

PROFIL DANS UN ECOULEMENT

Force Aéro / Force Hydro des appendices

Cette deuxième partie présente le comportement d'un fluide en mouvement autour d'un profil.

On commencera par définir ce qu'est un fluide, puis un écoulement. On verra ensuite ce qu'il se produit lorsqu'on présente un obstacle dans un écoulement (Trainée), puis on présentera un profil mince avec une incidence (Portance et Trainée induite), et l'on fera varier la forme du profil.

Pour rappel, tout ce qui suit s'applique aux conditions habituelles d'utilisation d'un engin à voile :

- vitesse des écoulements considérés est de l'ordre de 25m/s pour l'air, c'est-à-dire 50kts, et 10m/s pour l'eau, c'est-à-dire 20kts.
- à la surface de la mer (ou d'un lac), donc dans des conditions de température et de pression dite « normales » : 1013,5 hPa et 20°C.

I. Définition de fluide et d'écoulement

Les fluides

Les fluides englobent les gaz et les liquides.

Ils sont la particularité de ne pas avoir de forme propre. Ils peuvent occuper de l'espace dont il dispose.

Les particules qui le composent ont des mouvements indépendants, mais un comportement collectif (conséquence de la viscosité).

Les écoulements

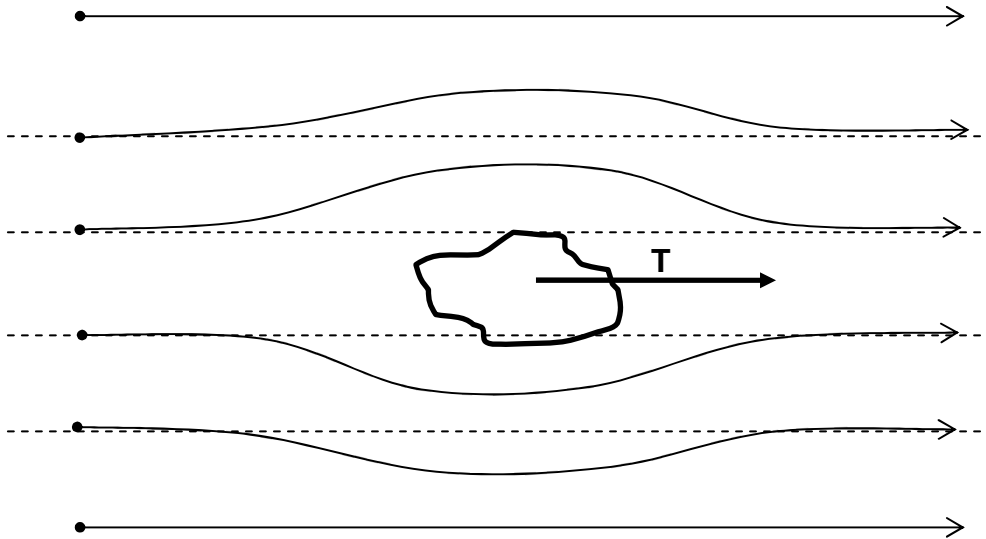
La viscosité est « la propriété d'un fluide de résister plus ou moins aux forces qui déplacent les unes par rapport aux autres les particules qui le constituent ».

Autrement dit, il faut fournir un effort pour mettre en mouvement les particules d'un fluide, mais elles s'entraînent alors les unes et les autres et prennent toutes la même direction, au moins dans un premier temps

On parle dans ce cas d'**écoulement**.

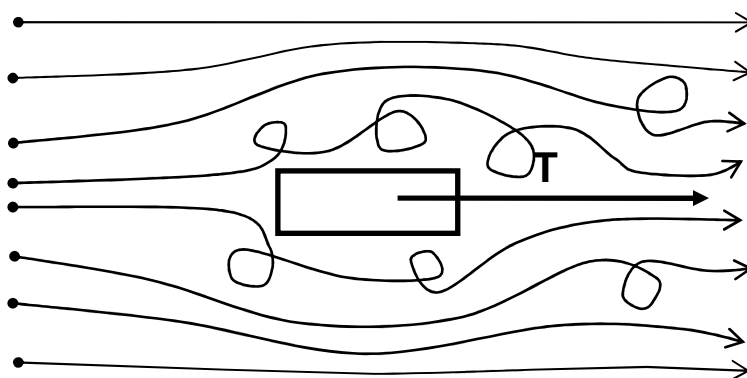
II. Un écoulement rencontre un obstacle (Trainée)

Les particules contournent l'obstacle, mais ont tendance à le « tirer » dans leur direction. Cette force s'appelle la **TRAINEE**.

