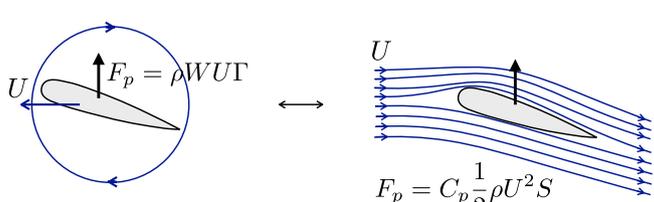


Ailes et voiles

Notes de cours: Chapitre 9.

À retenir:

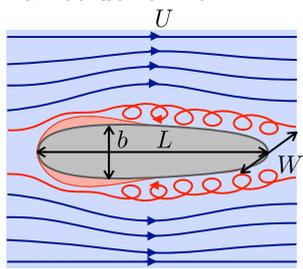
Portance



$F_p = \rho W U \Gamma$

$F_p = C_p \frac{1}{2} \rho U^2 S$

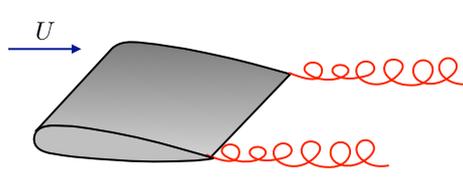
Trainée de forme



$Re \gg 1 + \text{décollement}$

$T = C_x \frac{1}{2} \rho U^2 S$

Trainée induite



$T_i = C_i \frac{1}{2} \rho U^2 S$

1 Comment faire voler un avion?

Dans le TD précédent, nous avons vu comment l'effet Magnus pouvait générer de la portance. Nous avons quantifié cette portance dans le cas d'un vortex de circulation Γ couplé à un écoulement autour d'un cylindre caractérisé par une vitesse à l'infini U . Cette expression généralisable à 2D (voir relation de Kutta-Joukowski dans les notes de cours) s'écrit de manière remarquablement simple:

$$F_p = -\rho \Gamma U$$

En théorie, il est ainsi possible de faire voler un avion doté d'ailes cylindriques tournantes. Les réalisations pratiques sont cependant limitées à quelques jouets ou à un prototype de bateau à mats cylindriques tournants. Comment donc fonctionne une aile d'avion qui ne tourne pas?

1.1 Circulation induite par la couche limite

Regardons l'écoulement potentiel d'un fluide autour d'un profil d'aile classique sous légère incidence. Cet écoulement présente un point de stagnation au voisinage du bord de fuite qui n'est pas très "physique", le fluide effectuant des circonvolutions autour de ce point (Fig. 1 haut). En réalité, la friction du fluide autour de l'aile engendre en effet une circulation Γ . En se superposant à l'écoulement potentiel précédent, ce vortex amène le point de stagnation exactement au bord de fuite. Les lignes de courant sont alors dans l'alignement général de l'écoulement (Fig. 1 haut). Le détail de cet ajustement est complexe et ne fonctionne que

pour des incidences modérées (typiquement inférieures à 10°). Si l'incidence est trop forte, un décollement de la couche limite se produit et l'aile "décroche". En dessous de cet angle de décrochage, la circulation est proportionnelle au produit de U par la largeur de l'aile ℓ (la "corde", dans le langage aéronautique):

$$\Gamma = \frac{1}{2}C_p U \ell$$

où C_p est le coefficient de portance (C_L en anglais pour "lift"), ce qui conduit à une force de portance:

$$F_p = C_p \frac{1}{2} \rho U^2 L \ell$$

où L est l'envergure de l'aile (sa longueur). Dans un cas plus général, on remplacera le produit $L\ell$ par la surface de l'aile S . À cette force de portance perpendiculaire à l'écoulement, s'ajoute une force de traînée de forme dans la direction de l'écoulement. Cette force est caractérisée par le coefficient de traînée C_x (C_D en anglais pour "drag"):

$$T = C_x \frac{1}{2} \rho U^2 L \ell$$

Comment déterminer ces coefficients? Une forme d'aile est complexe et il faut faire appel à des simulations numériques (d'autant plus complexes que les écoulements sont turbulents) ou à des mesures expérimentales en soufflerie. On peut ainsi représenter les "polaires" de l'aile, c'est à dire l'évolution de C_p et de C_x en fonction de l'angle d'incidence α . Un exemple de polaire est illustré Fig. 2. Nous pouvons en particulier remarquer la variation linéaire de C_p avec α (pour des incidences modérées) que l'on retrouve dans la plupart des profils d'ailes.

