

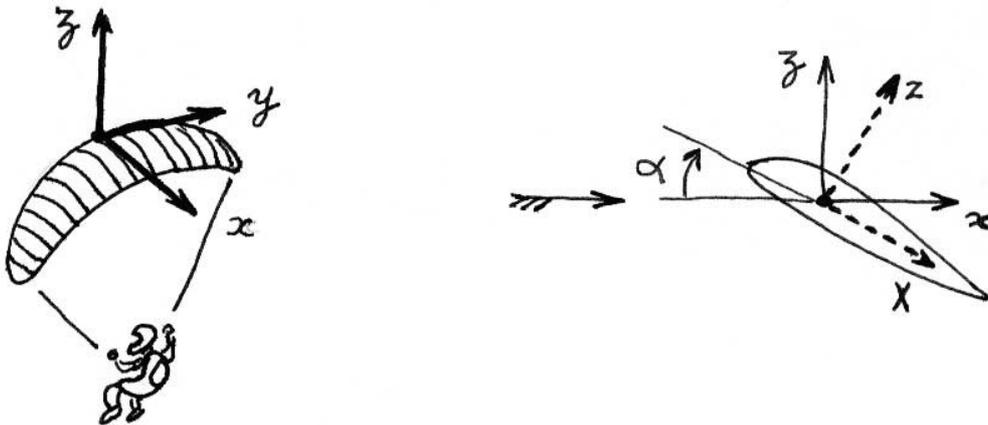


Aero et MécaVol pour les nuls

Une petite question :

Avant d'aborder l'origine des forces de traînée, que l'on peut caractériser comme chacun sait par le coefficient " C_x " (Citroën avait judicieusement donné ce nom à l'un de ses modèles de prestige, très étudié sur le plan aérodynamique !), une petite précision suite à la demande d'un lecteur : "***pourquoi le coefficient de portance est-il couramment nommé C_z , et le coefficient de traînée C_x ?***". C'est tout bonnement une question de conventions, les objets volants étant représentés traditionnellement dans un espace (x,y,z) , x vers l'arrière de l'aéronef, y dans la direction de l'aile droite, et z vers le haut. Les coefficients de portance et de traînée résultent de la décomposition des forces sur l'axe z et l'axe x , d'où C_z et C_x . Une portance latérale serait notée " C_y ", en cas de dérapage par exemple.

Pour préciser, il est commode d'utiliser 2 systèmes d'axes différents, selon qu'on se réfère à l'aéronef ("axes avion") ou bien au courant d'air ("axes vent"). Les coefficients C_z et C_x sont traditionnellement calculés ou mesurés en "axes vent" (figure 1). Cela s'explique simplement, en général dans une soufflerie, c'est la maquette qui est mise en incidence, la soufflerie ne bouge pas... Bien sûr la connaissance des coefficients dans un système d'axes permet de les obtenir dans l'autre système d'axes.



Les forces de traînée :

Nous l'avons vu dans la chronique précédente, tout objet plongé dans un fluide en mouvement modifie l'écoulement de ce fluide et devient le siège de forces appliquées du fait de cette modification. Une première approche permet de comprendre l'origine des forces de portance, mais ne rend pas compte des forces de traînée. Si le fluide est un fluide réel, visqueux, des forces supplémentaires sont appliquées à l'objet :

1. les forces de viscosité, qui rendent compte du frottement des molécules d'air sur l'objet, au sein de la zone de faible épaisseur appelée "couche limite" autour de celui-ci.
2. les forces de pression, qui rendent compte des décollements et perturbations dans l'écoulement, si la forme de l'objet est mal adaptée. La traînée de pression est nulle en fluide parfait sans décollements

Ces deux traînées composent la traînée de forme.

Enfin, si l'objet génère une portance, une traînée supplémentaire appelée "traînée induite" (par la portance) est générée. Nous allons tout d'abord aborder l'origine physique et les conséquences de la viscosité dans la traînée de frottement.

