

La mécanique de vol

La mécanique de vol est un sujet très intéressant qui permet de comprendre les phénomènes qui permettent à votre aile de voler. C'est une science qui peut devenir très complexe si on veut vraiment aller au fond des choses. Ceci dit, si on se limite aux grands principes de fonctionnement elle reste très digeste et peut être comprise par quiconque s'y intéresse un minimum. J'espère que ce qui suit ne contient pas trop d'erreurs et je compte sur vous pour m'envoyer vos corrections si c'était le cas.

Voici le plan de mon exposé, les petites flèches à droite à la fin de chaque partie permettent de revenir à ce plan :

1. [L'aérodynamique](#)
 2. [→](#)
 3. [Définition des termes utilisés](#)
 4. [Principe de sustentation](#)
 - [*Théorème de Bernouilli*](#)
 - [*La portance*](#)
 - [*Variation de portance en fonction de l'incidence*](#)
 - [*Décrochage*](#)
 5. [La stabilité d'une aile](#)
 - [*Parapente*](#)
 - [*Les aile delta*](#)
 - [*La stabilité en tangage*](#)
 6. [D'ou vient l'énergie du vol ?](#)
 7. [Critères de performances](#)
 - [*La maniabilité*](#)
 - [*Le taux de chute mini*](#)
 - [*La finesse*](#)
 - [*La plage de vitesse*](#)
 8. [La polaire d'une aile](#)
-

1. L'aérodynamique

La mécanique de vol, ou aérodynamique, fait partie d'une science plus vaste: la mécanique des fluides. Les premières bases sérieuses de l'aérodynamique furent jetées en 1920 lorsque le physicien allemand PRANDLT trouva la théorie exacte de la portance de l'aile. Il introduisit aussi la notion de couche limite qui fut reprise et développée par von KARMAN. Avant eux, l'histoire a retenu les noms de BERNOUILLI, ALEMBERT, EULER, LAPLACE... depuis la mécanique des fluides a fait de grands progrès.

2. Définition des termes utilisés



schéma 1: Aile en coupe

Tout d'abord je voudrais poser quelques définitions avant d'aller plus loin. Un profil d'aile a la forme représentée par le dessin ci dessus.

- Le dessus de l'aile est appelé extradados, le dessous intrados.
- L'avant du profil est appelé le bord d'attaque car c'est lui qui pénètre dans l'air le premier et l'arrière et appelé bord de fuite car c'est par là que l'air s'échappe.
- La distance entre le bord de fuite et le bord d'attaque et appelée la corde, elle représente la largeur de l'aile.
- La longueur d'une aile est appelée envergure.
- L'effilement d'une aile est appelé l'allongement. Plus une aile a de l'allongement plus elle est étroite par rapport à sa longueur. La formule générale pour calculer l'allongement d'une aile est $4b^2/S$ ou b est la longueur de la demi envergure et S la surface de l'aile.
- L'incidence d'une aile est l'angle que fait cette aile par rapport à la direction de l'air qu'elle traverse.

3. Principe de sustentation

• Théorème de Bernouilli

Sans rentrer dans les détails, monsieur Bernouilli a déterminé que lorsque la vitesse d'un fluide augmente, sa pression diminue.

Physiquement cela s'écrit comme ceci :

$$P + qV^2/2 = \text{constante}$$

avec

P = pression,

q = la masse volumique de l'air

V = vitesse du fluide

• La portance



La portance, comme son nom l'indique, est la force exercée sur une aile qui tend à la porter, donc à la tirer vers le haut. Imaginons une aile rectangulaire, le dessin ci dessous représente cette aile en coupe. Les traits bleus désignent le chemin emprunté par les filets d'air laminaire le long du profil de cette aile.

La flèche noire, notée R , correspond à la résultante des forces aérodynamiques appliquées à l'aile. Cette force peut être décomposée en deux résultantes:

- Une verticale, notée R_z , qui correspond à la force de portance proprement dite.
- Une horizontale, notée R_x et dirigée vers l'arrière. Cette force tend à tirer l'aile en arrière et donc tend à la freiner: c'est la traînée.

