9 : Les gouvernes	55
9.1. Définitions des axes et gouvernes de l'avion:.....	55
9.2. Principe d'action des gouvernes:.....	55
9.3. Compensation:	56
9.3.1. Compensation aérodynamique:.....	56
9.3.2. Compensation mécanique:	58
9.4. Equilibrage (trim):	58
9.5. Commandes secondaires:	59
9.5.1. Volets de courbure (planeurs):.....	59
9.5.2. Dispositifs hypersustentateurs (avions):	61
9.5.3. Aérofreins (AF) :	63
9.6.1. Lacet inverse:.....	64
9.6.2. Roulis induit:	64
9.6.3. Lacet induit:.....	64
Chapitre 10 : Stabilité	65
10.1. Principes et définitions:.....	65
10.2. Stabilité de tangage (longitudinale):	66
10.3. Stabilité de roulis (latérale):	67
10.4. Stabilité de lacet (directionnelle ou de route):	69
Chapitre 11 : Notions sur l'hélice.....	71
11.1. Principes et définitions:.....	71
11.2. Performances:	73

1^{ère} Partie: Aérodynamique

Chapitre 1 : La Terre et l'atmosphère

1.1. La Terre:

1.1.1. Taille et masse:

Située à 150 millions de km du Soleil, la Terre a une forme presque sphérique d'environ 6'400 km de rayon, ce qui lui donne une circonférence de 40'200 km.

En fait elle est légèrement aplatie aux pôles puisque son rayon polaire vaut de 6'357 km et son rayon équatorial de 6'371 km.

Le mile nautique (Nautical Mile) est défini comme le 60^{ème} partie de la longueur d'un degré de latitude sur un méridien: 1 NM = 1,852 km.

Voir aussi : Navigation

La masse totale de la Terre est de $6,0 \times 10^{24}$ kg et sa masse volumique (densité) moyenne vaut: 5'520 kg/m³.

1.1.2. Accélération de la pesanteur:

La masse de la Terre crée, dans l'espace tout autour d'elle, un champ de gravitation qui agit sur toute masse située dans ce champ. Cette action est la force de pesanteur ou poids.

La mesure du champ de gravitation est donnée par l'accélération qu'il crée. Sous nos latitudes, au niveau de la mer, l'accélération de la pesanteur a une valeur de 9,8 m/s², ce qui signifie qu'un corps livré à lui même voit, dans sa chute, sa vitesse augmenter de 9,8 m/s chaque seconde (en chute libre, c'est-à-dire si le milieu n'oppose aucune résistance).

1.2. L'atmosphère:

1.2.1. Composition et grandeurs caractéristiques:

Composition chimique:

La très fine couche d'air qui entoure la Terre a, en volume, la composition chimique suivante :

- 78% d'azote (N₂)
- 21% d'oxygène (O₂)
- 1% de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone (CO₂) et de gaz rares.

Voir aussi : Performances humaines + météorologie

Température:

La température d'un gaz est une sorte de mesure de l'agitation des molécules qui le constituent.

La température standard au niveau de la mer est de **15°C**; elle décroît ensuite linéairement avec l'altitude (en moyenne de 0,65°C par 100 m ou de 2°C par 1'000 ft) jusqu'à la tropopause, c'est-à-dire à environ 10 km d'altitude.

Pression:

La pression d'un gaz est l'effet de tous les chocs des molécules du gaz contre une surface. La pression est une force par unité de surface :

$$\text{Pression} = \frac{\text{Force}}{\text{Surface}}$$

$$p = \frac{F}{S}$$

Elle s'exprime donc en N/m² (Newton par mètre carré, appelé Pascal noté Pa). En météorologie on utilise l'hectopascal hPa (100 Pa). Autrefois : le millibar (mb) ; avec la correspondance : 1mb = 1hPa.

La pression atmosphérique peut être vue comme le poids de toute une colonne d'air atmosphérique sur une surface unité, elle se mesure à l'aide des baromètres:

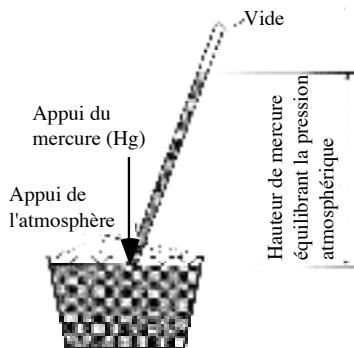


Fig. 1: Baromètre à mercure

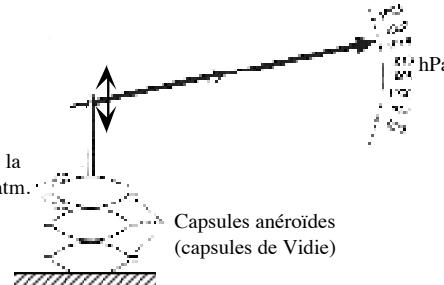


Fig. 2: Baromètre anéroïde

La pression de la colonne de mercure (Hg) est en équilibre avec celle de la colonne d'air atmosphérique.

Les capsules anéroïdes étanches vont se dilater ou se contracter si la pression atmosphérique baisse ou augmente.

La pression atmosphérique standard vaut **1013,25 hPa** c'est une valeur moyenne pour la pression au niveau de la mer.

Le baromètre à mercure montre pourquoi on employait aussi des millimètres ou des inches de colonne de mercure pour mesurer la pression atmosphérique:

Correspondances : **1013,25 hPa = 760 mm Hg = 29,92 inches Hg**

La pression atmosphérique décroît exponentiellement lorsque l'altitude croît, de telle sorte que chaque fois que l'on s'élève de 5'500 m, la pression est diminuée de moitié.

masse volumique :

La masse volumique ρ (rô) d'un corps est le rapport entre la quantité de matière et la quantité d'espace qu'il occupe. Elle s'exprime en kg/m^3 .

$$\text{masse volumique} = \frac{\text{masse}}{\text{volume}}$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

L'eau a par exemple une masse volumique de $1'000 \text{ kg/m}^3$, alors que celle du mercure vaut $13'600 \text{ kg/m}^3$. L'air, aux conditions standard, a une masse volumique de $1,2 \text{ kg/m}^3$.

Comme les anglo-saxons utilisent le terme « density » pour la masse volumique, cette dernière est souvent appelée abusivement densité. En fait la densité d'un corps solide ou liquide est le rapport de sa masse volumique avec la masse volumique de l'eau (pour les gaz, avec la masse volumique de l'air aux conditions STD). La densité s'exprime donc sans unité. Ainsi la densité de l'eau vaut 1, celle du mercure 13,6.

Avec la *loi des gaz parfaits* on peut déduire la masse volumique (densité) de l'air à partir de sa température et de sa pression.

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}$$

avec: p: pression atmosphérique en Pa.

R: constante des gaz ($R = 287 \text{ J/Kg} \text{ } ^\circ\text{K}$)

T: température en $^\circ\text{K}$ (Kelvin), $T(^\circ\text{K}) = T(^\circ\text{C}) + 273,15$

Dans la basse atmosphère, la masse volumique de l'air décroît avec l'altitude de façon à être diminuée de moitié lorsqu'on s'élève d'environ 6'600 mètres.

Voir aussi : Météorologie

1.2.2. Atmosphère standard:

Pour avoir une référence, on définit en aéronautique une atmosphère normalisée, l'atmosphère standard OACI:

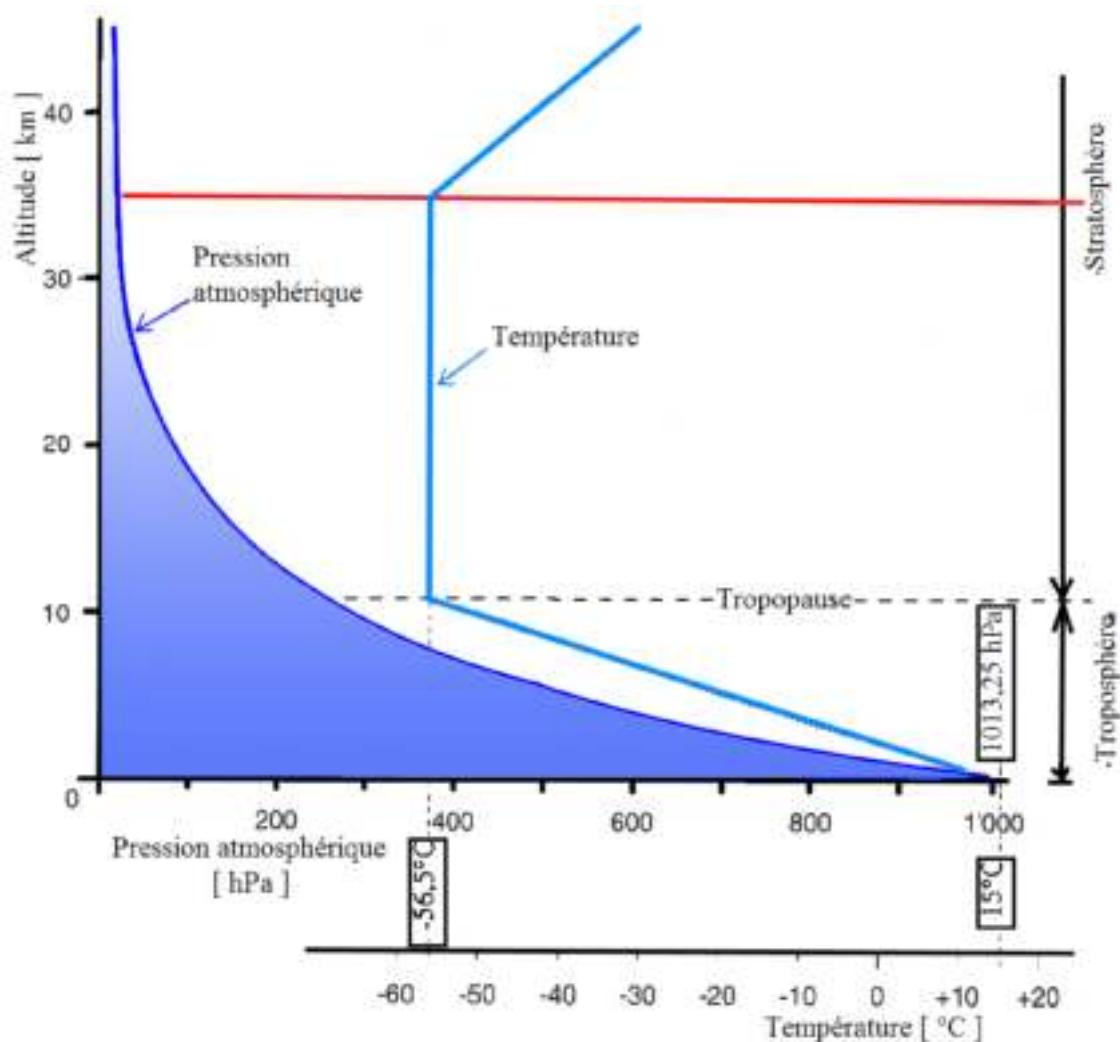


Fig 3: Profil de la température et de la pression dans l'atmosphère standard OACI

Cette atmosphère normalisée sert à l'étalonnage des altimètres et à leur réglage (altimétrie).

Voir aussi : Météorologie et Connaissance des aéronefs

A savoir:

- Aucune formule !
- Circonférence terrestre (approximativement).
- Accélération de la pesanteur.
- Composition chimique de l'atmosphère.
- Valeur de pression et température de l'atmosphère standard à l'altitude 0.
- Décroissance pression avec altitude.
- Décroissance densité avec altitude

Chapitre 2 : Lois des écoulements et vitesses

2.1. Lois des écoulements:

2.1.1. Loi de continuité :

Tant qu'on reste largement au-dessous de la vitesse du son, les écoulements d'air peuvent toujours être considérés comme incompressibles (aérodynamique subsonique).

Or, dans un écoulement de fluide incompressible, le débit volume (produit de la section S par la vitesse V et exprimé en m^3/s) est le même dans toutes les sections de l'écoulement :

$$V \cdot S = \text{constante}$$

Dans la figure 1 on aurait par exemple $1 \text{ m}^3/\text{s}$ dans toutes les sections. Admettons que la section 1 fait 1 m^2 , la vitesse y vaut donc 1 m/s . Si la section 2 ne mesure que $0,5 \text{ m}^2$, alors la vitesse doit y être de 2 m/s . De même, si la section 4 mesure 2 m^2 , alors la vitesse y est de $0,5 \text{ m/s}$.