La traînée de frottement :

Tout fluide (l'air, l'eau, la graisse, etc...) peut être caractérisé par sa viscosité dynamique, propension à contrer par frottement le glissement entre les couches successives du fluide. Si l'on emprisonne par exemple une épaisseur "e" de fluide entre 2 plaques de surface S, l'effort qu'il faudra développer pour mettre en mouvement l'une des plaques par rapport à l'autre sera d'autant plus élevé que la viscosité sera grande, la vitesse de déplacement élevée, et l'épaisseur "e" faible, ce qui s'écrit :

$$F = \mu \cdot S \cdot \left(\frac{V}{e} \right), \text{ avec : } F : \text{ force à développer}$$

$\mu \approx 1.5 \cdot 10^{-5}$: viscosité dynamique de l'air

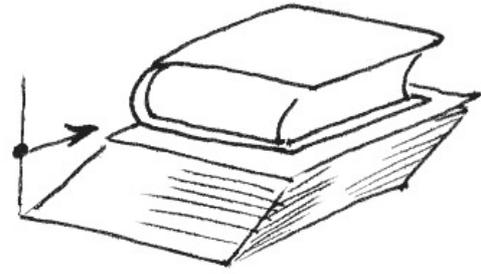
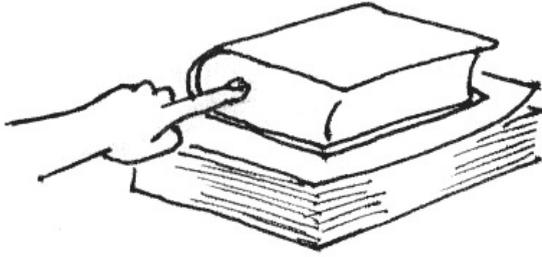
V : vitesse entre les 2 plaques

e : épaisseur entre les plaques

Le rapport V/e caractérise en fait la variation de vitesse (ou gradient) entre les couches successives du fluide, et peut être noté $\frac{\partial V}{\partial e}$. Plus cette variation est rapide, plus l'effort est important (figure 2).



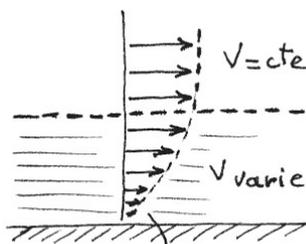
Une expérience simple (figure 3) permettant la compréhension peut être réalisée en posant une pile de feuilles de papier sur une table, surmontée par un gros dictionnaire... ou un Traité d'Aérodynamique. La viscosité est représentée par le coefficient de frottement entre 2 feuilles. Pousser le dictionnaire sera d'autant plus aisé que la pile sera épaisse, et la vitesse faible. Pour un même déplacement, si la pile ne contient qu'une feuille, toute la variation de vitesse sera prise en compte par cette feuille et tout le frottement sera transmis au dictionnaire. Si la pile contient 100 feuilles, chacune prendra en compte 1/100^e du déplacement et donc du frottement. Seule la dernière feuille transmettra ses efforts de frottement au dictionnaire, soit 1/100^e de l'effort précédent (le dictionnaire ne "voit" pas les autres feuilles).



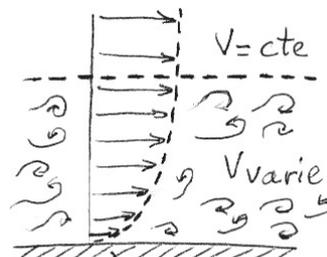
Si l'on remplace le dictionnaire par un profil, les feuilles par de l'air en mouvement, il est aisé de comprendre que seule la variation de vitesse de l'air à l'interface immédiat de la surface est importante pour caractériser l'effort de frottement. La seule différence est que dans le cas de l'air, et sans la présence d'une autre paroi, la loi de variation de vitesse n'est pas constante, et l'épaisseur de la couche sur laquelle la vitesse varie (dite "couche limite") dépend de la nature de l'écoulement. En chaque point de la surface de l'objet, on peut définir un coefficient de frottement C_f à partir de la force de frottement F , en divisant celle-ci par S . On obtient une expression équivalente à une pression "dans le sens de l'écoulement", dite contrainte tangentielle puisque parallèle à la surface de l'objet. Le coefficient de frottement local C_f est obtenu en rapportant cette expression à la pression dynamique $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$:

$$\tau_0 = \frac{F}{S} = \mu \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial e} \right)_0 \quad C_f = \frac{\tau_0}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2}$$