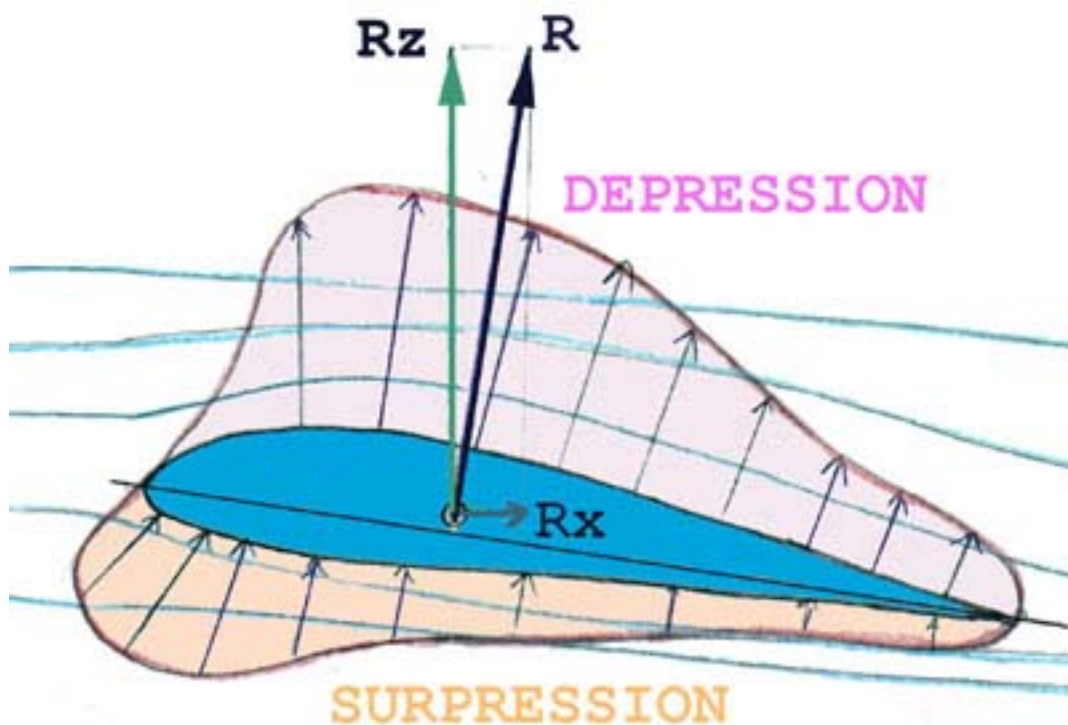


schéma 2: Ecoulement de l'air autour d'un profil

pour les matheux, on peut exprimer R_x et R_z de la façon suivante:

- $R_x = 1/2 q S V^2 C_x$
- $R_z = 1/2 q S V^2 C_z$

avec

q = masse volumique de l'air

S = surface de l'aile

V = vitesse de l'air

C_x et C_z respectivement coefficients de **traînée** et de **portance**

On conçoit aisément qu'ayant une incidence positive par rapport aux filets d'air, il règne une

surpression sur l'intrados de l'aile due à la poussée de l'air. C'est le même phénomène qui tire votre main en arrière lorsque vous la sortez par la fenêtre d'une voiture en marche (attention c'est dangereux !). Cette surpression est colorisée en orange sur le dessin.

En plus de cette surpression, une dépression se crée sur l'extrados de l'aile. Cette dépression tend à aspirer l'aile vers le haut ce qui contribue à la soulever (en rose sur le dessin). Contrairement à ce que l'on pourrait croire, cette dépression fait plus que contribuer à la portance puisque c'est elle qui assure 75% de cette force, les 25 autres % étant fournis par la surpression à l'intrados.

D'où vient cette dépression ? Elle est la conséquence directe du théorème de Bernoulli. Imaginez deux molécules d'air, A et B très proches l'une de l'autre, se présentant juste devant le bord d'attaque. Disons que la molécule A passe sur l'extrados de l'aile et que la molécule B passe sous l'intrados. Vous remarquerez sur mes beaux schémas que le profil d'une aile n'est pas symétrique. L'extrados est plus bombé que l'intrados. Il en résulte que ma molécule A doit faire plus de chemin que la molécule B pour rejoindre le bord de fuite de l'aile. Comme elles sont obligées de se rejoindre en même temps sur le bord de fuite, sinon un vide d'air se créerait, la molécule A doit aller plus vite que la molécule B. Grâce à la forme du profil, on obtient donc une plus grande vitesse des filets d'air sur l'extrados de l'aile que sur à l'intrados. C'est là qu'intervient Bernoulli : qui dit vitesse dit diminution de pression, donc aspiration.

Nous pouvons donc en conclure:

un aéronef en vol est plus aspiré que porté par son mouvement dans l'air.

un aéronef a besoin de vitesse pour voler.

- **Variation de portance en fonction de l'incidence**

Les essais en soufflerie ont montré que pour chaque profil il existe une incidence pour laquelle la portance est nulle. Cet angle est généralement négatif pour les profils dissymétriques et nul pour les profils symétriques.

Si on augmente l'incidence à partir de cet angle de portance nulle, on s'aperçoit que la portance augmente linéairement jusqu'à une valeur C_z max puis décroît jusqu'à une valeur critique correspondant à l'angle de décrochage.

- **Décrochage**

Le décrochage se traduit par une perte brutale de portance due à une incidence de l'aile trop grande. Lors du décrochage, les filets d'air normalement laminaires, deviennent turbulents sur l'extrados de l'aile. Ces turbulences détruisent la zone qui est normalement le siège de la dépression aspirant l'aile vers le haut (voir schéma).

