

# RESULTANTE AERODYNAMIQUE ET CENTRE DE POUSSEE POUR UN PROFIL

## 1 Mise en évidence des forces aérodynamiques

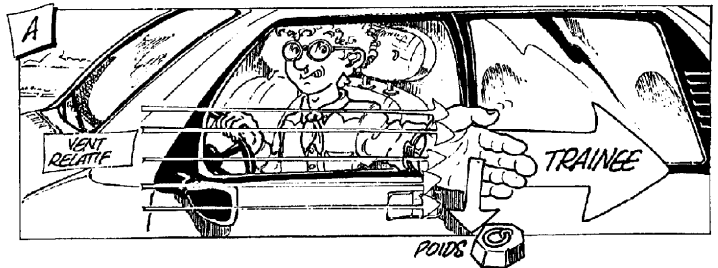
Les notions, plus ou moins intuitives, de portance et de traînée peuvent être expliquées par l'analogie des effets du déplacement dans l'air d'une main avec ce que subit une aile durant son vol.

En roulant en voiture, sortons la main par la fenêtre. La main placée perpendiculairement au vent, paume vers l'avant, est attirée vers le bas par son poids et vers l'arrière par cette force qu'on a appelée "traînée".

A partir de cette position, remontons légèrement vers l'arrière le bas de la main : la sensation de poids diminue et l'effort vers l'arrière est moindre. La traînée a diminué et une nouvelle force opposée au poids, la "portance", est apparue : la main pèse moins lourd.

En roulant plus vite et en gardant la même position pour la main, cette portance peut aller jusqu'à annuler le poids de cette dernière.

MISE EN VALEUR DE LA TRAINEE



MISE EN VALEUR DE LA PORTANCE

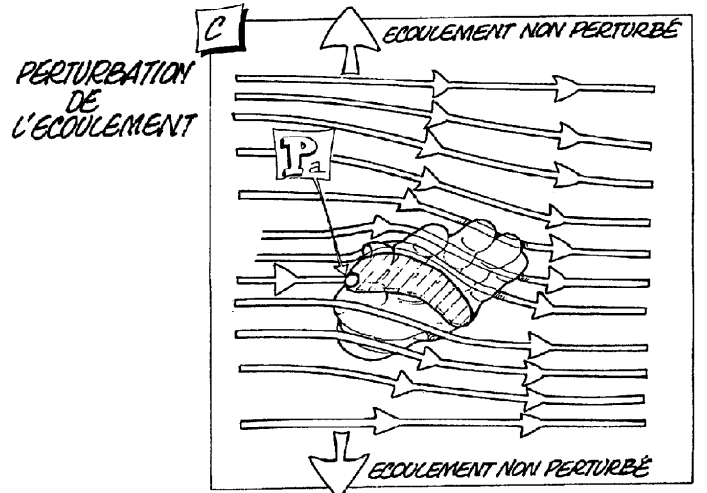
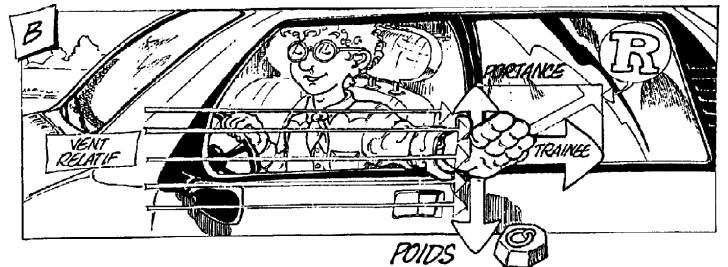


Figure 1 : Les forces aérodynamiques

Si l'on incline la main dans l'autre sens, en dépassant la position horizontale (l'avant de la main est plus basse que l'arrière) : la sensation de poids réapparaît fortement augmentée, l'effort vers l'arrière lui, reste moins important qu'avec la main perpendiculaire au vent.

On peut déjà noter que la portance et la traînée prennent des valeurs différentes suivant l'inclinaison de la main.

## 2 Les effets de l'écoulement de l'air

Que se passe-t-il au niveau de la main ?

Pour cela, approchons-nous d'elle et regardons l'écoulement de l'air autour d'une tranche de celle-ci. Les phénomènes physiques que nous allons observer sont tout à fait analogues à ceux qui se produisent autours du "profil" d'une aile.