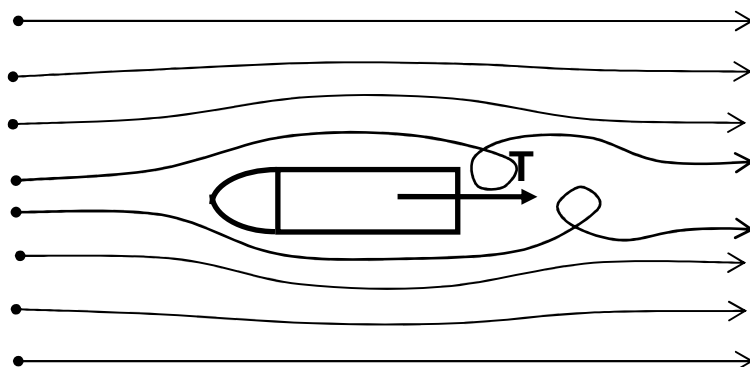


- **Trainée de forme**

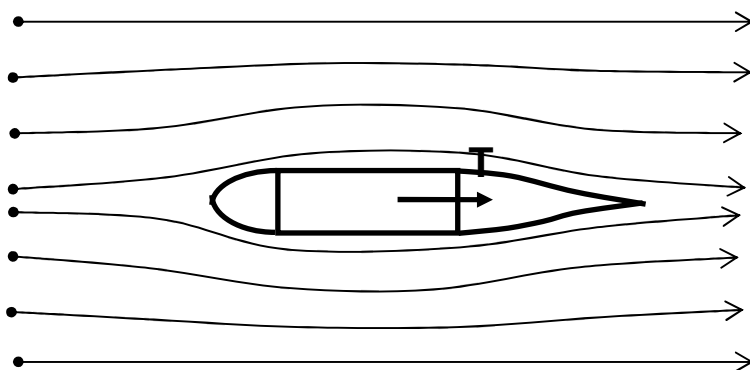
Il est évident que la forme de l'obstacle va influencer sur la trainée qu'il développe lorsqu'il est placé dans un écoulement. Une partie de la force qui « tire » l'obstacle dans la direction de l'écoulement provient de la **Trainée de Forme**.



Les particules frappent la face amont de l'obstacle, et provoquent des tourbillons, qui perturbent l'écoulement.



Grace au carénage du bord d'attaque, les particules peuvent plus facilement contourner l'obstacle.
Par contre, la cassure du bord de fuite provoque toujours des tourbillons.



Le profilage du bord de fuite permet aux particules de rester « coller » le long de l'obstacle, réduisant encore la traînée (de forme).