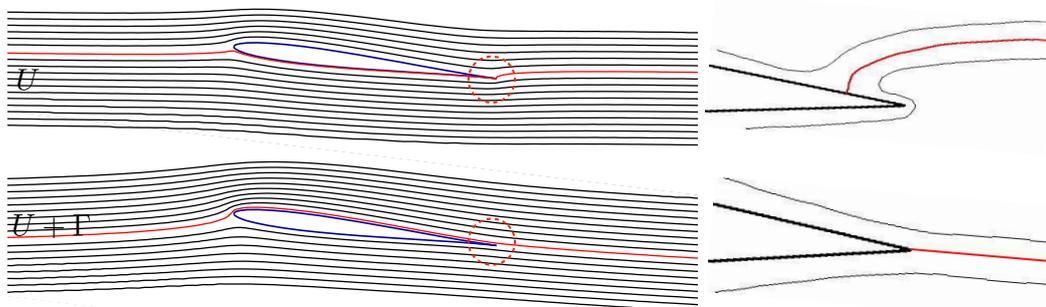


Figure 1: Écoulement potentiel sans circulation autour d'un profil d'aile légèrement incliné, ce qui engendre une singularité au niveau du bord de fuite. Cette singularité disparaît si un vortex de circulation adéquate s'ajoute à cet écoulement (tant que l'incidence reste limitée). Paradoxalement, c'est la couche limite visqueuse qui permet cet ajustement automatique.

1.2 Ça plane pour moi

Certains oiseaux marins comme les albatros sont d'excellents planeurs (Fig. 3). Néanmoins s'il n'a pas de moyen de se propulser, le planeur, aussi optimisé soit-il, finit inexorablement par rejoindre le sol.