L'écoulement est séparé en deux : une partie des filets d'air passe au-dessus, l'autre partie au-dessous, la limite se faisant au "point d'arrêt".

### 2.1 Forces de frottement

Les filets d'air génèrent sur la peau des **forces tangentielles** (parallèles à la surface) **de frottement** opposées au déplacement qui ne dépendent que de l'état de surface et de la viscosité de l'air.

Même si la valeur de cette viscosité est beaucoup plus faible que celle de l'huile par exemple, elle est suffisante pour que les particules d'air qui touchent la surface de la main y restent "collées".

Il faudra s'écarter de la surface de la main pour voir la vitesse de l'écoulement augmenter peu à peu et retrouver sa valeur initiale.

L'épaisseur très faible d'air où cette vitesse d'écoulement varie s'appelle la "couche limite". Elle a une épaisseur de quelques millimètres sur une aile de planeur.

C'est pour sortir de cette couche limite que les entrées d'air du RAFALE sont écartées du fuselage et séparées de celui-ci par un "piège à couche limite".

### 2.2 Forces de pression

Ces mêmes filets d'air génèrent également des **forces normales** (perpendiculaires à la surface) **de pression**.

Si la pression était uniforme autours de la surface de la main, toutes ces forces s'équilibreraient mathématiquement en donnant une résultante nulle. Ce n'est pas le cas : le passage de la main a perturbé le champs des pressions.

Cette modification du champ des pressions s'explique par le fait que la trajectoire des particules d'air n'est plus rectiligne mais déviée par l'obstacle. Cette déviation de l'écoulement s'accompagne d'une augmentation (respectivement diminution) de pression perpendiculairement à l'écoulement dans le sens d'une concavité (respectivement convexité) croissante.

Plaçons-nous à une distance suffisante de la main pour ne plus ressentir dans l'écoulement les effets de sa présence et approchons-nous d'elle, dans un premier temps par au-dessus, et dans un second temps par en dessous. L'avant de la main étant plus haute que l'arrière de la main :

- quand on descend vers la main, la convexité de la déviation des filets d'air augmente. La pression diminue donc en s'approchant de la peau. Le dos de la main subit une dépression, il est aspiré vers le haut,
- quand on s'approche de la paume, les filets d'air s'incurvent de plus en plus dans le sens concave. La pression augmente donc en s'approchant de la surface. La paume est en surpression, elle est poussée vers le haut.

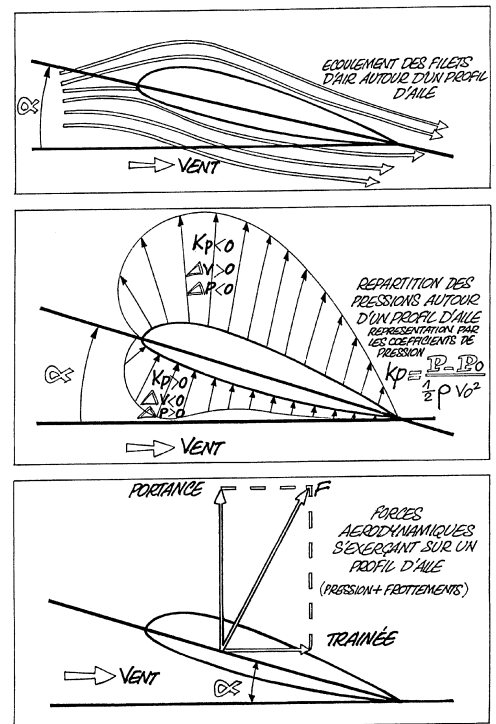
En outre, à l'extérieur de la couche limite, l'écoulement en surpression est ralenti, et l'écoulement en dépression accéléré.

## 2.3 Résultante aérodynamique et Centre de Poussée

On appellera **Résultante Aérodynamique** la somme de tous les éléments de forces tangentielles et normales que subit la main. Cette force, comme réduction d'un torseur, est en fait un vecteur porté par une droite. On décide arbitrairement de l'appliquer en un point : le **Centre de Poussée**, où cette droite coupe la corde de référence (on définira cette dernière par la suite).

La **traînée** est la projection de cette résultante sur la direction de l'écoulement non perturbé (également direction de la vitesse de la main). Les forces de frottement n'interviennent globalement que dans cette composante.

Figure 2 : La résultante aérodynamique



La **portance** est la projection de cette résultante sur la direction perpendiculaire à celle de l'écoulement non perturbé. Les forces de pressions interviennent principalement dans cette composante.