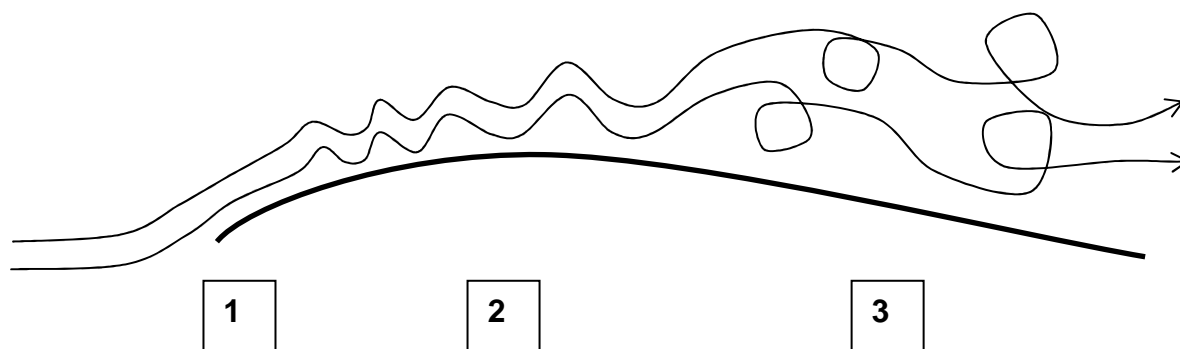
- **Trainée de frottement**

Regardons maintenant ce qu'il se passe le long de l'obstacle, d'abord perpendiculairement à l'écoulement, ensuite dans la direction de l'écoulement.

Les particules placées tout contre l'obstacle restent immobiles. A cause de la viscosité, elles freinent celles situées juste à côté d'elles. Plus on s'écarte du profil, plus les particules vont vite, jusqu'à atteindre la même vitesse que l'écoulement. Cette couche « au contact » du profil, dans laquelle les molécules ont une vitesse inférieure à celle de l'écoulement s'appelle **couche limite**.

Rque : son épaisseur est de l'ordre du centimètre dans les cas qui nous concerne

En arrivant sur le bord d'attaque, les particules dévient leur trajectoire pour contourner l'obstacle. Les parties les plus proches du profil restent coller à lui, et « perturbent » ses voisines, qui se mettent petit à petit à osciller autour de leur trajectoire, jusqu'à complètement « décrocher ».



ATTENTION : L'espace entre les 2 particules dessinées est extrêmement exagéré.

A l'intérieur de la couche limite (donc à quelques centimètre du profil) :

- 1) Dans premier temps, les particules se déplacent dans le sens de l'écoulement. L'écoulement dans la couche limite est dit **LAMINAIRE**.
- 2) Mais les particules en contact avec la paroi sont immobiles. Elles freinent donc les particules situées juste au-dessus d'elles. Une partie des particules se met à osciller autour de la direction des lignes de courant, tout en conservant une direction globale parallèle à celle de l'écoulement. Cette zone est appelée **ZONE DE TRANSITION**.
- 3) Enfin, les particules sont tellement perturbées que leurs mouvements deviennent complètement désordonnés. Les particules « décrochent », se déplacent dans toutes les directions, forment des tourbillons, remontent les lignes de courant. L'écoulement devient **TURBULENT**.

J'insiste sur le fait qu'on **ne parle d'écoulement laminaire ou turbulent uniquement dans la couche limite !**

Par contre, on constate que l'écoulement reste « accroché » au profil tant que la couche limite est laminaire, et qu'il « décroche » quand l'écoulement dans la couche limite devient turbulent.

Ce phénomène est principalement dû aux frottements des particules le long du profil. On parle alors de **Trainée de frottement** (ou résistance visqueuse).

D'une manière générale, lorsqu'un tourbillon apparaît dans l'écoulement, la trainée augmente (il existe de rares exceptions : créer un tourbillon à la hauteur du point de décollement permet de « recoller » les particules le long du profil, de reculer le point de décollement, et donc de diminuer le Trainée. C'est ce qui explique que la balle de golf, qui est loin d'être lisse, plane si bien.

Malheureusement, le point de décollement dépend de la vitesse de l'écoulement, et il n'est pas toujours facile de provoquer un tourbillon au bon endroit

Voir aussi « Nombre de Reynolds »

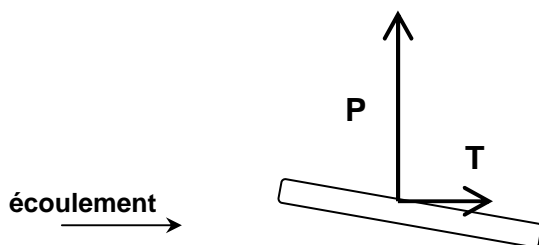
III. L'écoulement rencontre un profil avec une incidence (Trainée + Portance)

On a vu que les particules d'un fluide mises en mouvement constitue un écoulement. Si on place un obstacle dans cet écoulement, on constate que l'objet à tendance à se déplacer dans la direction de l'écoulement (Trainée).