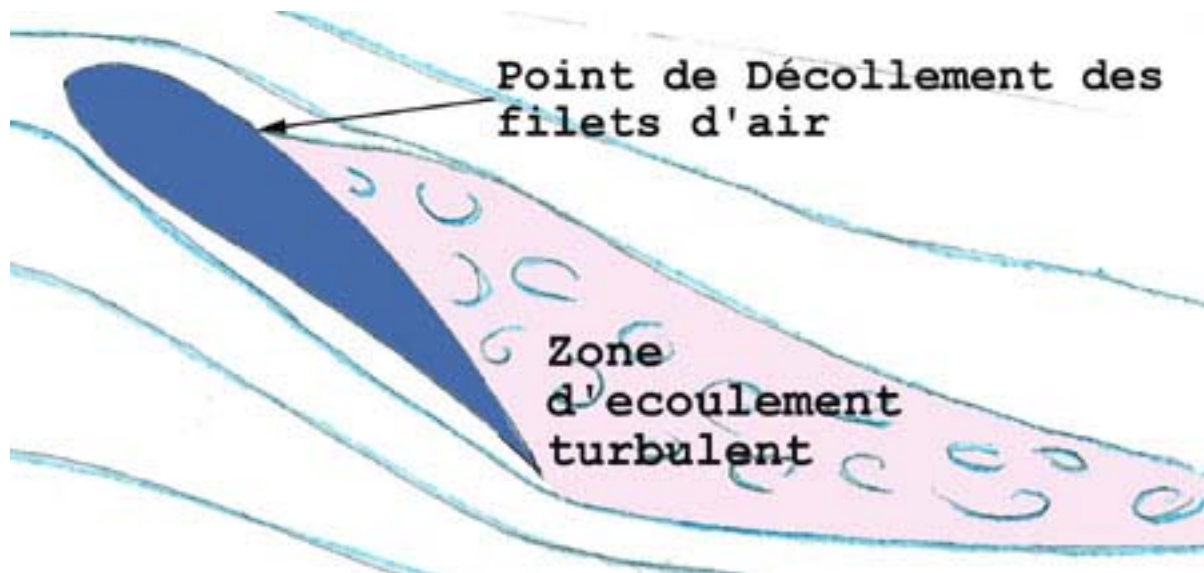


schéma 3: Décrochage des filets d'air

Il en résulte une perte de portance et un accroissement de la traînée de l'aile. Cette configuration fait partie du domaine de vol des deltas et des ailes rigides. Elle se rencontre aussi en parapente, mais il faut vraiment la chercher car les débattements des commandes ne permettent normalement pas de décrocher.

Pratiquement, lors d'un décrochage, lorsque par exemple on a trop voulu ralentir son aile, l'aile effectue une abattée, c'est à dire qu'elle se met toute seule en piqué de façon à reprendre de la vitesse et à diminuer son incidence. Cette manoeuvre permet aux filets d'air de recoller au profil de l'aile et de reprendre un vol normal.

Ce comportement automatique est obtenu grâce à la stabilité de l'aile, sujet dont traite la partie suivante.

4. La stabilité d'une aile ▲

La stabilité d'une aile correspond à sa capacité à reprendre d'elle-même un vol normal après un déséquilibre. C'est une action qui n'a pas besoin de l'intervention du pilote. Tous les aéronefs que vous voyez évoluer au dessus de votre tête sont intrinsèquement stables sinon il serait impossible à piloter.

Dans la plupart des cas, cette stabilité est assurée de façon aérodynamique. Seuls certains avions de chasse font confiance à leurs ordinateurs de bord pour ce travail. Je ne parlerai pas de ce dernier type de stabilité qui est plutôt du domaine de l'informatique et de l'asservissement.

Suivant le type d'aéronef, la stabilité n'est pas assurée de la même façon.

● Le parapente ▲

Le parapente est un cas à part puisque sa stabilité sur tous ses axes est assurée en accrochant le pilote très bas en dessous de son aile. En effet, les profils des parapentes n'étant pas autostables (voir ci dessous), il n'est pas possible de placer le pilote juste en dessous de l'aile. Sans compter que si on remontait le pilote, les suspentes tireraient d'extrémité tireraient trop horizontalement et l'aile ne

pourrait pas prendre une forme correcte. Donc la stabilité du parapente est obtenue facilement: il faut que son centre de gravité soit très bas.

- **Les ailes delta**

N'oublions pas que le terme aile delta regroupe les deltaplanes, la plupart des rigides, certains bombardiers, l'avion furtif F117, les mirages... Bon, je suis sûr que ce qui suit concerne au moins les deltaplanes et rigides. Pour ce qui est des bombardiers et autres mirages, je pense que leur stabilité est obtenue plus ou moins artificiellement.

La stabilité en tangage

Son rôle est de contrecarrer deux événements :

- le départ en piqué ou en cabré.
- le parachutage lors d'un décrochage.

Tous d'abord le départ en piqué ou en cabré:

Nous avons vu plus haut que la somme des forces agissant sur le profil d'une aile pouvait être représentée par une unique force noté R. Je ne rentrerai pas dans des détails inutiles et compliqués, mais il faut savoir que le point d'origine de cette force n'est pas fixe.