Néanmoins, les effets de la pression (et surtout de la dépression, plus que la surpression) sont largement prépondérants sur les frottements. Le peu de force de pression qui intervient dans la traînée a donc une grosse influence sur la valeur de celle-ci.

Le rapport entre la portance et la traînée est appelé  **finesse**  du profil. Il caractérise le "rendement" du profil. Un rapport maximum de l'ordre de 60 entre la traînée et la portance sur les profils d'aile de planeur.

## 3 Autres définitions

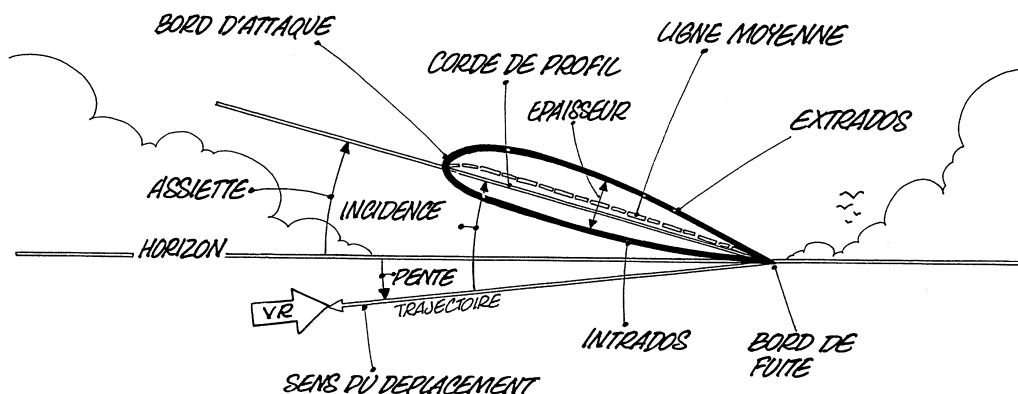


Figure 3 : Définitions aérodynamiques

On appelle **corde aérodynamique** pour un profil, la ligne imaginaire qui rejoint le **bord d'attaque** (le pouce dans l'exemple de la main) et le **bord de fuite** (l'auriculaire). Le centre de poussée est arbitrairement choisi sur cette ligne.

On définira l'angle entre la direction de l'écoulement non perturbé (ou de la vitesse de déplacement qui est la même direction) et cette corde aérodynamique, comme étant l'**angle d'incidence**.

On parlera aussi d'**assiette** d'un profil pour définir l'angle entre le plan horizontal et la corde aérodynamique du profil.

La différence entre l'assiette et l'incidence est appelée la **pente** de la trajectoire. C'est donc l'angle entre le plan horizontal et la vitesse de déplacement (direction de l'écoulement non perturbé).

Par exemple, pour une voiture roulant sur un sol horizontal (sans pente) : l'assiette et l'incidence de la main sont confondues. Pour cette même voiture gravissant une montée, si la main est dans la même position par rapport à la voiture :

- son incidence n'a pas varié,
- son assiette a par contre augmenté,
- la différence entre les deux est égale à la pente de la montée.

On caractérise l'écoulement autour d'un profil par la représentation de la répartition des pressions le long de celui-ci.

Cette représentation s'appelle le **spectre des pressions**.

#### 4 Influence de l'incidence sur la résultante aérodynamique

On a vu précédemment qu'en changeant l'angle que fait la main avec le vent, on modifiait la portance et la traînée, pourquoi ?

La forme de l'écoulement autour du profil varie avec l'incidence de ce dernier. Elle modifie donc la répartition des pressions sur la peau de la main :

- à incidence nulle : la portance est quasiment nulle (les filets d'air sont peu déviés, les surpressions et dépressions sont faibles), la traînée est faible,
- à moyenne incidence : la déviation des filets d'air crée des surpressions et dépressions, la portance augmente ainsi que la traînée,
- à incidence plus forte, des tourbillons apparaissent à l'arrière de l'extrados. La viscosité de l'air fait que les filets d'air n'ont plus assez d'énergie pour rester collé au profil, ils décrochent en formant des tourbillons qui ont une position aléatoire. Ceux-ci génèrent, à un instant donné, une surpression sur la peau, puis à l'instant suivant une