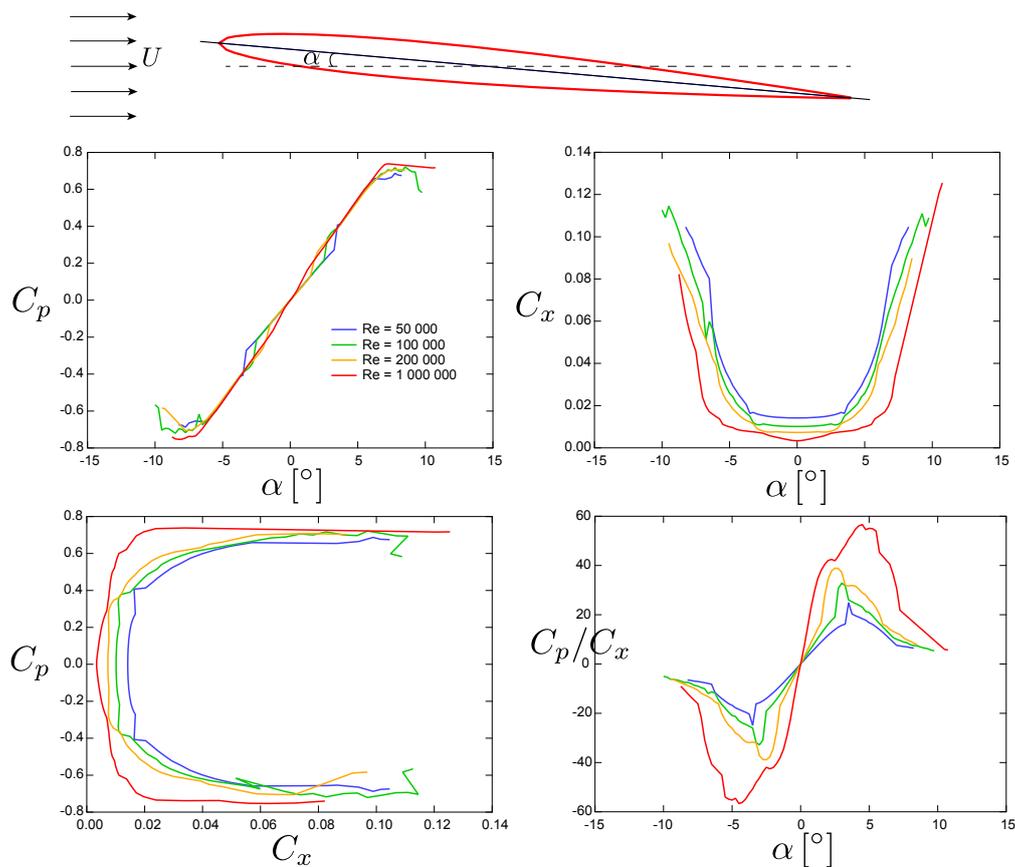


Figure 2: Polaires obtenues numériquement pour un profil d'aile symétrique NACA-6 à différents nombres de Reynolds. On peut observer la linéarité de C_p avec α pour des incidences modérées et le “décrochement” au-delà d'un angle d'incidence supérieur à $7 - 8^\circ$. La symétrie de cette aile impose la symétrie des profils, mais il existe bien d'autres profils non-symétriques dont on peut visualiser les caractéristiques sur le site: <http://airfoiltools.com/>

En supposant que l'angle d'attaque soit idéalement ajusté et que la contribution des forces aérodynamiques sur le corps du planeur soient négligeables, quel est l'angle de chute dans le cas le plus favorable?

Quelle est la vitesse de translation du planeur?

Application numérique pour l'aile illustrée Fig. 2 pour un planeur de masse 500 kg (avec pilote à bord) et une surface alaire de 15m^2 .

1.3 Tourbillons marginaux

La morphologie particulièrement élancée des ailes de planeurs ou des albatros est frappante. Une telle géométrie est elle particulièrement performante?

L'écoulement autour d'une aile d'envergure finie est plus complexe que la description 2D que nous avons jusqu'à présent évoquée. En effet, le théorème de Kelvin (voir notes de cours sur



Figure 3: Planeur et albatros. On remarquera l'élancement remarquable de leurs ailes.

les écoulements potentiels) nous indique que la circulation créée par la friction du fluide sur l'aile ne peut pas s'arrêter au bout de l'aile. Cette circulation est ainsi prolongée par deux lignes de tourbillons marginaux émises en bout d'aile. Si ces tourbillons ne se dissipent pas, ils formeraient une boucle fermée en rejoignant le tourbillon opposé à la circulation autour des ailes produit lors de la mise en mouvement de l'aile (voir notes de cours sur la portance et la traînée). La production de ces tourbillons marginaux conduit à une nouvelle forme de traînée, la traînée induite qui est importante dans tous les problèmes d'ailes.

Supposons que la circulation dans les tourbillons induits soit la même qu'autour de l'aile $\Gamma = \frac{1}{2}C_p U \ell$.

Quelle est l'énergie cinétique par unité de longueur contenue dans cette paire de tourbillons? (pour éviter des problèmes de divergence, nous utiliserons des "longueurs de coupure" pour l'intégration à ℓ pour les petites longueurs et L pour les grandes).

En déduire une expression pour la force de traînée induite T_i (qui va s'ajouter à la traînée de forme que nous avons déjà décrite).

Un calcul plus rigoureux qui prend en compte une répartition non uniforme de la circulation autour de l'aile conduit à l'expression classique:

$$T_i = C_i \frac{1}{2} \rho U^2 L \ell \quad \text{avec} \quad C_i = \frac{C_p^2}{\pi e L / \ell}$$

où e est un facteur d'efficacité qui dépend du détail de la forme de l'aile ($e = 1$ pour un profil optimal).

Commenter la pertinence d'une aile élancée pour un planeur (une valeur typique pour un planeur performant est de $L/\ell \sim 25$).