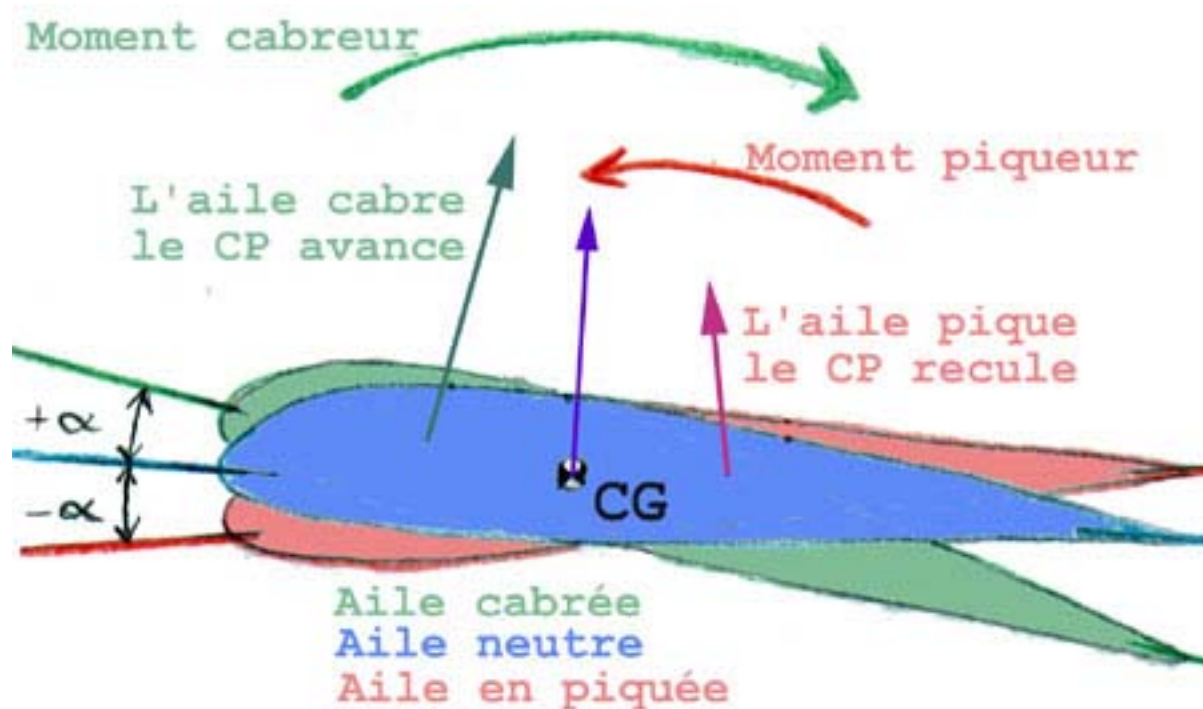


schéma 4: Déplacement du CP

Ce point, appelé centre de poussée (CP), se déplace en fonction de l'incidence de l'aile. En vol équilibré, le centre de poussée est confondu avec le centre de gravité de l'aile. Si par exemple l'aile se cabre, le centre de poussée avance par rapport au CG. Si l'aile pique, le centre de poussée recule par rapport au CG.

On s'aperçoit que cette propriété, à cause des couples créés par les déplacements du CP, a une

fâcheuse tendance à amplifier les changements d'incidence de l'aile ! Sur les avions conventionnels, l'empennage arrière permet de contre carrer cette tendance. Les ailes delta n'en possédant pas, Il faut donc en conclure que ce genre de profil ne leur convient pas.

Heureusement les profils autostables arrivent à notre rescousse. Ce type de profil se distingue des autres par son réflexe au bord de fuite.



schéma 5: Profil autostable

Ce réflexe permet d'inverser le sens de déplacement du centre de poussée. Ce qui veut dire que lorsque l'incidence de l'aile augmente, le centre de poussée recule et il avance si l'incidence diminue. Le déplacement du centre de poussée tend donc à s'opposer aux changements d'incidence de l'aile et produit donc la stabilité en tangage recherchée.

Evidemment, comme rien n'est jamais parfait, cette stabilité se fait au détriment de la portance du profil qui est nettement moins élevée que pour les autres profils. Cette perte de performance entraîne une vitesse minimum sur trajectoire plus importante et des caractéristiques en virage moins bonnes, ce qui est pénalisant pour l'exploitation des thermiques.

Parachutage lors d'un décrochage :

Nous avons vu plus haut que lors d'un décrochage, les filets d'air le long de l'extrados passent du régime laminaire au régime turbulent et que l'avion perd beaucoup de portance et de vitesse. A ce moment, l'aile ne vole plus et son comportement devient imprévisible.

Le comportement le plus probable est une phase de parachutage pendant laquelle l'aile entre en oscillation menant à une série de loopings. Pour vous donner une idée plus précise, lâchez d'assez haut une feuille de papier ou regardez tomber une feuille d'arbre.

Pour éviter ce genre de mésaventure, les ailes delta sont étudiées pour partir en piqué tout de suite après un décrochage. Ce piqué permet à l'aile de reprendre une vitesse de vol normale et de faire recoller les filets d'air sur son extrados.

Pour ce faire les ailes delta sont en forme de... delta ! et leur profil comporte un vrillage en bout d'aile.

Le vrillage est fait de façon à ce que l'incidence du profil soit plus faible en bout d'aile qu'au centre de l'aile. Le fait que les bouts d'ailes soient plus piqueur que le centre permet de retarder le décrochage de ces bouts d'ailes par rapport au centre.