Si cet obstacle est plutôt long (dans le sens de l'écoulement), on parlera de «profil ». Et si on place le profil avec une incidence dans l'écoulement, on s'aperçoit que le profil est soumis à une force perpendiculaire à l'écoulement : la **Portance**.



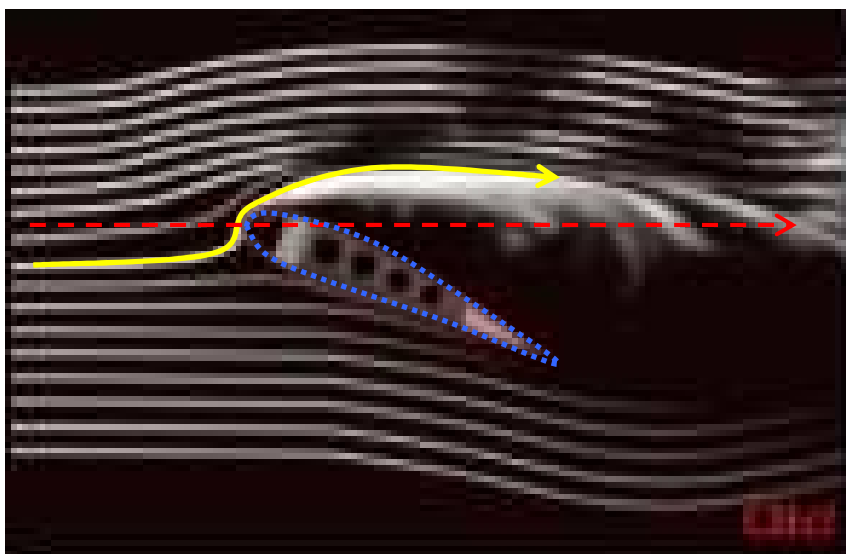
Sans incidence, juste de la Trainée **T**.



Avec incidence, toujours de la Trainée **T**, mais également de la Portance **P**.

En fait, dès que le profil est placé dans un écoulement avec une incidence, on s'aperçoit qu'une partie de particules qui auraient dû frapper le profil sur son **intrados** (du côté de l'écoulement) contourne le **bord d'attaque** pour passer côté **extrados** du profil.

On constate aussi une augmentation relative de la vitesse sur l'extrados, et une diminution de la pression statique sur l'extrados du profil (en même temps qu'une augmentation de la pression statique côté intrados)



Visualisation du décollement de la couche limite à l'approche du décrochage.

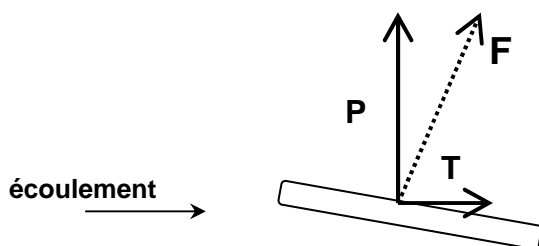
On peut aussi remarquer que **l'écoulement est dévié en amont du profil**.

Source : <http://inter.action.free.fr/aerodynamique/decrochage1.html>

IV. De quoi dépend la Force (Aéro ou Hydro) ?

- **La Force Aéro (ou Hydro)**

On vient de voir qu'un profil placé dans un écoulement avec une incidence développe une trainée et une portance.



En fait le profil n'est soumis qu'à une force (une Force Aéro si on parle d'une voile, et une Force Hydro si on est dans l'eau).

P et T sont une décomposition de la Force vue depuis l'écoulement :

Pour être plus rigoureux, la différence de pression entre les deux côtés du profil engendre pleins de petites forces de pression, qui appuient sur l'intrados et qui tirent l'extrados. Ces forces de pressions sont réparties tout autour du profil (elles sont plus ou moins importante selon leur emplacement), et agissent toutes de la même façon qu'une « grosse » Force F .

Par définition, la **Portance** est la composante de la Force (Aéro ou Hydro) perpendiculaire à l'écoulement (dirigée vers l'extrados), et la **Trainée** est la composante parallèle à l'écoulement.