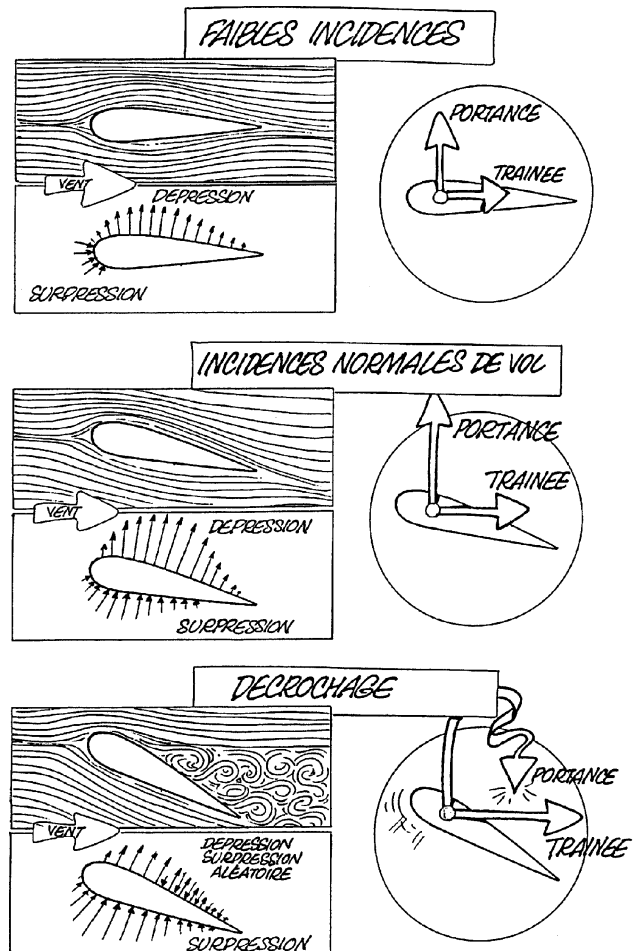


Figure 4 : Influence de l'incidence

dépression au même endroit. La portance varie dans le temps, le profil est "décroché" et ne peut plus assurer sa sustentation (équilibre poids / portance).

Pour chaque type de profil, on caractérise ses performances par la connaissance de deux coefficients sans dimension qui varient en fonction de l'incidence de l'écoulement :

- le coefficient de portance :  $C_z$
- le coefficient de traînée :  $C_x$

Ces coefficients ne dépendent que de la forme du profil et de l'incidence de l'écoulement. On peut également s'intéresser à la courbe  $C_z$  ( $C_x$ ), obtenue en faisant varier l'incidence. Cette courbe s'appelle la "polaire" du profil.

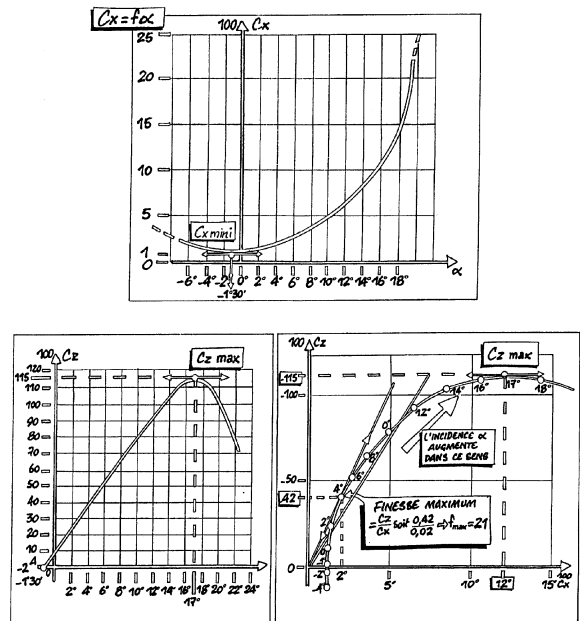


Figure 5 : Caractéristique d'un profil

Chaque type de profil aura donc des performances spécifiques caractérisées par les courbes  $C_x$  et  $C_z$  fonctions de l'incidence, par exemple :

- ♦ des profils minces à faible portance même aux fortes incidences mais faible traînée aux faibles incidences, pour les chasseurs,
- ♦ des profils épais à forte portance et traînée moyenne pour les avions de ligne,
- ♦ des profils laminaires (la zone d'écoulement turbulent est très en arrière du profil) à très forte portance aux basses vitesses et très faible traînée vers 150 / 200 km/h, pour les planeurs,
- ♦ etc.