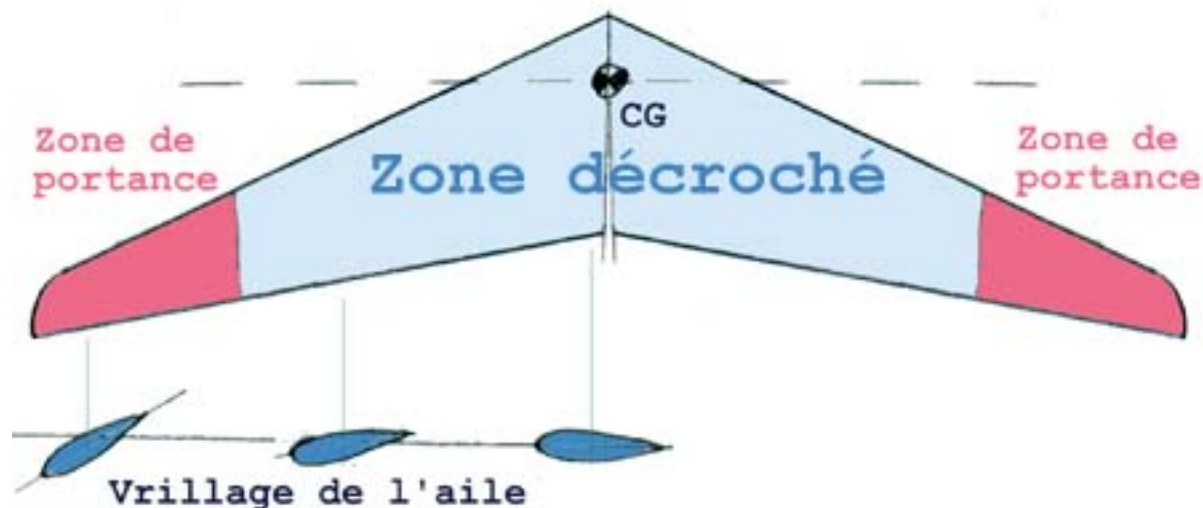


schéma 6: Portance en bout d'aile

Attention ce schéma est loin d'être fidèle à la réalité, les limites entre les parties décrochées de l'aile et celles qui ne le sont pas ne sont pas aussi franches que sur mon dessin. En fait, la portance croit au fur et à mesure que l'on se rapproche des bouts d'aile !

Par exemple imaginons que l'angle de décrochage d'un profil utilisé sur un aéronef soit de 35 degrés et que cet aéronef possède un vrillage en bout d'aile de -5 degrés. Lorsque le pilote cabre cette aile à 35 degrés, le centre de l'aile, se trouvant à 35 degrés par rapport aux filets d'airs, décroche. Par contre, grâce au vrillage négatif, les bouts d'ailes ne feront qu'un angle de $35 - 5 = 30$ degrés, et de ce fait continueront à voler, c'est à dire exerceront une force de portance vers le haut. Le décrochage est donc bien retardé en bout d'aile. Bon, oui d'accord, mais alors ? Bonne question ! Alors c'est là qu'intervient la forme en delta des ailes delta !

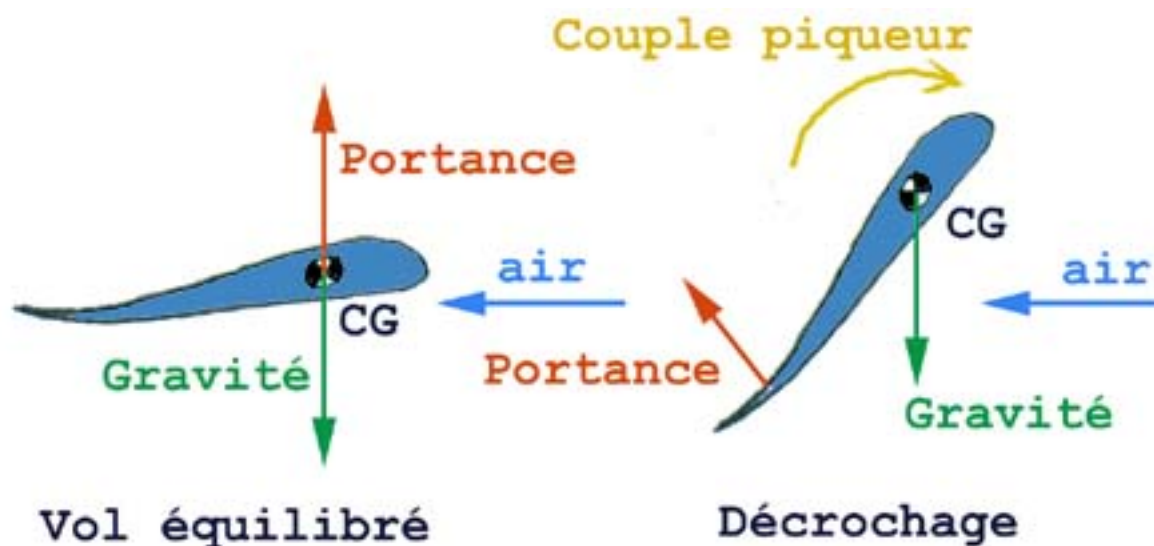


schéma 7: Origine du couple piqueur au décrochage

Cette forme particulière fait que les bouts d'ailes se situent en arrière du centre de gravité de l'aéronef. Comme ils sont les seuls à porter lors d'un décrochage, ils exercent un couple qui tend à faire piquer l'aile, but ultime de la manoeuvre !