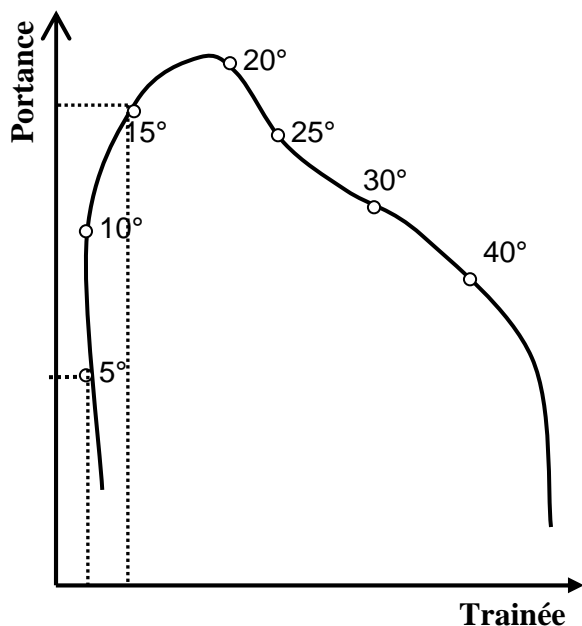
- **Courbe de rendement d'une voile**

Pour commencer, voici un mode de représentation courant pour comparer le rendement d'un profil (ce mode opératoire date de G. Eiffel, qui a étudié pas mal de profil du temps des débuts de l'aviation)

Il a placé un premier profil dans une soufflerie, retenu par deux ressorts : un dans le sens de l'écoulement et un deuxième perpendiculairement à l'écoulement. Il a ensuite fait varier l'incidence du profil dans l'écoulement, et a directement mesurer la Trainée et la Portance (proportionnelles à l'allongement des ressorts).

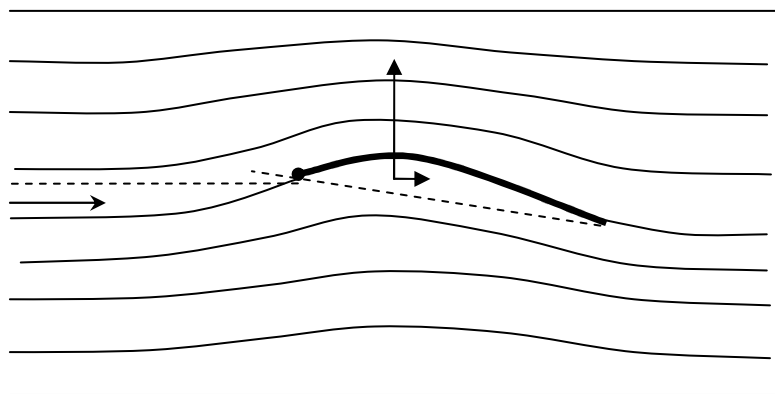
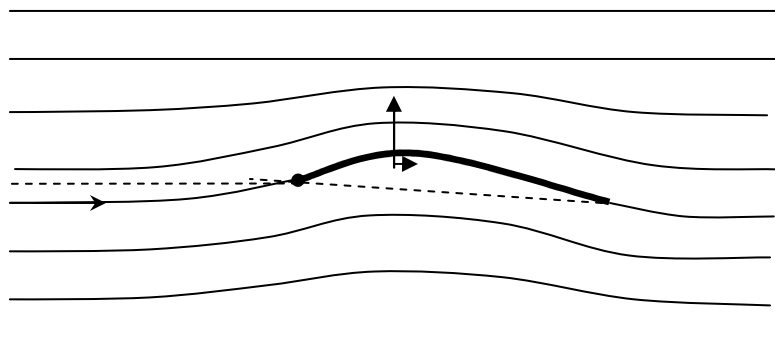
Il a obtenu une courbe de rendement pour le profil considéré, puis il a répété l'expérience en modifiant un à un les paramètres (la vitesse de l'écoulement, la surface du profil, la valeur creux du profil, la position du creux du profil,...)