Cela signifie que la vitesse est inversement proportionnelle à la section (*loi de continuité*).

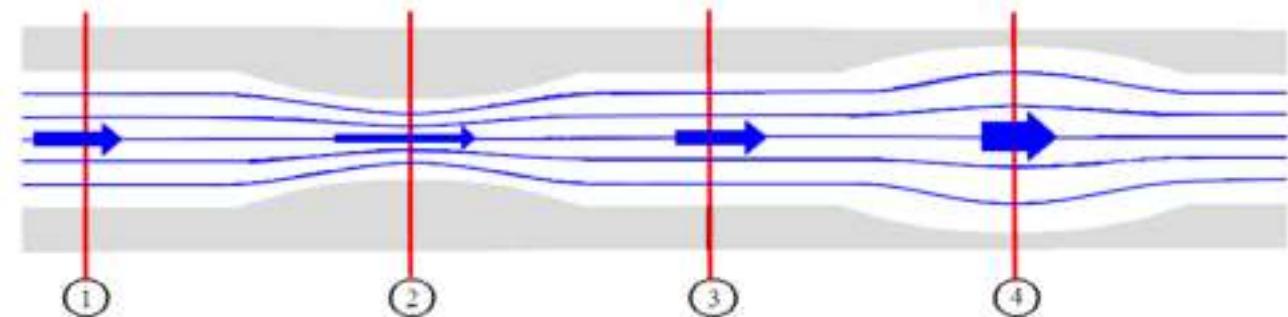


Fig. 1: Loi de continuité dans un écoulement incompressible

Exemple : à une petite section S_2 correspond une grande vitesse V_2 tandis qu'à une grande section S_4 correspond une petite vitesse V_4 .

2.1.2. Loi de Bernoulli:

Si l'on place, comme dans la figure 2, des manomètres mesurant la pression statique aux différentes sections de l'écoulement, ils donnent des valeurs qui varient à l'inverse des vitesses.

A une grande vitesse correspond une petite pression et à une petite vitesse une grande pression (*loi de Bernoulli simplifiée*).

On voit dans cette figure que, puisque dans la section 2 la vitesse est plus grande qu'en section 1, on aura une pression statique plus petite que la pression statique en section 1.

Dans la section 4 la vitesse est plus petite qu'en section 3 , ce qui donnera une pression statique plus grande.

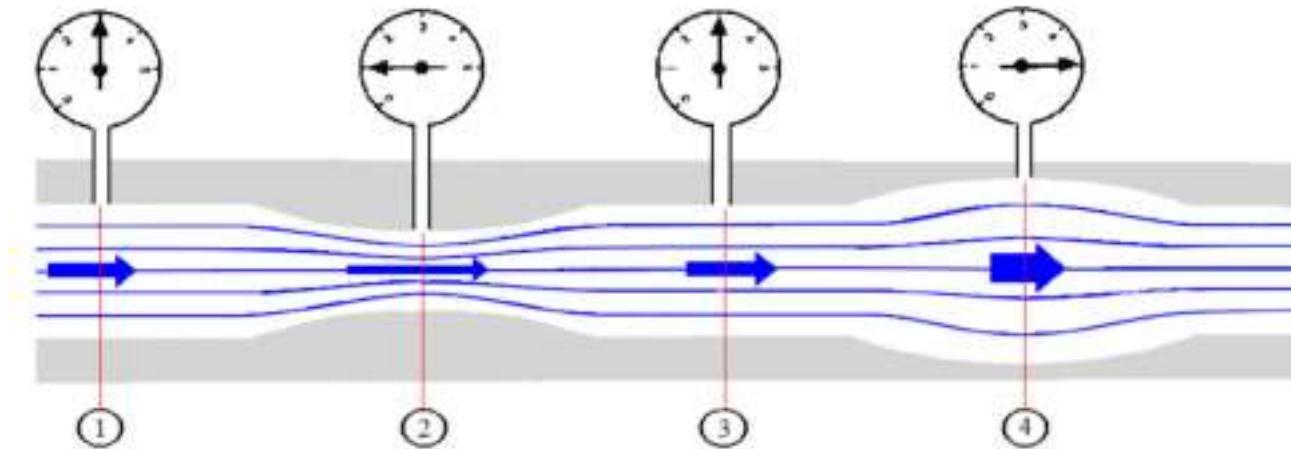


Fig. 2: Loi de Bernoulli dans un écoulement incompressible

Exemple : à une petite vitesse V_1 correspond une grande pression statique p_1 tandis qu'à une grande vitesse V_2 correspond une petite pression statique p_2 .

Application : écoulement autour d'un profil

Lorsqu'un écoulement passe autour d'un profil d'aile dissymétrique, il doit, selon la loi de continuité, s'accélérer sur la face supérieure du profil. Et, selon la loi de Bernoulli, il va se créer une diminution de pression statique. C'est-à-dire une zone de pression plus basse que la pression environnante; ce phénomène crée une force de sustentation représentant une partie de la portance.

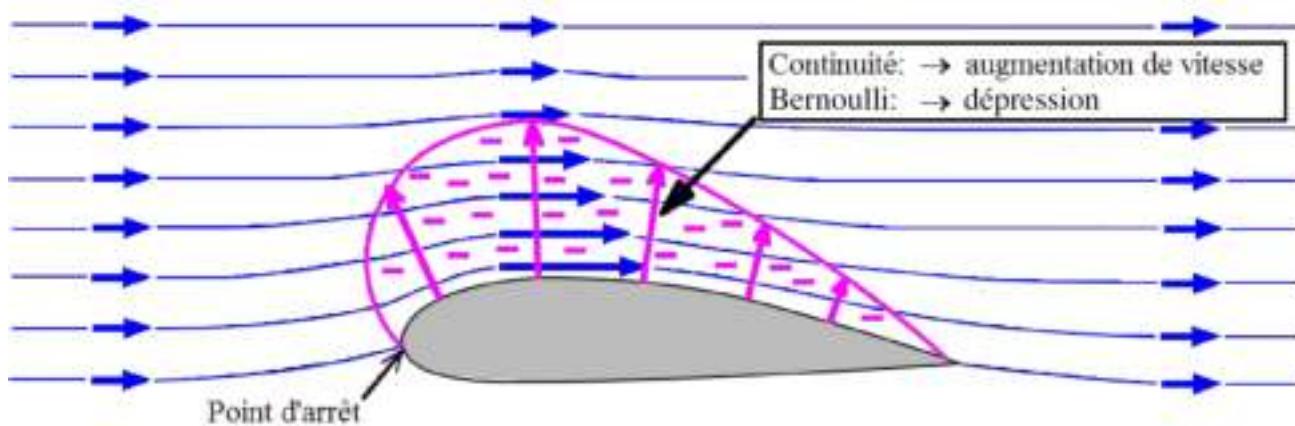


Fig. 3: Applications des lois de l'écoulement à l'aile

Les lois de continuité et de Bernoulli expliquent une part de la force de la portance créée par un profil d'aile.

Voir aussi : Météorologie

La loi de Bernoulli est une façon d'exprimer, en termes de pressions, le principe de la conservation de l'énergie dans un écoulement.

De manière plus rigoureuse, on dit que la pression totale est constante dans un écoulement. Cette pression totale nommée H est la somme de la pression statique p et de la pression dynamique nommée q :

$$H = p + q$$

La pression dynamique dépend du carré de la vitesse ainsi que de la masse volumique de l'air :

$$q = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2$$

On peut donc comprendre que si l'une des deux pressions augmente (la dynamique q par exemple, à cause d'une augmentation de vitesse), l'autre doit diminuer pour assurer la conservation de la pression totale.

[Voir aussi : Connaissance générale des aéronefs](#)

2.2. Vitesses :

2.2.1. Mesure de la vitesse :

Quand on parle de vitesse, il s'agit toujours d'une *vitesse relative* entre l'écoulement de l'air et l'aéronef. Il n'y a pas de différence entre la vitesse du vent sur un avion arrêté, et la vitesse d'un avion dans de l'air immobile.

Pour obtenir cette vitesse, voir figure 4, on mesure la pression dynamique en faisant la différence entre la pression totale et la pression statique. La pression totale est obtenue par une prise de pression située face à l'écoulement (dans le nez d'un planeur ou avec un **tube Pitot** sous l'aile d'un avion) et la pression statique par une prise de pression le long du fuselage ou autour du tube Pitot lui-même qui s'appelle alors un **tube de Prandtl**.

L'instrument affiche en fait une pression dynamique qu'on gradue en vitesses (par exemple en km/h dans les planeurs) pour une masse volumique ρ_0 donnée par l'atmosphère standard au niveau de la mer.

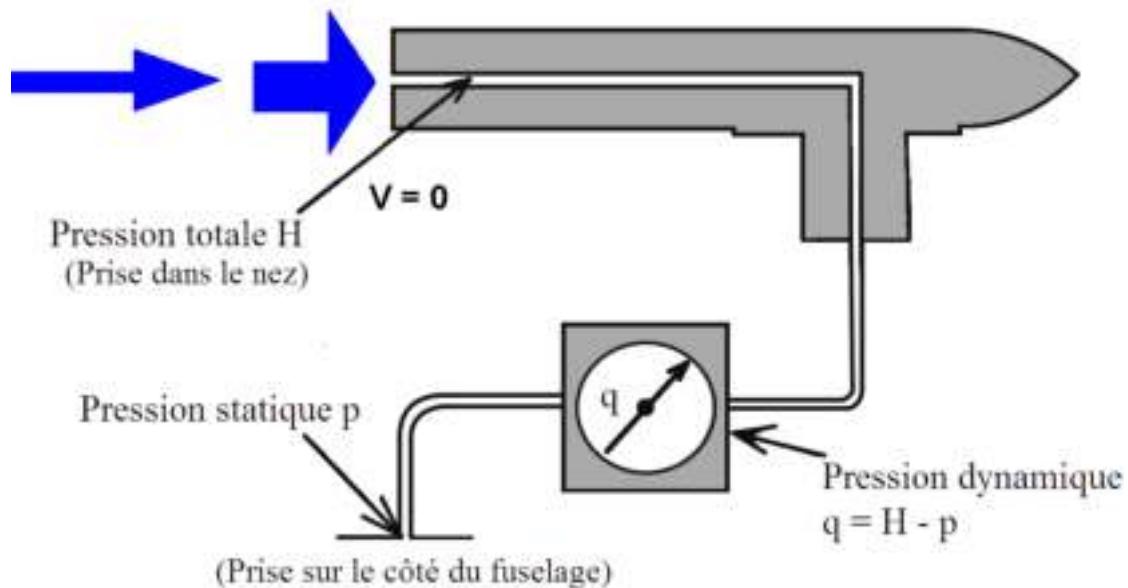


Fig. 4: Schéma d'un indicateur de vitesse (Badin)

Le tube Pitot mesure la pression totale H , une prise donne la pression statique p et l'instrument fait la différence qui est la pression dynamique q . Celle-ci est graduée en unités de vitesse (en km/h dans les planeurs).

Voir aussi : Connaissance générale des aéronefs

2.2.2. Vitesse indiquée (IAS), vitesse vraie (TAS) et vitesse sol (GS):

La vitesse lue sur l'indicateur de vitesse (ASI) donne une valeur qu'on appelle *la vitesse indiquée IAS* (Indicated Air Speed). La valeur de l'IAS est entachée d'erreurs :

- erreurs instrumentales,
- erreurs de position (par exemple dérapage),
- erreur de densité de l'air.

L'erreur de densité devient importante en altitude. En effet, lorsqu'on s'élève la densité de l'air ρ est toujours plus petite relativement à la densité au niveau de la mer ρ_0 pour laquelle l'instrument est gradué. Une mesure de la pression dynamique donnera alors une valeur trop petite de la vitesse.

Lorsqu'on s'élève en altitude, la vitesse indiquée devient donc toujours plus petite par rapport à *la vitesse vraie* (ou TAS: True Air Speed).