## 5 Autres facteurs d'influence sur la résultante aérodynamique

On a vu que l'incidence était un facteur déterminant sur la valeur de la portance et de la traînée.

D'autres facteurs interviennent :

- la vitesse de l'écoulement (ou de déplacement du profil) qui influe par son carré sur la résultante aérodynamique.
- la surface de référence  $S_{\text{réf}}$  de l'objet se déplaçant (l'effort ne sera pas le même avec une main nue et une main avec un gant de base-ball).
- la masse volumique  $\rho$  du milieu ambiant (l'effort ne sera pas le même avec une main dans l'eau et une dans l'air à 4000 m).



Figure 6 : Autres facteurs d'influence aérodynamique

Les quatre facteurs influent non seulement sur la valeur de la résultante aérodynamique, mais également sur la position de son centre de poussée.

Les forces aérodynamiques s'expriment simplement en fonction de ces paramètres :

- **Portance** =  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_z \cdot S_{\text{réf}} \cdot V^2$
- **Traînée** =  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot S_{\text{réf}} \cdot V^2$

Les essais en soufflerie permettent de connaître les performances d'un profil. On place dans une veine, parcourue par de l'air de masse volumique  $\rho$  s'écoulant à une vitesse  $V$ , un morceau d'aile à profil constant. Ce morceau d'aile a une surface  $S_{\text{réf}}$  que l'on peut définir arbitrairement comme surface de sa projection sur un plan horizontal.

On est alors capable, en mesurant par une "balance aérodynamique" les valeurs des forces portance et traînée pour différentes incidences, de construire les courbes  $C_z$  et  $C_x$  caractéristiques des performances du profil.

## 6 Effets des gouvernes de voilure

Par rapport à ces quatre paramètres d'influence sur la résultante aérodynamique, seuls deux seront utilisés pour le pilotage de l'avion :

- on va modifier le profil : avec l'utilisation des gouvernes, becs, aérofreins...,
- on va, en plus, jouer sur la surface : comme les volets à recul des avions de ligne,

ce qui permettra d'en modifier un troisième fondamental pour le pilotage : l'incidence.

Tous ces éléments mobiles qui déforment le profil ou la surface de l'aile ou des empennages sont appelées **gouvernes**.

Les effets de ces gouvernes sur un profil pourront être mesurés de la même façon que le profil seul en soufflerie. On obtiendra alors des courbes  $C_x$  et  $C_z$  pour chaque valeur de braquage d'une gouverne.

### **6.1 Effet aérodynamique d'une gouverne de bord de fuite**

Le braquage  $\delta$  de la partie arrière du profil (aileron, élevon, volet de courbure ou gouverne de profondeur) vers le bas a pour effet de creuser le profil et donc d'augmenter les forces de pression.

L'effet global sur le profil est :

- une translation de la courbe  $C_z$  ( $\alpha$ ) vers le haut,
- une augmentation de la traînée,
- une dégradation de la finesse.

L'effet est le même si l'on braque d'un côté ou de l'autre le drapeau.

Le braquage vers le haut (aileron, élevon ou gouverne de profondeur) masque la partie arrière du profil et diminue les forces de pression et de frottement.

L'effet global est :

- une diminution de la traînée,
- une diminution de la portance.

### **6.2 Effet aérodynamique d'un dispositif de bord d'attaque**

Le dispositif consiste à cambrer le bord d'attaque pour diminuer le gradient angulaire de l'écoulement (becs basculants) ou à réactiver l'écoulement extradados déficient par un piquage de l'air de l'intrados vers l'extrados (becs à fente).

L'effet obtenu permet de prolonger la courbe  $C_z$  ( $\alpha$ ).

On obtient un meilleur  $C_z$  max. mais au prix d'une plus forte incidence (problème de la visibilité en approche).

#### **6.2.1 Effet aérodynamique de l'aérofreinage**

L'aérofreinage consiste à augmenter le  $C_x$  sans perturber le  $C_z$ .

Entre la plaque d'aérofrein et la peau de l'extrados, il est ménagé un espace pour laisser l'écoulement se faire et modifier le moins possible les forces de pression.

L'effet obtenu par un aérofrein est une translation de la polaire le long de l'axe des  $C_x$ . Celui obtenu pour les spoilers est une dégradation globale de la polaire (diminution de portance, augmentation de traînée).