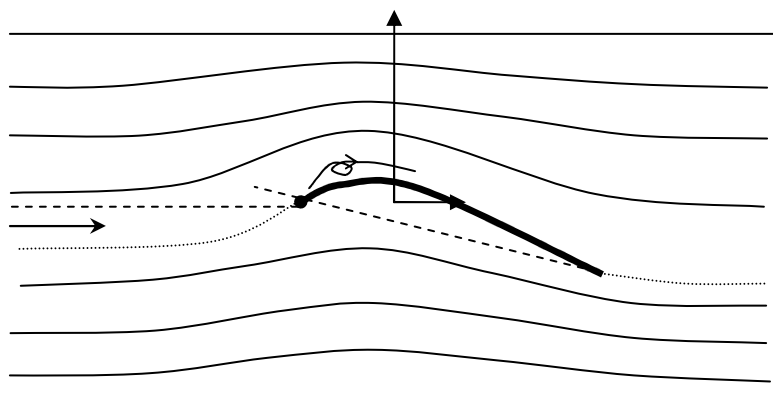
Les courbes de rendement des profils se présentent sous la forme suivante :



La lecture de la courbe donne la valeur de la Portance et de la Trainée pour les incidences notées sur la courbe.

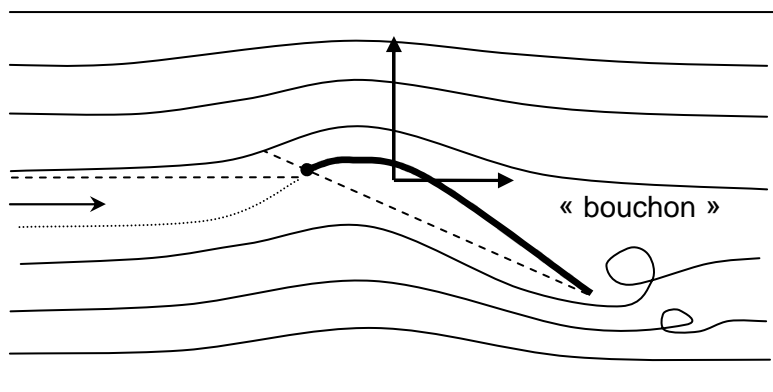
On remarque que dans un premier temps, la portance augmente rapidement (jusqu'à 15°), puis la trainée se met à augmenter. A 20°, la portance chute brusquement : cet angle correspond au décollement de l'écoulement.





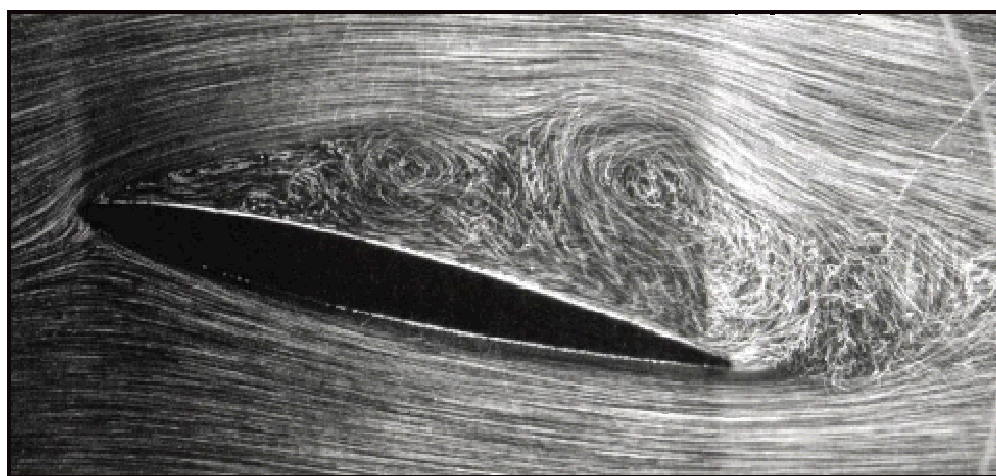
Si l'angle d'incidence augmente, il se crée dans un premier temps une « bulle d'air mort » juste en arrière du guindant (les penons extrados faseyent).