L'erreur de densité de l'air peut être corrigée par un facteur valant la racine du rapport des densités. Si l'on néglige les erreurs instrumentales et les erreurs de position, on peut théoriquement corriger la vitesse indiquée IAS pour évaluer la vitesse vraie TAS :

$$\text{TAS} = \text{IAS} \cdot \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \quad (+ \text{ corrections instrumentales et de position})$$

où ρ est la masse volumique vraie et ρ_0 la standard au niveau de la mer.

Dans le manuel de vol AFM d'un aéronef, les indications des différentes vitesses du domaine de vol sont données en IAS.

Par contre, lorsqu'il est question de vitesse de croisière on parle en *vitesse sol* (GS: Ground Speed). Les indications d'un GPS sont en vitesse sol.

La vitesse sol s'obtient à partir de la vitesse vraie en tenant compte de la vitesse de la masse d'air, c'est-à-dire du vent.

Voir aussi : Navigation et Préparation du vol et performances

A savoir:

- Aucune formule.
- Lois des écoulement (principe).
- Définitions des pressions H, p et q
- Définitions des vitesses IAS, TAS, GS.
- Effet de l'altitude sur l'IAS.

Chapitre 3 : Les forces aérodynamiques

3.1. La résistance de l'air (traînée):

3.1.1. De quoi elle dépend:

Si l'on sort la main par la fenêtre d'un véhicule se déplaçant rapidement, on sent bien la force de résistance de l'air. Les cyclistes et les skieurs de compétition sont des sportifs qui doivent s'efforcer de lutter contre ses effets.

En aéronautique, cette force est appelée *traînée*. Elle a toujours une direction opposée à celle du mouvement relatif dans l'air.

Quand on pédale contre le vent à vélo on se rend bien compte que la traînée croît très vite lorsque la vitesse de l'air augmente. En fait, si la vitesse de l'écoulement double, la traînée devient quatre fois plus forte; ce qui signifie qu'elle *croît avec le carré de la vitesse*.

Cyclistes et skieurs soignent leur position pour améliorer autant leur *forme* à l'écoulement que la *surface* présentée (maître couple).

Les navigateurs à voile savent bien que lorsque l'air est froid, c'est-à-dire plus dense, «il porte mieux dans les voiles»; autrement dit, la traînée augmente avec la *densité* de l'air.

La traînée dépend donc:

- de la vitesse (et même de son carré!),
- de la forme,
- de la section face à l'écoulement (maître couple),
- de la masse volumique (ou la densité) de l'air.

3.1.2. Aspect quantitatif:

Si l'on veut tenir compte de manière quantitative des facteurs évoqués ci-dessus, on arrive à une formule permettant de faire des calculs de résistance de l'air et si on nomme R_x la traînée, on obtient:

$$R_x = C_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S$$

- où: R_x : la traînée s'exprime en Newton [N]
 C_x : le coefficient de forme, n'a pas d'unités
 ρ : la masse volumique se donne en kg/m^3
 S : la surface se mesure en m^2
 v : la vitesse est en m/s.

Il est bon de remarquer que la valeur du coefficient de forme C_x dépend du choix de la surface S considérée. Par convention, les coefficients de traînée des corps simples dans des écoulements ainsi que des véhicules automobiles sont définis en prenant la surface du maître couple ou surface frontale (S dans la formule précédente).

Corps	Ecoulement	C_x
Disque		1.11
Demi-sphère	D	1.33
Demi-sphère	D	0.35
Sphère	●	0.15 à 0.45
Ellipsoïde	○	0.2 à 0.4
Corps fuselé	◀	0.1 à 0.2

Fig. 1: Exemples de coefficients de traînée
Ceux-ci sont définis par rapport à la surface frontale (maître couple).

En aéronautique, c'est par contre *la surface alaire* S qui est prise conventionnellement pour définir les coefficients de forme. Elle est définie comme la surface des ailes vues en plan et prise au travers du fuselage.

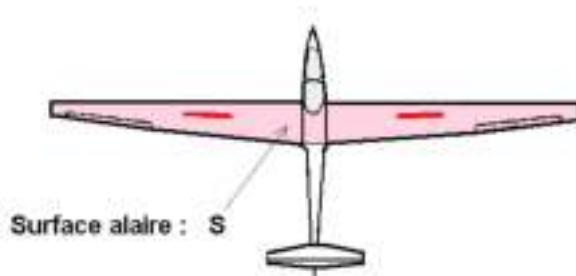


Fig. 2: Définition de la surface alaire

Exemples de calcul:

1) Pour un disque de $0,01 \text{ m}^2$ de surface, placé dans un écoulement de 10m/s (c'est-à-dire de 36 km/h) avec une masse volumique de l'air valant $1,23 \text{ kg/m}^3$, on a:

$$R_x = 1,11 \times 0,5 \times 1,23 \times 0,01 \times 10^2 = \underline{0,68 \text{ N}}$$

- 2) La seconde demi -sphère du tableau de même diamètre, dans ce même écoulement aura une traînée de: $R_x = 0,35 \times 0,5 \times 1,23 \times 0,01 \times 10^2 = 0,22 \text{ N}$
 3) Un corps fuselé de $C_x = 0,15$: $R_x = 0,15 \times 0,5 \times 1,23 \times 0,01 \times 10^2 = 0,09 \text{ N}$

3.2. La force de sustentation (portance):

3.2.1. Effet de l'angle d'attaque:

Reprendons l'expérience de la main sortie par la fenêtre d'un véhicule se déplaçant rapidement. Si nous la maintenons horizontale, il n'y aura pratiquement qu'une force de traînée, par contre, si nous lui donnons de l'incidence, c'est-à-dire un angle d'attaque, le bras va avoir tendance à se lever sous l'action d'une force dirigée vers le haut. C'est la force de sustentation ou *portance*.

Si l'on continue à augmenter l'angle d'attaque, la portance disparaît et il ne reste plus que de la traînée. On pourrait faire l'expérience plus rigoureusement avec une plaque plane:

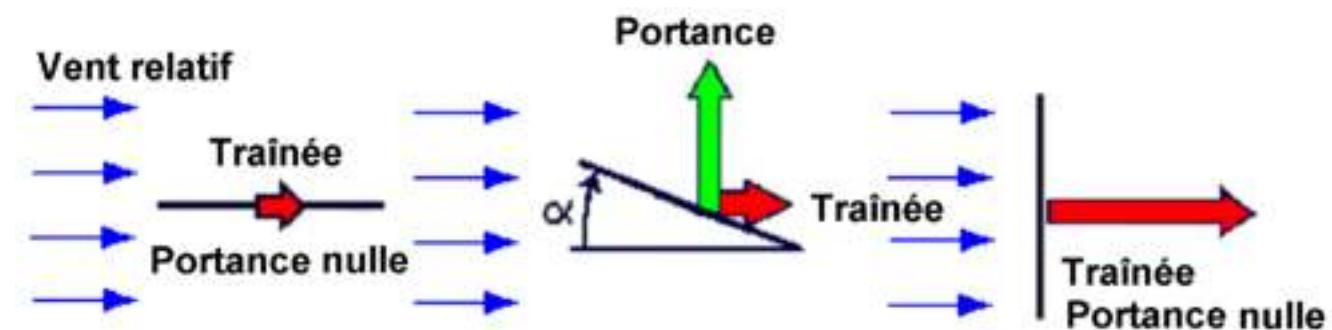


Fig. 3: Plaque plane dans un écoulement

D'abord la portance se crée avec l'angle d'attaque croissant puis diminue et disparaît.

3.2.2. Effet du profil:

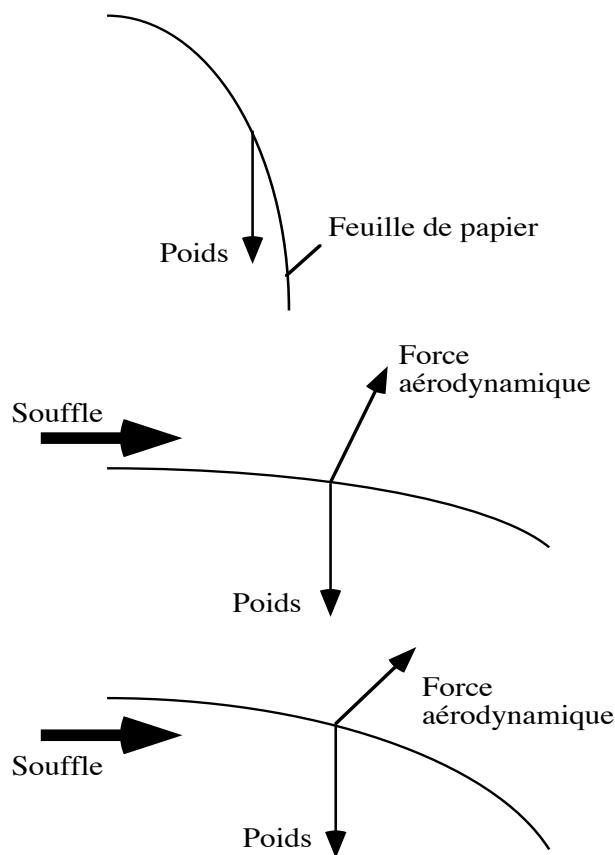
Comme le décrit la figure suivante, faisons une autre expérience.

Maintenons le bord d'une feuille de papier devant notre bouche. Elle va pendre devant nous sous l'influence de son poids.

Soufflons légèrement par-dessus. On s'aperçoit qu'elle se soulève.

C'est à cause de la forme arrondie du dessus de la feuille... comme sur le dessus d'un profil d'aile. La loi de Bernoulli nous dit que là où il y a plus grande vitesse il y a plus petite pression; donc une dépression est créée au-dessus de la feuille où règne un écoulement.

Si nous soufflons par-dessous, elle se soulève aussi, mais sous l'effet de la pression de l'écoulement de l'air, comme pour la plaque plane.

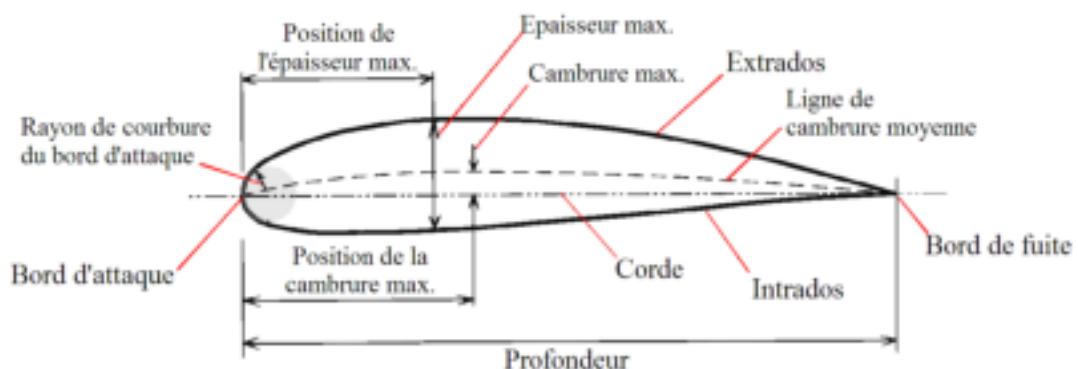
*Fig. 4: La feuille soufflée*

Lorsqu'on souffle au-dessus ou au-dessous d'une feuille de papier apparaît une force aérodynamique (portance + traînée).

On voit donc que ces deux effets (effet dynamique et effet de forme) peuvent se cumuler dans le cas d'une aile et créer une force de sustentation qui, s'opposant à la force de pesanteur, va nous permettre de voler!