5. D'où vient l'énergie du vol ?

C'est vrai ça ! qui fournit l'énergie qui fait avancer les aéronefs qui n'ont pas de moteur ? La réponse est variable, ça peut être votre voiture, vos jambes, un ULM un avion ou un télésiège !

Je m'explique : lorsque vous montez au décollage avec votre aile sur le toit, vous, votre voiture, votre aile et tout ce que vous transportez avec vous acquiert de l'énergie. Cette énergie s'appelle l'énergie potentielle (E_p), c'est à dire l'énergie de hauteur. Lorsque vous soulevez une masse m verticalement d'une hauteur H , son énergie potentielle est $E_p = mgH$ (avec g = attraction terrestre). Quand vous relâchez cette masse, cette énergie se transforme en énergie cinétique (E_c) c'est à dire de vitesse $E_c = 1/2 mV^2$ (avec V = vitesse de la masse) la masse retombe verticalement en accélérant. C'est cette énergie que vous ressentez lorsque vous recevez la masse sur le pied !

C'est ce qui se passe avec un planeur par exemple : un avion le tracte jusqu'à une certaine altitude, il lui fournit une E_p , puis lorsque le planeur est largué, il transforme son E_p en E_c . Evidemment, il ne retombe pas verticalement comme une masse; grâce à ses ailes, il transforme cette vitesse verticale en vitesse presque horizontale.

Lorsqu'un aéronef plane en ligne droite, sans accélérer, ni ralentir, il est en équilibre. Cela veut dire que la somme des forces qui lui sont appliquées est nulle.

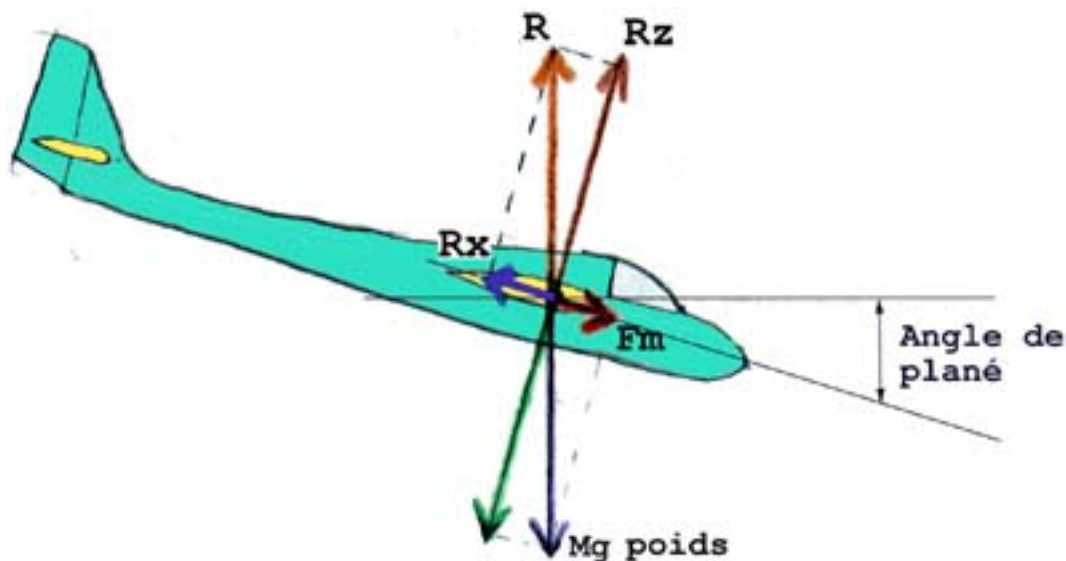


schéma 9: Force lors du vol équilibré

Sur le dessin ci-dessus, on retrouve les forces impliquées dans la portance (voir le schéma 2). La réaction de l'aile, en orange noté R est décomposée en une force de portance R_z en rouge et une force de traînée R_x en bleu.

A ces forces viennent s'ajouter le poids du planeur en violet, noté Mg (masse par accélération). Cette force est décomposable en deux autres : une en vert qui vient s'opposer à la portance R_z et une en rouge notée F_m (force motrice) qui vient s'opposer à la traînée. Vous remarquez que F_m est dirigée vers l'avant du planeur, c'est elle qui le tire et le fait avancer d'où son nom.

Il y a une donnée très importante à tirer de cette partie. On vient de voir que les aéronefs sans moteur avancent en transformant leur altitude en vitesse. Que se passe-t-il si, plutôt que de descendre, on veut monter pour allonger son vol ? Pour cela le pilote cabre un peu son aile qui restitue son énergie de vitesse en altitude. Comme rien ne se perd et rien ne se crée, si la vitesse est transformée en altitude, le planeur monte en perdant cette vitesse. Nous avons vu dans la partie sustentation qu'une aile avait besoin de vitesse pour porter. Sans cette vitesse elle décroche et l'aéronef pat en piqué pour la reprendre. C'est ce qui se passe lorsque l'on cherche à monter avec un planeur, la vitesse diminue et il finit par décrocher et donc redescendre.