1.4 Comment faire voler une planche à voile ?

Depuis quelques années, on équipe toutes sortes d'engins marins de plans porteurs (foils) afin de remplacer la sustentation archimédienne par une sustentation dynamique. Faire sortir la coque de l'eau permet en effet d'éliminer la traînée de vagues (une autre forme de traînée, spécifique aux corps flottants, liée à la formation de vagues lorsque le corps se déplace à la surface de l'eau). On cherche ici la force de vent minimale pour sustenter une planche à voile équipée de foils. Le plan porteur de ces foils a une envergure de 80 cm, une surface totale de 900 cm², ses caractéristiques de portance et de traînée sont données sur la Fig. 5. Il est monté sur un mât profilé vertical de surface $S_m = 700$ cm² dont le coefficient de traînée est

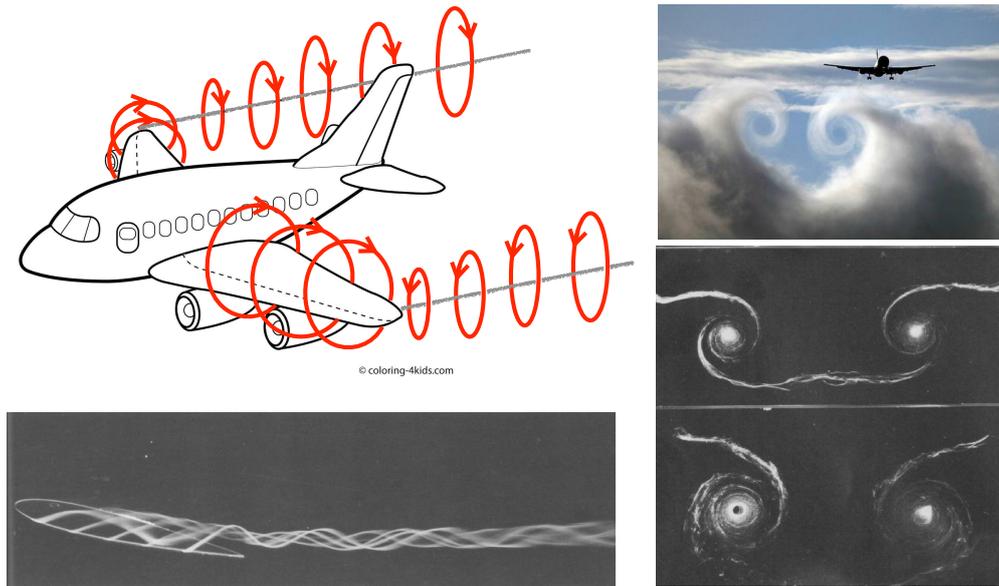


Figure 4: Le vortex créé le long des ailes se poursuit à l'arrière des bouts d'ailes sous la forme de "tourbillons marginaux" qui peuvent être visualisés lorsque l'avion traverse des nuages. On peut également les étudier en laboratoire dans une soufflerie ou comme illustré ici, dans un canal hydraulique (clichés issus de "An album of fluid motion", M. Van Dyke).

$C_{dm} = 5 \times 10^{-3}$. La masse totale de la planche est 15 kg. On considèrera un véliplanchiste de 65 kg. La surface de voile S_v est 9 m^2 et on prend son coefficient de portance égal à $C_p^{voile} = 1.2$ et de traînée $C_x^{voile} = 0.2$ lorsqu'elle est bien réglée (à peu près à 20° d'incidence par rapport au vent apparent). On considèrera ici que l'angle de la voile est réglé à 15° de l'axe de la planche, ce qui conduit à un angle d'environ 35° entre le vent apparent et l'axe de la planche. La vitesse U de la planche est typiquement entre 5 et 10 m/s.

Quel est le nombre de Reynolds de l'écoulement autour du foil ?

Estimer la vitesse minimale de la planche pour la faire décoller.

Estimer la vitesse de vent minimale pour décoller si on navigue vent de travers (si la planche se déplace à 90° du vent réel).

1.5 Allures

Les navigateurs doivent régler leurs voiles en fonction de la direction du vent et du cap choisi. Différentes "allures" ont ainsi été définies dans la zone navigable du "près" au "vent arrière". La Figure 6 représente la vitesse d'une embarcation en fonction du cap pour une vitesse et une direction de vent données.