3.2.3. Portance de profil:

La portance d'une aile profilée va être due au cumul des deux effets que nous venons de voir. Voyons tout d'abord les définitions géométriques d'un profil:

*Fig. 5: Définitions géométriques sur un profil*

La portance est aussi une force aérodynamique ; elle va donc dépendre des mêmes grandeurs que la traînée. On va ainsi pouvoir l'écrire formellement de la même manière :

$$R_z = C_z \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S$$

où: R_z : la portance s'exprime en Newton [N]

C_z : le coefficient de portance (sans unités), qui croît d'abord avec l'angle d'attaque α puis qui diminue brutalement après un *angle d'attaque critique*, précédant le phénomène du *décrochage*

S : est toujours la surface alaire

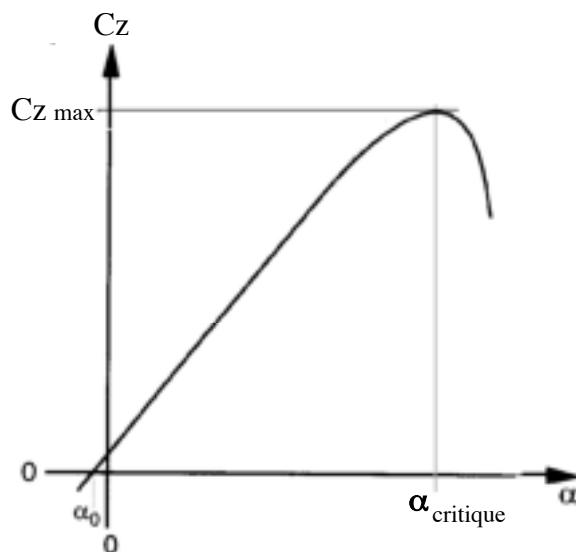


Fig. 6: Coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque

Il augmente avec l'angle d'attaque puis diminue et disparaît.

A savoir:

- Aucune formule.
- De quoi dépend la résistance de l'air et comment (pas de calcul).
- Définition de la surface alaire.
- Causes de la portance.
- Définition de l'angle d'attaque et de l'angle d'attaque critique.
- Définitions géométriques du profil.

Chapitre 4 : La résultante aérodynamique

4.1. Sa constitution et son point d'application:

La traînée et la portance sont en fait deux parties, deux composantes, de la force aérodynamique totale exercée sur un corps dans un écoulement ou sur un aéronef en vol. Cette force s'appelle la *résultante aérodynamique*.

La composante R_x est parallèle à la vitesse de l'écoulement tandis que la composante R_z lui est perpendiculaire

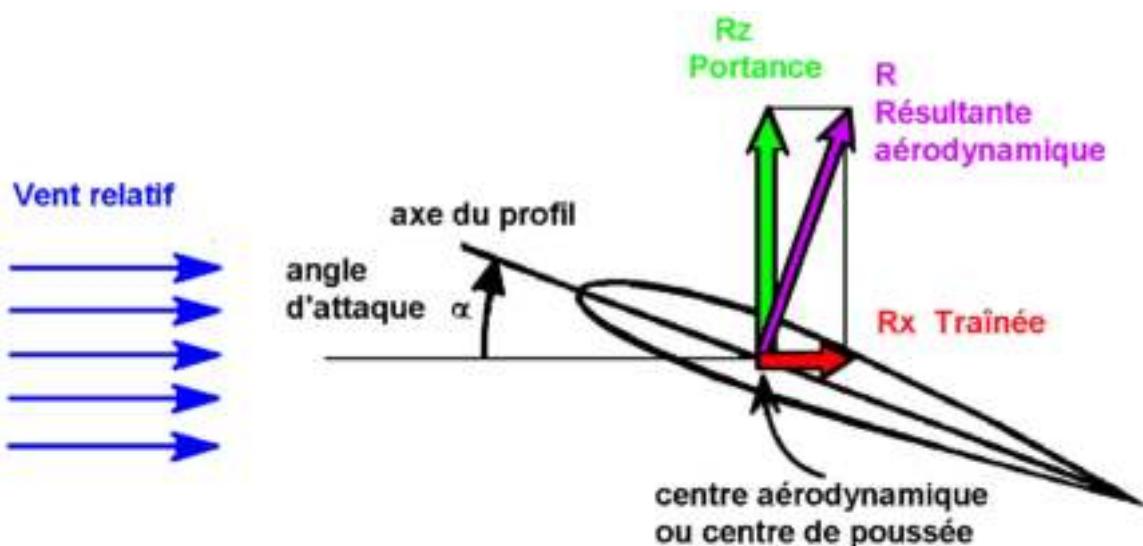


Fig. 1: Les forces aérodynamiques et leur résultante

Elles s'appliquent au centre aérodynamique ou centre de poussée.

La résultante aérodynamique est une force qui s'applique au *centre aérodynamique*, ou *centre de poussée* (CDP). Ce point, sur un avion ou un planeur, ne dépend que de la forme de l'appareil et légèrement de l'angle d'attaque. En effet, le centre aérodynamique s'avance un peu le long de la corde de l'aile lorsque l'angle d'attaque augmente.

Le *centre de gravité* (CDG), lui, dépend de la répartition des masses de l'appareil et l'on doit veiller, pour des raisons de stabilité, à ce qu'il reste dans une bonne position par rapport au centre aérodynamique; c'est ce dont traite l'opération du *centrage*.

Voir aussi : Préparation de vol et performances

La résultante aérodynamique est une somme de divers effets. On distinguera d'une part une contribution de *forces de pressions* et d'autre part une contribution de *forces de frottement*.

4.2. Contribution des forces de pression:

Si l'on pratiquait des petits trous tout autour du profil d'une aile, on pourrait mesurer la pression en chacun et visualiser ainsi la *répartition des pressions* autour du profil pour différents angles d'attaque, comme dans la figure 2. On met de cette manière en évidence les importances relatives des surpressions ou dépressions qui engendrent des forces sur la surface de l'aile.

Prenons un profil dissymétrique, tout d'abord avec angle d'attaque nul; l'accélération de l'écoulement qui doit contourner ce profil provoque, selon la loi de Bernoulli, des dépressions sur l'intrados et plus encore sur l'extrados, il en résulte une force de portance (*portance de pression*). La surpression au voisinage du bord d'attaque va contribuer à la traînée (*traînée de pression*).

Avec un léger angle d'attaque, de 6° par exemple, l'intrados est le siège d'une surpression tandis que sur l'extrados on a une importante dépression. On voit qu'alors, la portance est beaucoup plus le fait de l'aspiration sur l'extrados que de la surpression sous l'intrados.

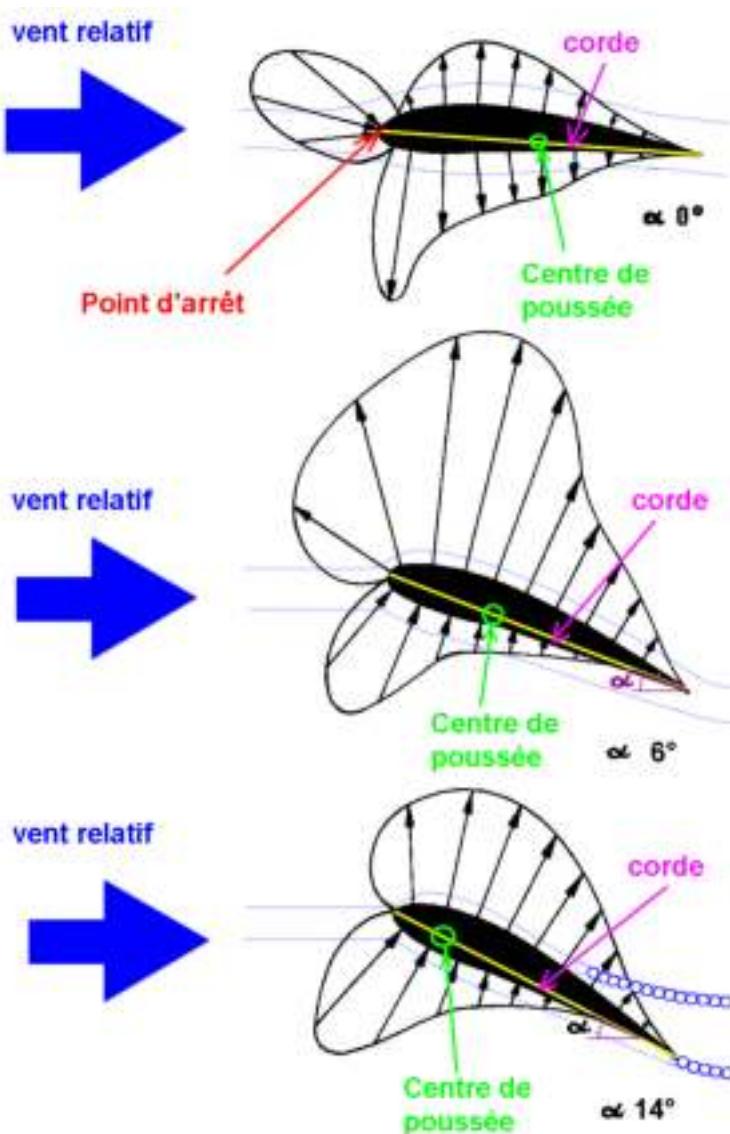


Fig. 2: Répartition des pressions autour d'un profil

Pour trois angles d'attaque différents : 0° , 6° et 14° .

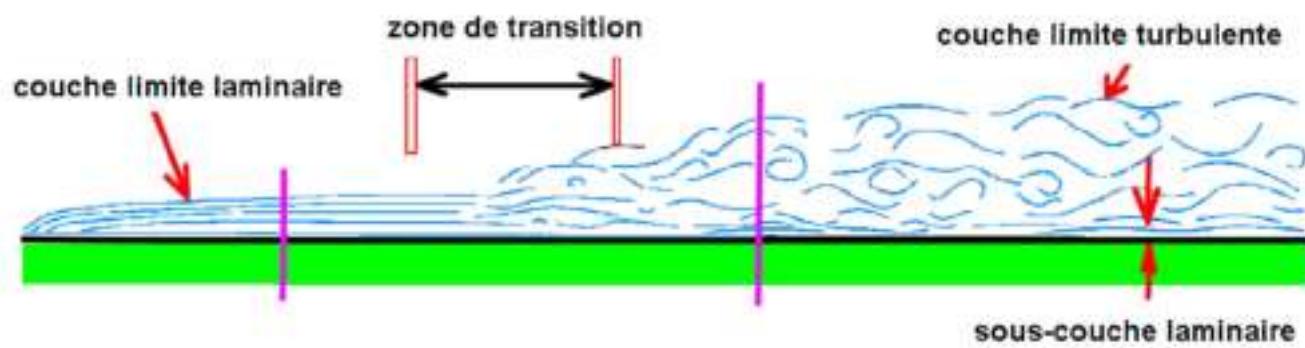
Pour un angle d'attaque plus important, qui deviendrait critique vers 14° , des filets d'air commencent à se décoller de la surface de l'aile, ce qui provoque un effondrement de la dépression d'extrados, d'où une diminution de la portance, signe précurseur du phénomène du *décrochage*.

On voit aussi sur la figure comment le centre de poussée (CDP) migre en direction de l'avant de l'aile quand l'angle d'attaque augmente.

4.3. Contribution des forces de frottement:

En plus des effets de pression, un corps dans un écoulement est soumis aussi aux conséquences de la viscosité de l'air, c'est-à-dire des frottements internes à l'écoulement qui engendrent une *traînée de frottement*.

C'est dans une mince épaisseur, appelée *couche limite*, près de la surface du corps que ces frottements se font sentir, diminuant la vitesse lorsqu'on s'approche jusqu'à la rendre nulle à la surface même du corps. L'écoulement dans la couche limite est d'abord laminaire à l'avant pour devenir turbulent à l'arrière après un *point* ou une *zone de transition* comme l'indique la figure 3.



PROFIL DES VITESSES

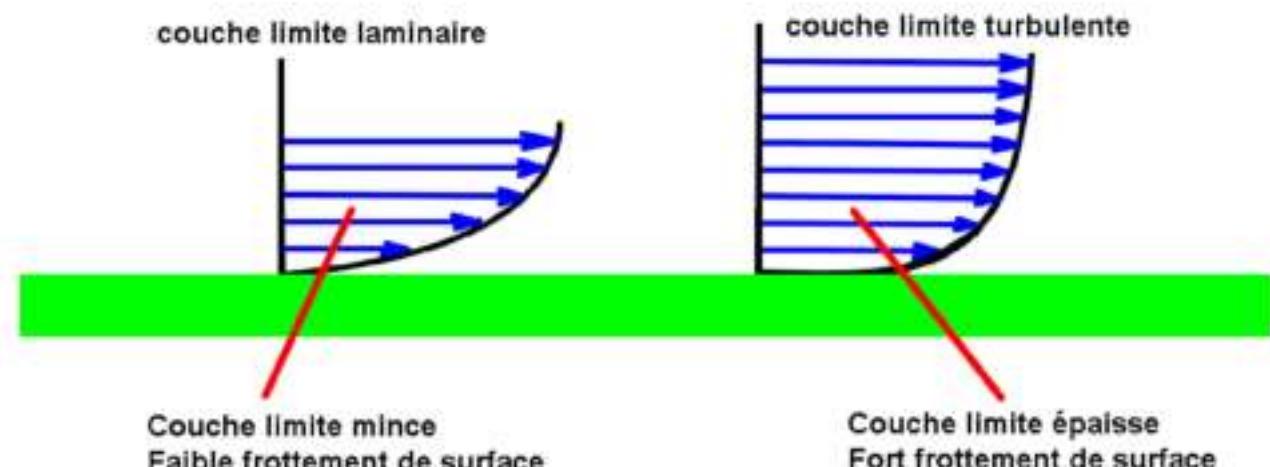


Fig. 3: Couche limite laminaire puis turbulente à la surface d'une aile

On remarquera la différence des profils des vitesses des deux couches limites.