Il en ressort donc qu'un aéronef sans moteur ne peut que descendre par rapport à l'air.

Mais alors comment fait on pour voler des heures sans pour autant décoller d'une hauteur stratosphérique ?

C'est simple, j'ai dit qu'un planeur ne peut que descendre par rapport à l'air. Si cet air monte plus vite que le planeur ne descend, il monte aussi ! Par exemple imaginons que vous êtes sous un delta qui descend à un mètre par seconde dans l'air. Si vous entrez dans de l'air qui monte à un mètre par seconde, $-1 + 1 = 0$ vous ne descendez pas, ni ne montez. Si cet air monte à deux mètres par seconde $-1 + 2 = 1$ vous montez à un mètre par seconde et le tour est joué. En vol, il n'est pas rare de rencontrer des ascendances qui nous font monter à 4 ou 5 m/s parfois plus !

6. Critères de performances

Quels sont les critères qui font d'une aile un fer à repasser ou une machine de compétition ?

Ils sont au nombre de quatre :

- Pour exploiter au mieux les ascendances il faut que l'aile puisse descendre doucement (**taux de chute mini**)
- Pour faire des vols de distance, il faut pouvoir faire le plus de distance horizontale en partant d'une altitude donnée (**finesse**).
- Il faut que l'aile ait une grande plage de vitesse.
- Et pour terminer, il faut que son maniement ne demande pas une débauche inconsidérée d'énergie de la part du pilote (**maniabilité**).

● La maniabilité

Ce critère est difficilement quantifiable, il est aussi un peu subjectif et des personnes différentes apprécieront différemment la maniabilité d'une même aile. Je ne m'étendrai donc pas sur ce sujet. Simplement il faut savoir que les constructeurs doivent trouver un compromis entre la stabilité et la maniabilité de leur aile. En effet, plus une aile est stable moins elle est maniable et inversement. On ne peut pas rendre une aile complètement instable car elle serait incontrôlable et dangereuse; de même, une aile trop stable ne tournera que très difficilement ce qui n'est pas bien mieux.

● Le taux de chute mini

Ce critère donne la vitesse minimum de descente d'une aile par rapport à l'air. C'est un critère important pour l'exploitation des thermiques. Pour les raisons expliquées à la fin de la partie 'Energie du vol', ce taux de chute mini conditionne la capacité de l'aile à monter rapidement dans les ascendances ainsi que celle à exploiter les ascendances faibles. Le taux de chute mini est exprimé en mètre par seconde et il se situe entre environ 1 et 0.8 m/s et pour les deltas, parapentes et rigides. Les planeurs ont un taux de chute mini tournant autour de 0.5 m/s.

● La finesse

La finesse d'une aile n'a rien à voir avec son élégance ! En fait elle exprime la distance que peut parcourir une aile en fonction de son altitude de départ. Cette valeur n'a pas d'unité puisqu'elle est calculée en faisant le rapport de la distance parcourue sur l'altitude de départ. Par exemple une aile qui décolle d'une altitude de 100 mètres et qui parcourt un kilomètre a une finesse de $1000/100 = 10$. Bien sûr ces mesures doivent impérativement se faire en air calme, car s'il y a du vent ou des ascendances, ça ne veut plus rien dire !

Pour donner un ordre d'idée voici les plages de finesses maximums respectives de quelques aéronefs :

- Parapentes : entre 5 et 8.
- Deltas : entre 9 et 12.
- Rigides : entre 15 et 25.
- Planeurs : entre 30 et 60.

● La plage de vitesse

Là on parle de vitesse sur trajectoire, c'est à dire vitesse horizontale (presque). Cette plage à deux valeurs extrêmes : la vitesse minimum qui correspond au décrochage et la vitesse maximale qui correspond au seuil de rupture de l'aile (aux coefficients de sécurité près !).

Plages des vitesses respectives de quelques aéronefs :

Parapentes : entre 20 et 45 Km/h.

Deltas : entre 30 et 100 Km/h.

Rigides : entre 30 et 170 Km/h.

Planeurs : entre 80 et 280 Km/h.

7. La polaire d'une aile

En fait, connaître la vitesse maxi, le taux de chute mini et la finesse d'une aile ne suffit pas pour évaluer correctement ses performances. Pour se faire une idée plus précise, il faut pouvoir les lier entre eux. Je m'explique : mettons que je vous fabrique un delta et je vous dis qu'il a une finesse de 12, un taux de chute mini de 0.8 m/s et une plage de vitesse variant de 30 à 100 Km/h. Vous me répondez pas de problème j'achète ! C'est dommage pour vous car ce que je ne vous ai pas dit c'est que le taux de chute mini de mon aile s'obtient à 70 Km/h et que la finesse maximum s'obtient à 35 Km/h (oui j'utilise un profil très bizarre sur mon aile !) Bon c'est vrai que ce n'est pas possible mais

c'est pour vous faire remarquer qu'à 70 Km/h vous enroulerez difficilement les thermiques et que pour ce qui est des transitions à finesse maxi... faut pas être pressé...