L'écoulement est dit "laminaire" lorsqu'il se comporte exactement comme la pile de feuilles. Il est dit "turbulent" lorsqu'une instabilité provoque un mélange des molécules d'air sous forme de petits tourbillons. Un écoulement laminaire peut très facilement devenir turbulent (naturellement, ou suite à une petite aspérité sur la surface du profil). On appelle ce changement de régime une "transition" laminaire-turbulent. A contrario, un écoulement turbulent ne peut pas redevenir laminaire. L'évolution typique des vitesses dans une couche limite laminaire ou turbulente est très différente, ainsi que le coefficient de frottement dépendant de cette évolution au voisinage de la surface (figure 4). On peut remarquer que la variation de vitesse est beaucoup plus faible au voisinage de la surface dans une couche limite laminaire que dans une couche limite turbulente. La conséquence directe est que le coefficient de frottement laminaire est typiquement 2 à 5 fois plus faible que le coefficient de frottement turbulent.



Variation lente
 C_f Faible
 Laminaire



Variation rapide
 C_f élevé
 Turbulent

Sur l'objet complet, la traînée de frottement est égale au coefficient de frottement moyen multiplié par la surface totale de l'objet en contact avec l'écoulement. Le coefficient de frottement moyen est égal à la moyenne des coefficients de frottement sur l'ensemble de l'objet. En conséquence, il est particulièrement intéressant de conserver un écoulement laminaire sur la plus grande partie de l'objet. D'où les états de surface "miroir" en vol à voile, malheureusement inaccessibles en parapente...

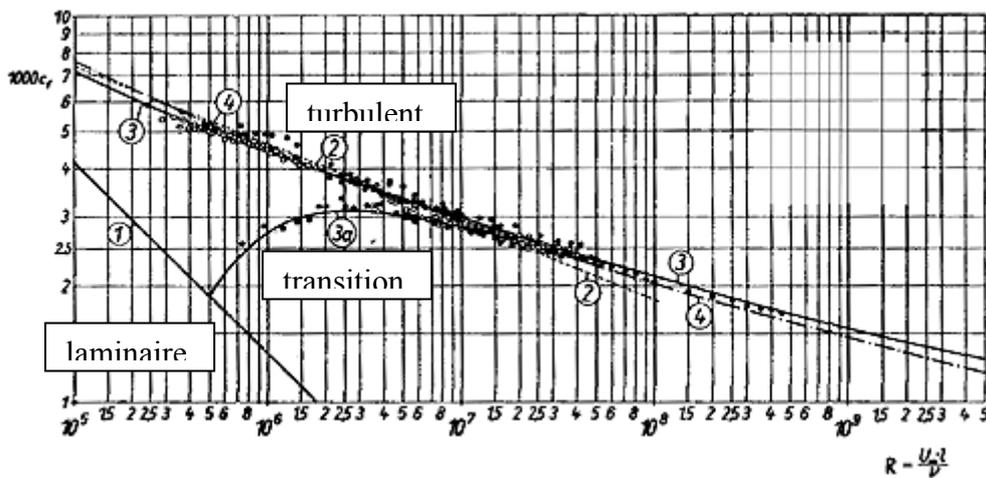
$$F_{x_{frott.}} = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_{tot} \cdot C_{f_{moy}}$$

Enfin, la valeur des coefficients de frottement laminaire ou turbulent, ainsi que la transition naturelle entre les 2 types d'écoulements, dépendent très fortement d'un nombre sans dimension, défini par Reynolds :

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}, \quad D \text{ étant une dimension caractéristique de l'objet, par exemple sa}$$

longueur, ou sa corde dans le cas d'un profil. Ce nombre caractérise "l'échelle" de l'objet par rapport à la viscosité du fluide. Dans le cas de l'air au niveau de la mer, l'expression peut être approximée : $Re = 70000 \cdot V \cdot D$.

Le coefficient de frottement, laminaire ou turbulent diminue avec le Reynolds, comme le montrent les courbes suivantes, mesures expérimentales sur une plaque plane :



La prochaine chronique traitera de la seconde composante de la traînée de forme, la traînée de pression.