La figure 4 montre comment la couche limite augmente d'épaisseur et prend de l'importance quand l'angle d'attaque augmente.

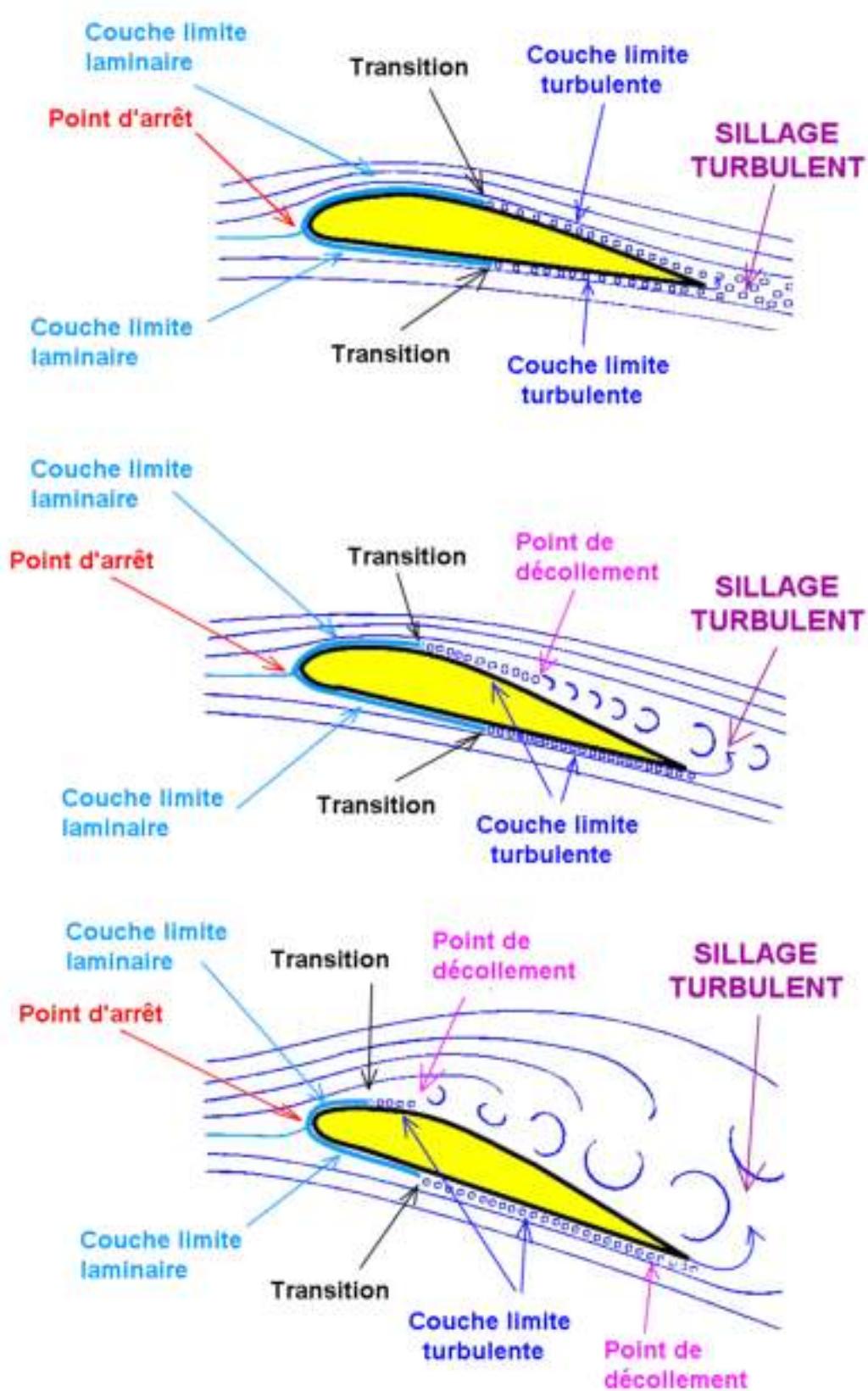


Fig. 4: Ecoulement près de la surface de l'aile

Pour un angle d'attaque faible, puis critique (avec début de décollement) et enfin trop grand (avec décollement complet). Les épaisseurs de la couche limite sont exagérées sur le dessin.

L'épaisseur de la couche limite peut mesurer de moins de 1 millimètre à l'avant d'une aile à plusieurs centimètres à l'arrière. Quant au vent sur la surface plane de l'aérodrome, par exemple, il forme aussi une couche limite, mais de quelques mètres d'épaisseur.

C'est à cause de cette couche limite qu'une machine sale reste poussiéreuse, même après un vol. En effet, les grains de poussières restent dans une épaisseur où la vitesse est quasi-nulle... donc, à vos éponges et peaux de daim !

La propreté d'une aile de planeur est importante car la rugosité de la surface fait augmenter l'épaisseur de la couche limite et par là, la traînée de frottement.

La traînée d'une couche limite laminaire étant plus faible que la traînée d'une couche limite turbulente, on a développé pour les planeurs des *profils laminaires* sur lesquels le point de transition se trouve plus à l'arrière que sur un profil normal. Ces profils sont caractérisés par une épaisseur maximum se situant à plus de 35% à l'arrière de la corde, comme le montre la figure 5.

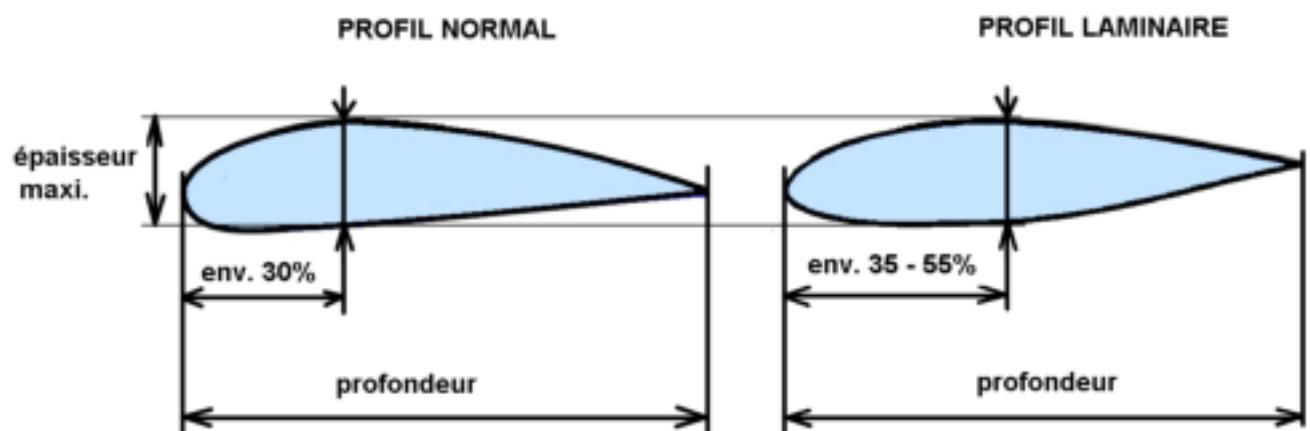


Fig.5: Profils d'aile

Normaux et laminaires.

A savoir:

- Constitution de la résultante aérodynamique.
- Centre aérodynamique et comportement avec l'angle d'attaque.
- Répartition des pressions autour du profil.
- Décrochage et angle d'attaque critique.
- Couche limite et profils laminaires.

Chapitre 5 : La traînée induite

5.1. Causes et conséquences:

Tout ce qui a été dit précédemment est valable pour une aile idéale, d'envergure infinie. Les performances aérodynamiques d'une aile réelle, de taille finie, sont influencées par des phénomènes perturbateurs situés en bout d'aile. Il s'agit des tourbillons marginaux qui créent une traînée induite et une dégradation de la portance. Voyons ça.

La surpression sous l'intrados et la dépression sur l'extrados vont, en bout d'aile, interférer en voulant se compenser et causer dans l'écoulement un débit d'air passant du dessous au dessus de l'aile. La conséquence est un tourbillon s'évasant en forme de cône à chaque extrémité d'aile, c'est-à-dire un sillage, donc une traînée indésirable. Il s'agit en fait d'une augmentation du coefficient de traînée C_x de l'avion entier.

Cet effet de traînée induite est surtout important aux basses vitesses, c'est-à-dire aux grands angles d'attaque.

Sur les aéroports, derrière les gros porteurs, ces tourbillons marginaux sont assez puissants pour mettre un avion de tourisme sur le dos...

Parfois, lorsque l'air est très humide, on peut voir ces tourbillons marginaux matérialisés par de la condensation aux extrémités des ailes des avions.

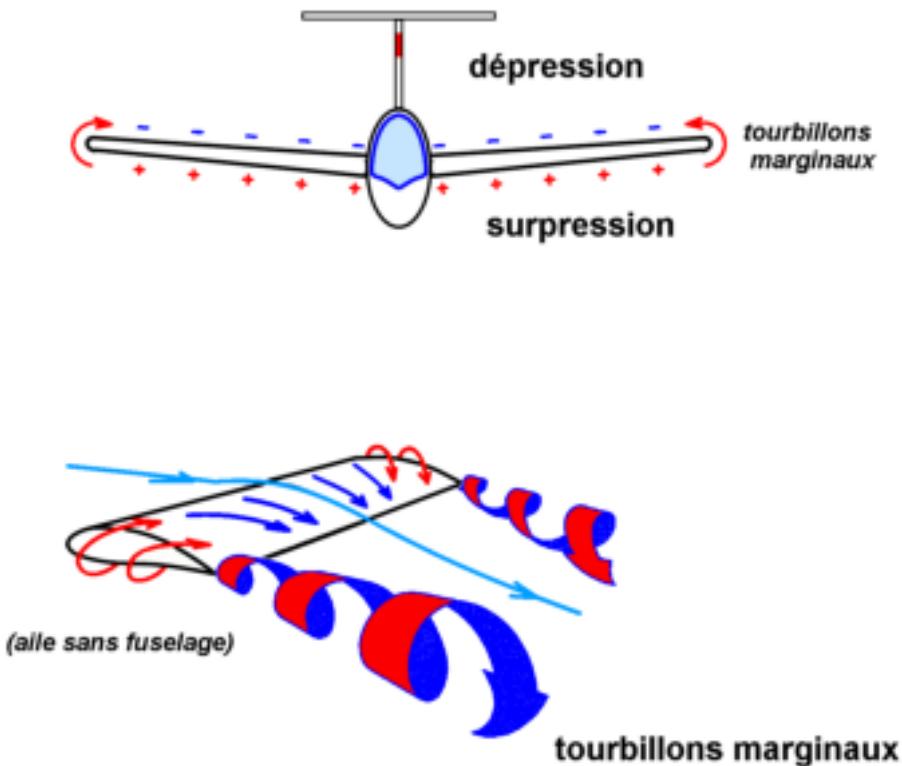


Fig. 1: Tourbillons marginaux

Induits aux extrémités des ailes par la différence de pression entre l'intrados et l'extrados.

En plus de créer de la traînée, ces tourbillons marginaux dégradent la répartition des pressions sur une grande partie de l'aile et créent donc aussi une diminution de portance. Tout se passe comme si le coefficient de portance C_z diminuait le long de l'envergure, surtout lorsque l'on s'approche du bout d'aile (bord marginal).

5.2. Influence de la géométrie de l'aile:

5.2.1. Effet d'allongement:

Les tourbillons marginaux créeront d'autant moins de traînée induite et de dégradation de la portance que les bords marginaux prennent une moindre importance dans la géométrie de l'aile.