Heureusement ces informations sont regroupées sur une seule et même courbe qu'on appelle la polaire (non c'est pas une étoile).

Voici comment elle se présente:

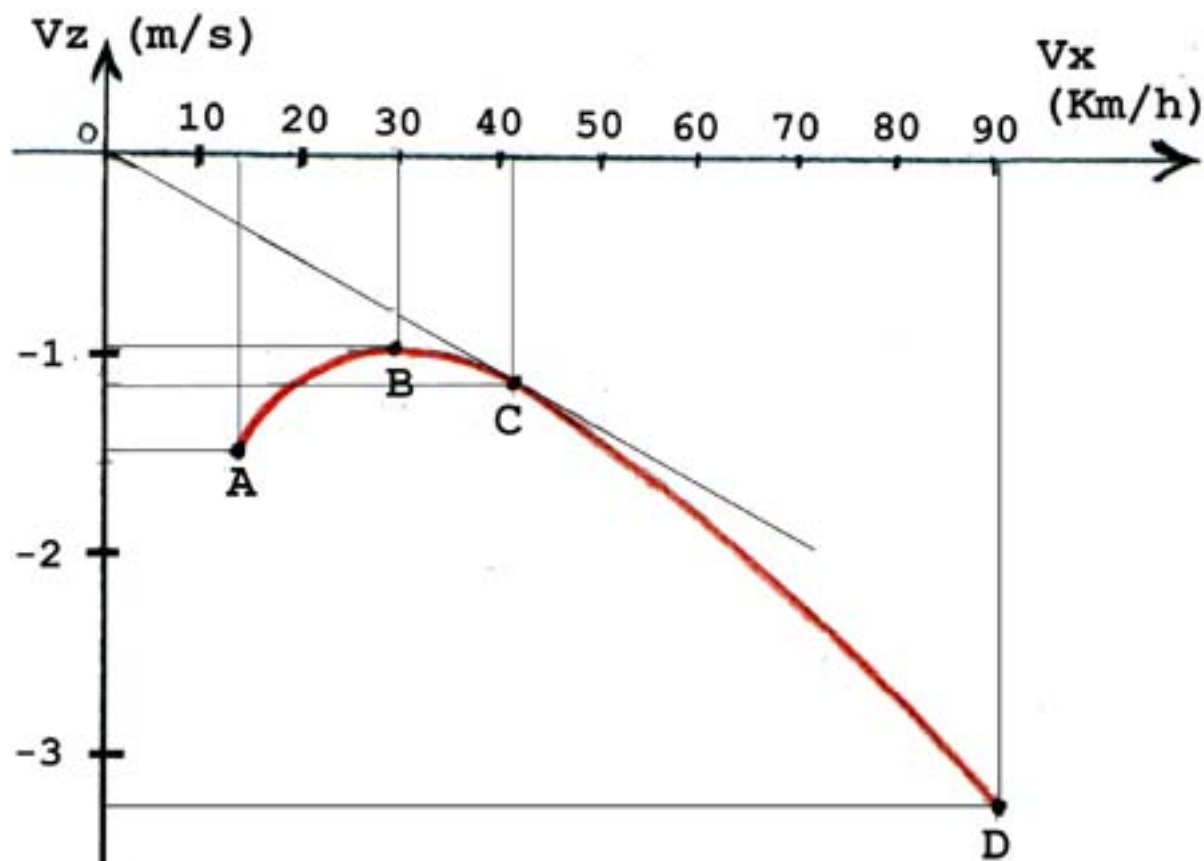


schéma 10: La polaire d'une aile.

Cette courbe exprime la vitesse verticale de l'aile V_z en fonction de sa vitesse horizontale V_x .

Grâce à elle on peut résumer les performances d'une aile avec quatre points particuliers :

- Le point A correspond à son seuil de décrochage.
- Le point B correspond à son taux de chute minimum.
- Le point C correspond à sa finesse maximale.
- Le point D correspond à la vitesse maximale.

Qu'apprend-t-on donc sur cette aile ?

- Elle décroche à la vitesse de 13 Km/h
- Son taux de chute mini est de 1 m/s et s'obtient à la vitesse de 30 Km/h
- Sa finesse max est obtenue à 41 Km/h et son taux de chute est alors de 1.1 m/s
- Sa vitesse maximale est de 90 Km/h

Bon et la valeur de la finesse max on la trouve où ? Elle n'est pas directement lisible sur la courbe, il faut la calculer et c'est très simple.

Il suffit de diviser la vitesse correspondante au point de la finesse max avec le taux de chute de ce même point (attention aux unités quand même).

Dans notre cas, la vitesse horizontale correspondant au point C est de 41 Km/h (environ 11 m/s) et le taux de chute correspondant est de 1.1 m/s. Cela donne $11 / 1.1 = 10$ de finesse.

Vous pouvez aussi vous amuser à calculer la finesse des autres points caractéristiques de la courbe tout en sachant que j'ai tracé cette polaire plus au moins au pif, donc elle ne correspond pas à la polaire d'une aile réelle.



[Retour à la page Vol Libre](#)

[\[Plan du site\]](#)