Quelles allures utilisent la voile comme une aile portante?

Quelles allures mettent plutôt en jeu la traînée du vent sur la voile?

Commenter la variation de la vitesse du voilier en fonction de son allure. Comment se fait-il que l'allure "vent arrière" ne soit pas optimale du point de vue de la vitesse?

Est-il a priori possible de naviguer plus vite que le vent?

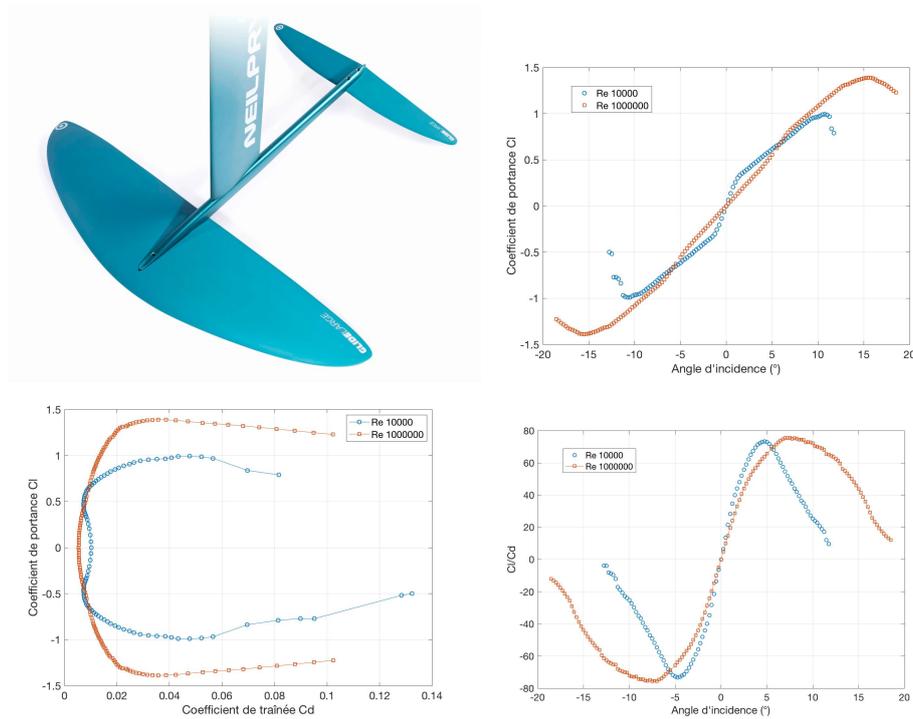


Figure 5: Plans porteurs de planche à voile. Coefficient de portance en fonction de l'angle d'incidence, diagramme portance/trainée et rapport portance sur trainée en fonction de l'angle d'incidence à $Re = 10^4$ et 10^6 .

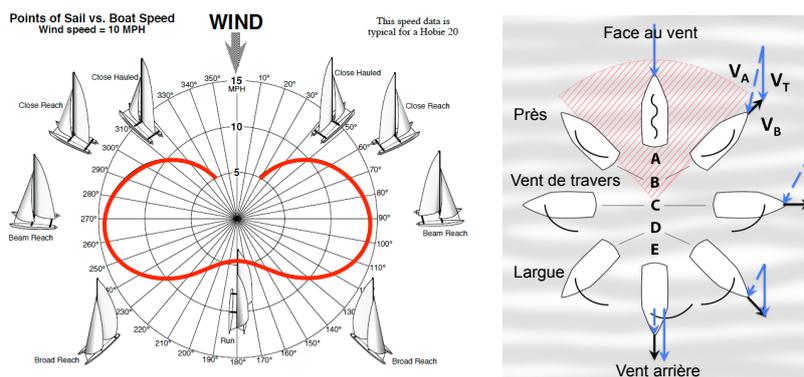


Figure 6: Différentes allures de la navigation à voile. La courbe en rouge représente l'évolution de la vitesse du navire en fonction de son cap relatif à la direction du vent.