Un grand rôle est donc joué par *l'allongement* de l'aile. Cette grandeur, appelé Λ (lambda) est définie comme le rapport entre l'envergure et la profondeur moyenne de l'aile, c'est-à-dire le rapport entre le carré de l'envergure et la surface alaire :

$$\Lambda = \frac{e^2}{S} \quad (\text{sans unités}).$$

Une aile de grand allongement est fine et élancée; on peut comprendre que les tourbillons marginaux vont peu la perturber. C'est ce qui explique l'allure ramassée des avions de faible allongement et celle plus élancée des planeurs dont l'allongement est beaucoup plus grand afin d'améliorer au maximum les performances aérodynamiques.

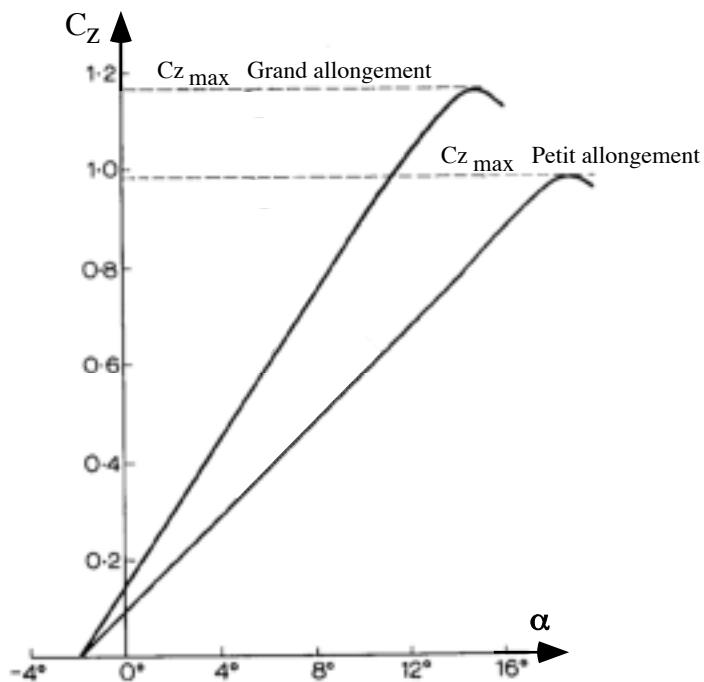


Fig. 2: Influence de l'allongement sur le coefficient de portance

Un grand allongement peut diminuer notablement les effets des tourbillons marginaux sur la répartition de la portance et ainsi améliorer les performances d'une aile.

5.2.2. Effet de forme en plan de l'aile:

Pour la même raison, la forme géométrique en plan du bout de l'aile joue un grand rôle sur l'importance des tourbillons marginaux.

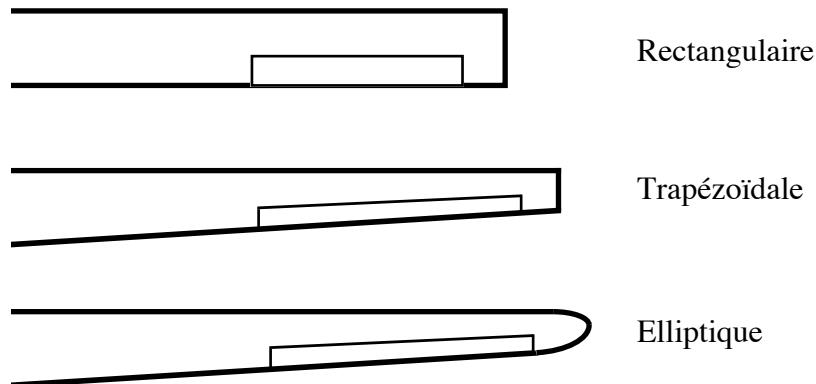


Fig. 3: Formes en plan des bouts d'aile

Aile rectangulaire, trapézoïdale et elliptique.

Même avec un allongement égal et un profil identique, une aile elliptique est meilleure qu'une aile trapézoïdale, elle-même plus performante qu'une aile rectangulaire.

5.3. Dispositifs particuliers:

5.3.1. Formes en bout d'aile :

Pour atténuer les effets des tourbillons marginaux et ainsi diminuer la traînée induite, on peut équiper les bouts d'aile de *saumons* (ou de réservoirs pour les avions) ou mieux encore de *pennes* (winglets) qui améliorent très efficacement les performances d'une aile. Voir les figures 4 et 5.



Fig. 4: Saumon de l'ASK-21



Fig. 5: Pennes du DG-800

Voir aussi : Connaissance des aéronefs

5.3.2. Vrillage de l'aile:

Les tourbillons marginaux peuvent provoquer, à un angle d'attaque bien inférieur à l'angle d'attaque critique, un décollement des filets d'air en extrémité d'aile, ce qui provoque un décrochage prématuré du bout de l'aile. Comme c'est justement la partie où se trouve la gouverne de gauchissement, ce phénomène peut être très gênant pour le pilotage.

Pour éviter cet inconvénient, les planeurs ont généralement une aile pourvue d'un *vrillage géométrique* donnant au profil un angle d'attaque qui diminue lorsqu'on va de l'implanture vers l'extrémité.

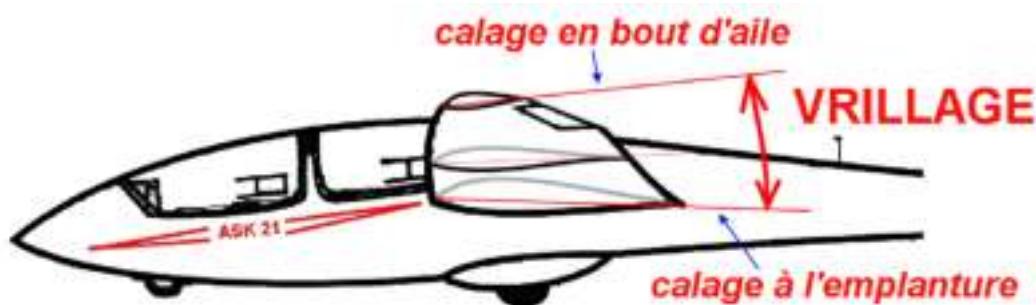


Fig. 6: Vrillage géométrique de l'aile
L'angle de calage diminue de l'emplanture à l'extrémité de l'aile.

Cet effet est obtenu par construction, en faisant varier l'*angle de calage* qui est l'angle entre la corde de l'aile et une ligne de référence (par exemple l'axe longitudinal du planeur).

On peut aussi construire une aile avec un profil qui évolue de l'emplanture à l'extrémité de l'aile de façon à ce que le bout d'aile décroche plus tard que l'emplanture. C'est ce qu'on appelle le *vrillage aérodynamique*.

Le vrillage permet en plus d'obtenir un comportement sain du planeur à basse vitesse et en vol cabré près du décrochage (stall).

Voir aussi : Préparation de vol et performances

A savoir:

- Causes des tourbillons marginaux.
- Effets des tourbillons marginaux.
- Facteurs influençant la traînée induite
- Définition de l'angle de camber.
- Définitions et raisons du vrillage de l'aile

2^{ème} Partie: Mécanique du vol

Chapitre 6 : Le vol rectiligne

6.1. Les lois du mouvement:

6.1.1. Enoncés des lois:

La mécanique classique est née, au XVIIème siècle, des *lois du mouvement* de Isaac Newton. Ces lois lient les forces appliquées à un corps, ou plus précisément leur résultante, au changement de mouvement qu'elles provoquent.

De manière simple, sans formulation mathématique, elles peuvent s'exprimer ainsi :

1- Lorsqu'un corps n'est soumis à aucune force, ou à un ensemble de forces dont la résultante est nulle (équilibre des forces), son mouvement ne change pas.

Première loi ou principe d'inertie

Un mouvement « qui ne change pas » ou mouvement stationnaire est un mouvement rectiligne de vitesse uniforme.

2- Lorsqu'un corps est soumis à une force résultante non nulle, sa vitesse change, soit en intensité, soit en direction (ou év. d'intensité et de direction).

Seconde loi ou loi fondamentale de la dynamique

Dans nos préoccupations aéronautiques, le « corps » en question peut être, comme ici, un aéronef ou une masse d'air en météorologie.

6.1.2. Exemples:

Les situations où la première loi s'applique sont fréquentes :

Le cycliste à vitesse constante sur une route horizontale ne développe une force propulsive que pour équilibrer les forces de frottement qui s'opposent à son mouvement (traînées et frottements mécaniques).

La luge ou le skieur sur un plan incliné atteignent une vitesse limite constante lorsque la composante du poids qui les propulse est juste égale à la somme des forces de frottement qui le retiennent. Le vol plané est aussi un tel exemple.

La chute à vitesse limite du parachutiste, de la goutte de pluie, ou du flocon de neige, sont des exemples dans lesquels le poids est exactement équilibré par la force de résistance de l'air (traînées) créée par le mouvement.

Les cas d'application de la seconde loi sont plus compliqués mais tout aussi fréquents :

Le cycliste qui veut augmenter sa vitesse doit, dans une phase transitoire, développer une force propulsive plus grande que les frottements. La résultante des forces est alors dirigée vers l'avant ce qui fait croître la vitesse. Au contraire, lorsqu'il cesse de pédaler, la résultante est dirigée vers l'arrière et la vitesse, toujours vers l'avant, décroît.

Pour bien comprendre, on dessinera les forces dans chacun de ces exemples.

6.2. Le vol horizontal rectiligne et uniforme:

Souvent appelé *vol stationnaire* horizontal, ce vol n'est pas celui de l'hélicoptère immobile mais bien un vol de croisière; il s'agit d'un mouvement *qui ne change pas* au sens de la première loi. Donc d'une situation d'équilibre des forces.

Il peut s'agir du cas d'un avion ou d'un motoplaneur en vol de croisière, ou alors d'un planeur remorqué en palier.

Si l'on décompose la résultante aérodynamique en traînée R_x et portance R_z , quatre forces sont alors en présence, comme l'indique la figure 1.

En vol horizontal uniforme (à vitesse constante) on a donc l'équilibre suivant :

- La poussée du moteur T équilibre la traînée R_x .
- La portance R_z équilibre le poids P (ou force de pesanteur).

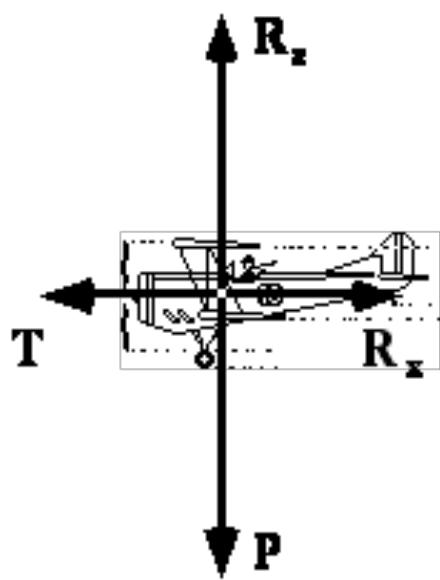


Fig. 1 : Equilibre des forces en vol horizontal stationnaire

La portance peut égaler le poids à des vitesses plus ou moins grandes ; en effet, comme $R_z = C_z \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S$, on voit que différents couples de valeurs de v et de C_z peuvent donner un R_z égal à P .

Si l'on désire par exemple diminuer la vitesse, il va falloir compenser par une augmentation du C_z ; elle est obtenue avec un plus grand angle d'attaque; en effet, on vole plus cabré aux faibles vitesses. La conséquence sera une diminution de traînée due à la diminution de vitesse qui devra, pour conserver l'équilibre, s'accompagner d'une diminution de la poussée (on réduit les gaz).

Au contraire, si l'on veut augmenter la vitesse, il faut, pour ne pas créer une portance plus grande que le poids, diminuer l'angle d'attaque et augmenter la poussée.

6.3. Le vol plané stabilisé :

6.3.1. Equilibre des forces :

Le vol plané stabilisé est aussi un « mouvement qui ne change pas » ; on est donc dans un cas où il y a équilibre des forces sur le planeur.

Si l'on décompose la résultante aérodynamique en traînée R_x et portance R_z , trois forces sont alors en présence. Le poids est équilibré par la composition de R_x et R_z , c'est-à-dire par la résultante aérodynamique R .

On peut aussi dire qu'il y a deux forces qui se compensent sur le planeur, la résultante aérodynamique R et le poids P .

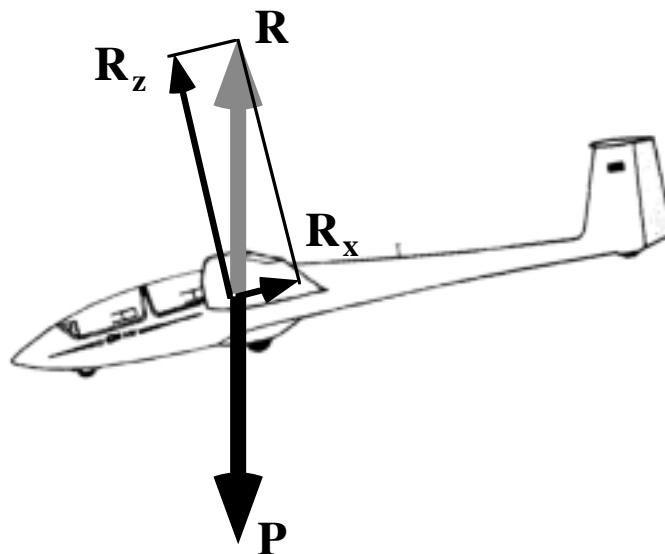


Fig. 2 : Equilibre des forces en vol plané stabilisé.

La résultante aérodynamique peut être égale au poids à différentes vitesses ; en effet, à chaque vitesse on peut faire correspondre un couple de valeurs C_x et C_z qui permet d'assurer l'équilibre des forces pour un angle d'attaque donné.

Ainsi le planeur peut être en plané stabilisé à différentes vitesses de vol. Plus la vitesse de plané est grande, plus la pente de la trajectoire est grande.

La pente de la trajectoire du plané est définie par la *finesse* qui est le nombre de kilomètres que peut parcourir le planeur à partir d'une hauteur de 1000 mètres en air calme. Un planeur de finesse 50, par exemple, peut théoriquement parcourir 50 km à partir d'une hauteur de 1000 m.

Cependant, dans la réalité de la pratique du vol il faut bien sûr tenir compte des mouvements verticaux (ascendances et descendances) et horizontaux (composante du vent) de la masse d'air et introduire la notion de *finesse-sol* qui est la finesse effective par rapport au sol, dans les conditions aérologiques locales du moment.

6.3.2. La polaire des vitesses:

A chaque vitesse v de plané stabilisé (en km/h) correspond une vitesse verticale de chute v_z (en m/s). La représentation graphique de cette correspondance s'appelle la *polaire des vitesses*.

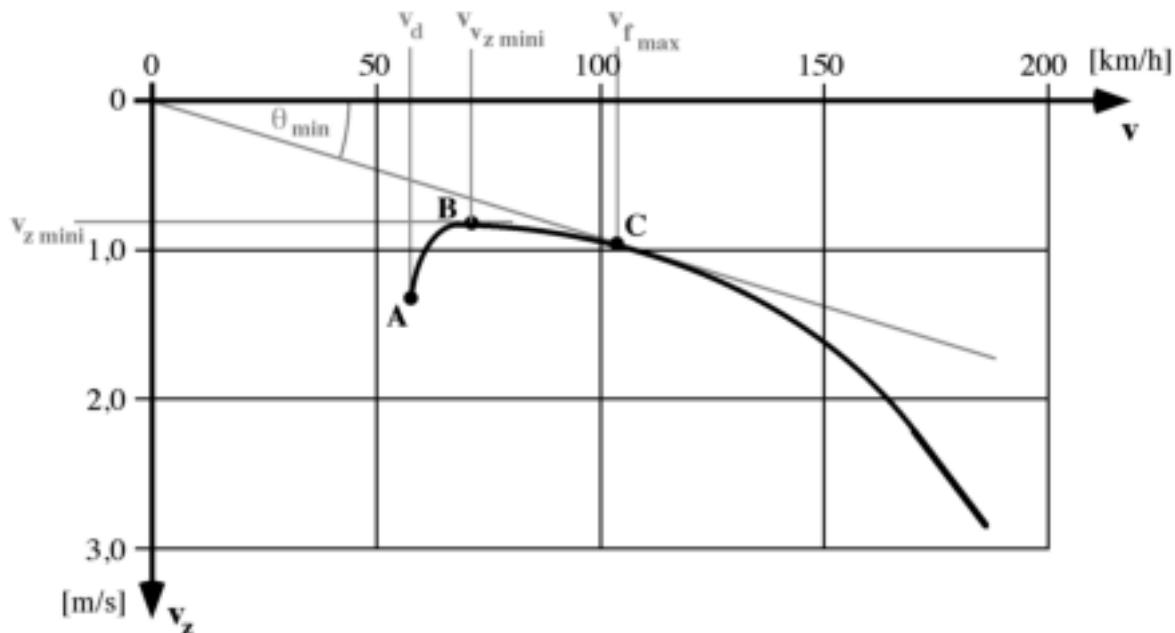


Fig. 3 : Polaire des vitesses.

Il sera beaucoup question de cette polaire aux cours de Connaissance générale des aéronefs et de Préparation de vol et performances.

Sur la polaire l'*angle de plané* θ est visualisé entre l'axe des vitesses et la droite qui joint l'origine au point de fonctionnement. On peut donc déterminer la finesse pour chaque vitesse de plané. La tangente à la polaire issue de l'origine détermine l'angle de plané minimum θ_{\min} et, par conséquent, la finesse maximum.

De la polaire on tire de nombreux renseignements utiles à la technique de vol mais pour l'instant contentons-nous de distinguer trois points bien particuliers :

- A** : le point de vitesse minimum ou *vitesse de décrochage* v_d qui correspond à la valeur maximum du coefficient de portance $C_{z_{\max}}$ (pour le décollage et l'atterrissement).
- B** : le point de *taux de chute minimum* (pour voler longtemps, on vole à $v_{vz \min}$).
- C** : le point de *finesse maximum* (pour voler loin en air calme on vole à $v_{f \max}$).

Notons que la polaire des vitesses est influencée par la *charge alaire P/S* qui s'exprime en kg/m^2 :

Plus le planeur est chargé (plus le rapport P/S est élevé), plus la polaire glisse le long de la droite de finesse maximum (tangente au point C). Un planeur ballasté aura donc la même finesse que le planeur non ballasté, mais à plus haute vitesse.

En général, le constructeur donne les polaires pour différentes charges alaires et configurations de la machine.

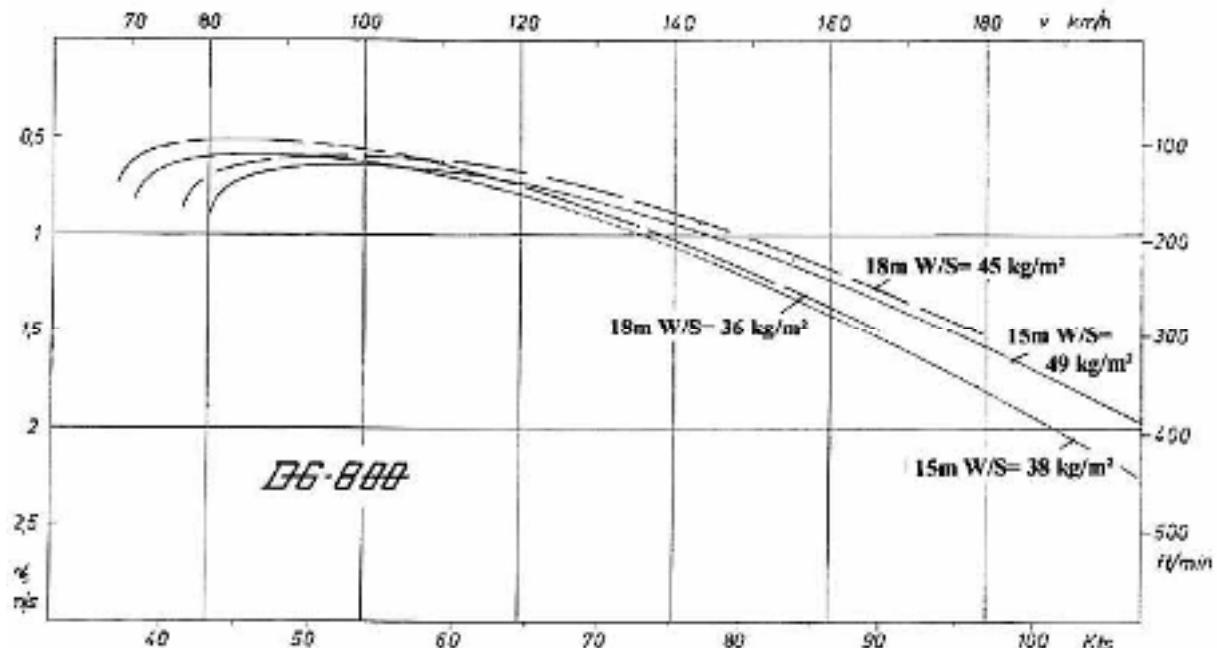


Fig. 4 : Polaires du DG-800

Elles sont données pour les versions 15 m et 18 m, ainsi que pour différentes charges alaires (notées ici W/S).

Le planeur est plus fin en version 18 m à cause de l'effet de l'augmentation de l'allongement.

Voir aussi : Préparation de vol et performances

A savoir:Lois du mouvement :

- | | | |
|---|-------------------|--|
| Equilibre des forces (résultante nulle) | \Leftrightarrow | pas de changement du mouvement. |
| Non-équilibre (résultante non nulle) | \Leftrightarrow | la vitesse change (d'intensité ou de direction). |

Vol horizontal stationnaire Pour toutes les vitesses, en vol horizontal stationnaire il y a équilibre des forces (résultante nulle).

Equilibre des forces en vol plané : Portance et traînée compensent le poids.
Points caractéristiques de la polaire des vitesses et définition de la finesse.

Chapitre 7 : Le vol non rectiligne

7.1. Le vol en virage:

7.1.1. Principes mécaniques du mouvement circulaire:

Dans un mouvement circulaire la vitesse change constamment de direction ; on ne se trouve plus dans le cas d'un « mouvement qui ne change pas », il n'y a donc pas équilibre des forces. Il faut en effet une force résultante non nulle dirigée vers le centre de la trajectoire circulaire pour que le corps ne suive pas soit inertie et ne s'en aille pas tout droit ; c'est une **force centripète**.

Lorsqu'on fait tourner une pierre au bout d'une ficelle, elle subit la force de cette ficelle qui est dirigée vers le centre du cercle. De même la Lune est attirée vers l'intérieur de son orbite par une « ficelle » qui n'est rien d'autre que la force gravitationnelle exercée par le champ de pesanteur de la Terre. On peut transposer à la Terre qui reste sur son orbite autour du Soleil grâce à l'attraction de ce dernier. Pour l'avion qu'on incline en virage, la ficelle est simplement constituée par la composante horizontale de la portance.

Lorsqu'on voit les choses ainsi, il n'y a aucune raison de faire intervenir une force dirigée vers l'extérieur du virage (centrifuge) qui créerait un équilibre contredisant les lois du mouvement.

7.1.2. Forces sur l'avion en virage horizontal uniforme:

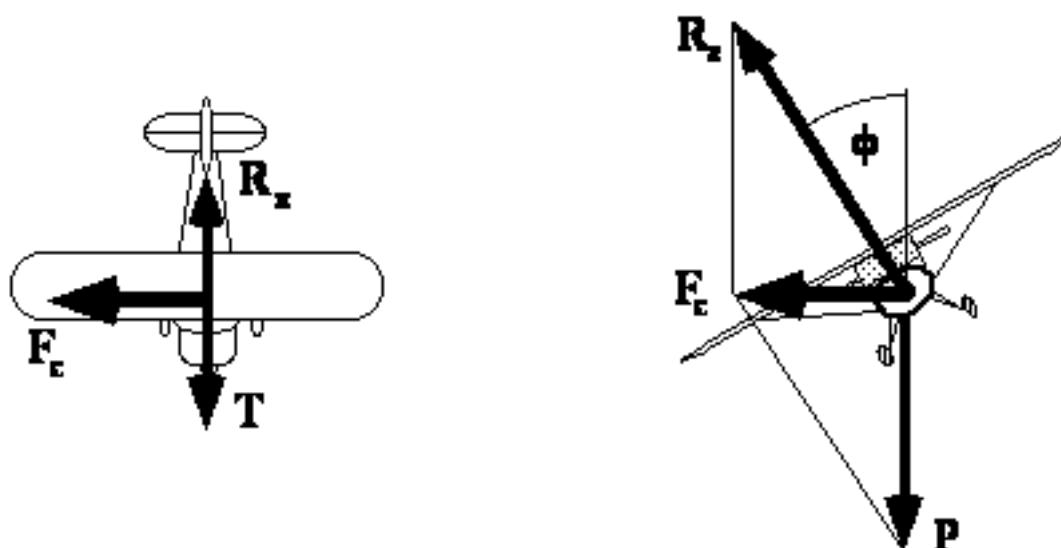


Fig. 1 : Forces en virage horizontal uniforme.

Dans un plan vertical (dessin de droite), deux forces sont en présence : la portance R_z et le poids P qui se combinent pour former une résultante non nulle dirigée vers le centre du virage. Cette force déviatrice s'appelle la force centripète F_c . Dans la direction de l'axe de l'avion, la poussée T du moteur équilibre la traînée R_x (dessin de gauche, vue de dessus).

7.2. Le facteur de charge:

7.2.1. En virage:

En vol rectiligne la portance R_z est égale au poids P , mais ici elle doit être plus importante puisqu'elle contribue à créer une force déviatrice supplémentaire : « la ficelle ». La composante verticale de la portance équilibre le poids et sa composante horizontale sert de force centripète. L'augmentation nécessaire de la portance en virage est obtenue par une augmentation du C_z , c'est-à-dire par un plus grand angle d'attaque.

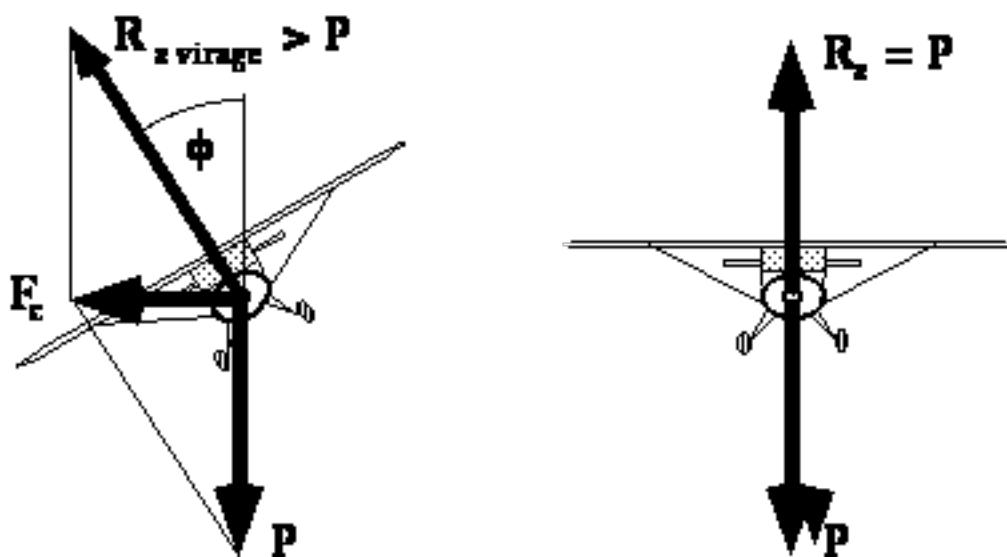


Fig. 2 : Portance en virage.

Elle doit être plus grande qu'en vol rectiligne pour pouvoir créer la force centripète tout en continuant d'équilibrer le poids.

Le rapport entre la portance R_z et le poids P est appelé *facteur de charge n*.

On a donc :

$$n = \frac{R_z}{P}$$

Il sert à mesurer l'importance de l'effort demandé à la structure de l'aile. Le facteur de charge donne aussi l'importance de la sensation de tassement que ressentent les passagers lors d'un virage ou d'une ressource ; c'est ce qu'on appelle communément « le nombre de g » : Avec un facteur de charge $n=2$, c'est-à-dire à 2 g, la pression du pilote sur son siège est doublée.

On peut montrer qu'il y a un lien direct entre l'inclinaison ϕ du virage et le facteur de charge n . Des calculs donneraient les valeurs suivantes :

Inclinaison ϕ [°]	Facteur de charge n	Augmentation de portance [%]
15	1.04	4
30	1.15	15
45	1.41	41
60	2.00	100
75	3.86	286

Fig. 3 : Facteurs de charge en virage.

7.2.2. En ressource:

Lors d'une ressource, il doit y avoir sur l'avion ou le planeur, comme pour le virage, une résultante des forces dirigée vers l'intérieur de la courbure de la trajectoire. Dans ce cas, la portance R_z doit être supérieure au poids P pour créer une force résultante courbant la trajectoire vers le haut.

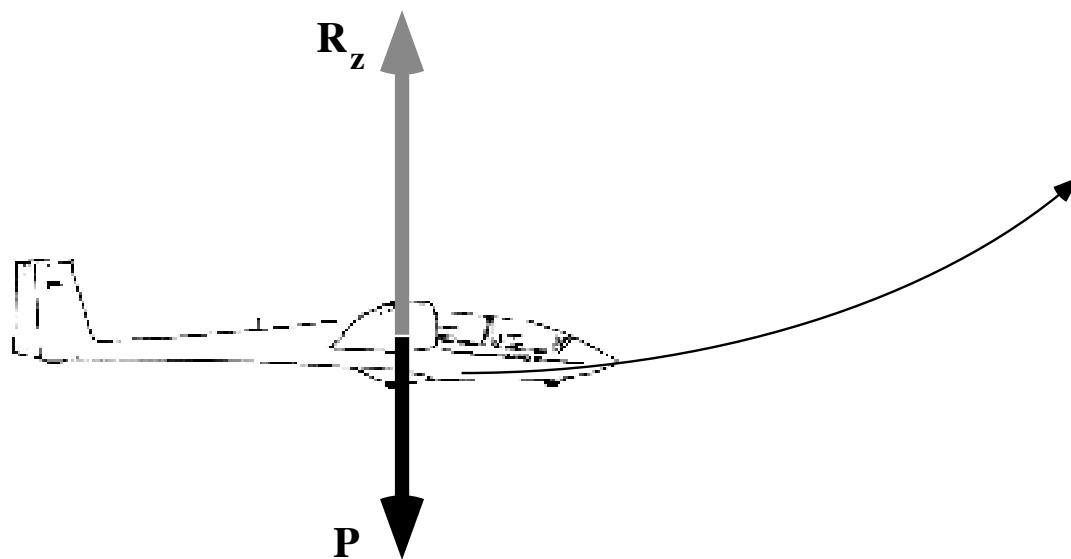


Fig. 4 : Forces lors d'une ressource.

Le facteur de charge a ici la même définition qu'en virage : $n = \frac{R_z}{P}$ et il mesure aussi l'augmentation apparente du poids des passagers (c'est toujours le *nombre de g*). La résistance de la structure de la machine impose des limites à ce facteur de charge qui constituent des limites d'utilisation de la machine.

[...Connaissance des aéronefs]

La mécanique du vol nous montrerait que la vitesse de décrochage est influencée par le facteur de charge ; elle augmente avec celui-ci. Pour ceux qui aiment les calculs, nous dirons que la vitesse de décrochage augmente avec la racine du facteur de charge:

$$v_{d \text{ virage}} = \sqrt{n} \cdot v_{d \text{ plané}}$$

Donc, en virage et en ressource : **la vitesse de décrochage est plus grande qu'en vol rectiligne !**

Exemples de calcul:

Pour $n = 2$: (ou 2 g, ce qui correspond à un virage de 60° d'inclinaison), on a:

$$v_{d \text{ virage}} = \sqrt{2} \times v_{d \text{ plané}} = 1,41 \times v_{d \text{ plané}}$$

Pour une vitesse de décrochage en plané $v_{d \text{ plané}} = 75 \text{ km/h}$, on obtient:

$$v_{d \text{ virage}} = \sqrt{2} \times 75 = 1,41 \times 75 = \underline{106 \text{ km/h}}$$

Pour $n = 3$: (virage de 70° d'inclinaison), on a alors: $v_{d \text{ virage}} = \sqrt{3} \times v_{d \text{ plané}} = 1,73 \times v_{d \text{ plané}}$

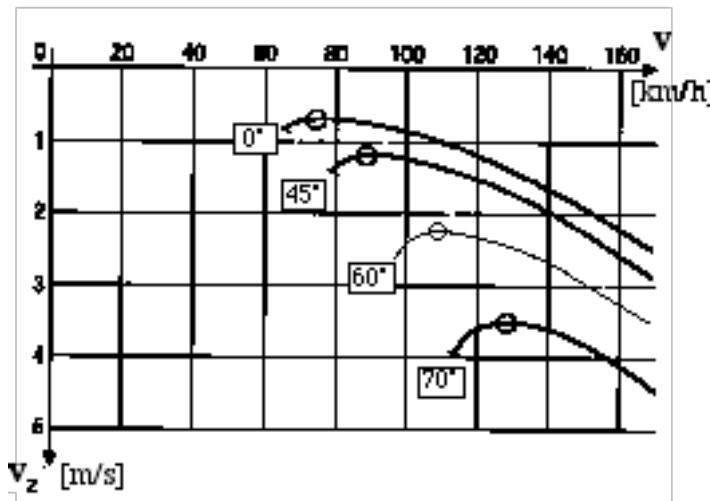
Pour la même vitesse de décrochage en plané on trouve:

$$v_{d \text{ virage}} = \sqrt{3} \times 70 = 1,73 \times 75 = \underline{130 \text{ km/h}}$$

7.3. Polaires en virage et polaires en spirale:

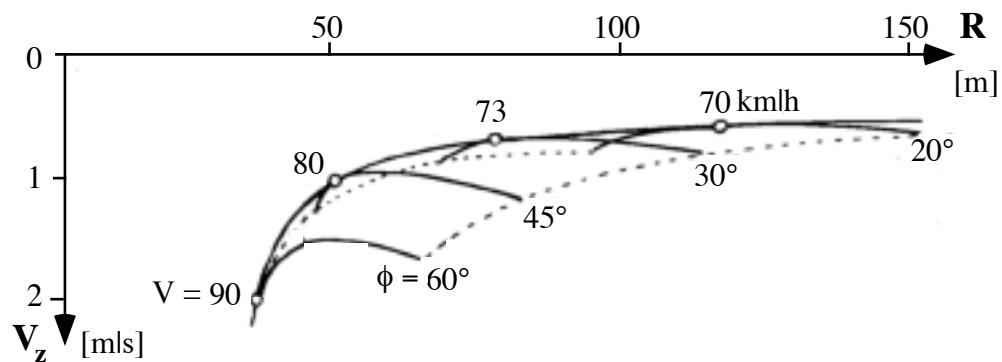
Les performances d'un planeur ne sont pas les mêmes en virage qu'en vol rectiligne ; à une même vitesse de vol v , la vitesse de chute v_z est plus importante en virage. Pour une charge alaire P/S fixée, il y a une polaire des vitesses pour chaque inclinaison ϕ de virage.

Pour une charge alaire déterminée on peut représenter les polaires en virages à différentes inclinaisons ϕ . On obtient alors une famille de courbes valables pour une seule charge alaire.

*Fig. 5 : Polaires en virage.*

Comme pour une inclinaison ϕ donnée la vitesse de vol v détermine le rayon R du virage, on peut aussi dessiner des polaires en fonction du rayon du virage R plutôt que de la vitesse v .

Comme à chaque rayon de virage correspond une vitesse de vol v , on peut représenter les performances en spirale du planeur dans un diagramme en fonction du rayon des spirales (ou cercles) : il s'agit alors de la polaire en spirale qui permet de déterminer le comportement du planeur dans une ascendance thermique.

*Fig. 6 : Polaire en spirale (en cercle)*

A savoir:

- Aucune formule.
- Les forces en virage.
- Le facteur de charge en virage.
- Influence du facteur de charge sur la vitesse de décrochage.