Le rendement diminue un peu, mais ce n'est pas encore dramatique puisque le petit tourbillon créé recolle les écoulements le long du profil. (*D'après Chéret, in Voiles : comprendre, régler, optimiser*)



Si l'angle d'incidence augmente encore, les particules sont trop déviées, elles décrochent de l'extrados, dans un premier temps sur le bord de fuite.

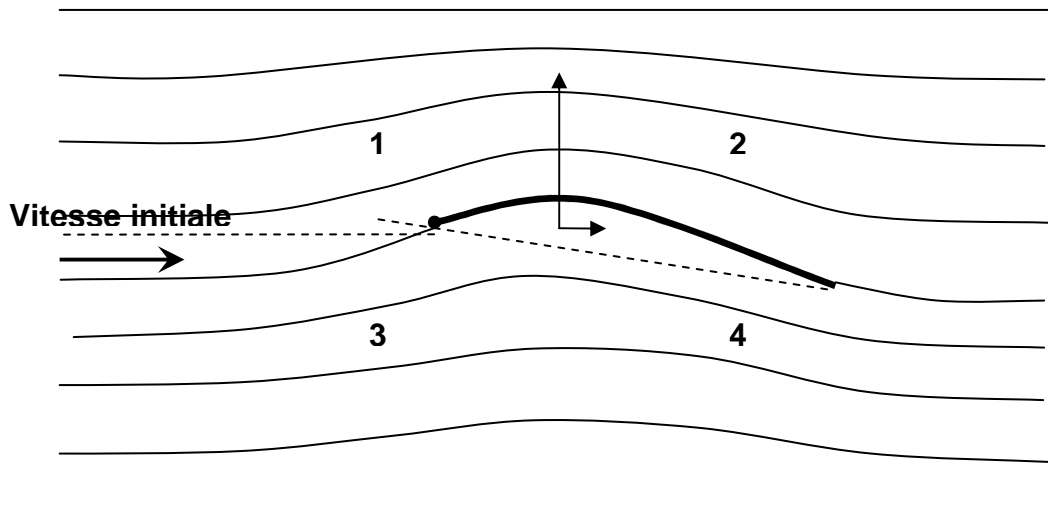
. La longueur du profil fonctionnant correctement diminue, la portance diminue, alors que la traînée reste élevée. (Sur la GV, la condition de Kutta-Joukowski n'est plus respectée : les penons de chute sont aspirés sur l'extrados. Sur le foc, tous les penons tombent)



Decollement de la couche limite (Photo ONERA)

Source : <http://inter.action.free.fr/images/aerodynamique/decrochage.gif>

- Attardons nous un peu sur les variations de vitesse :



Que se passe-t-il dans chacune des 4 zones (on considère uniquement les variations de vitesse) ?

Sur l'extrados :

- zone 1 : accélération. La vitesse des particules augmente.
- zone 2 : décélération. Les particules ralentissent, mais leur vitesse reste supérieure à celle de l'écoulement.

Le décollement des filets d'air (ou d'eau) risque d'intervenir dans cette zone. Si la décélération est trop forte, les molécules forment comme un bouchon, que les autres molécules doivent contourner, ... en allant tout droit. (voir dessin du bas page 8)

Ce décollement se produit pour un angle d'incidence d'autant plus faible que la vitesse de l'écoulement est grande.

Sur l'intrados :

- zone 3 : ralentissement. La vitesse des particules diminue.
- zone 4 : réaccélération. Les particules accélèrent à nouveau, mais leur vitesse reste inférieure à celle de l'écoulement.

A l'arrière du profil : les particules retrouvent leur vitesse initiale, enfin si tout c'est bien passé (s'il n'y a pas de décollement)

- la Faéro (ou Fhydro) dépend de :

- La **vitesse de l'écoulement**. La force aéro ou hydro augmente au carré de la vitesse de l'écoulement : si le vent est multiplié par 1,4 (rafale de 40% supérieure à la vitesse du vent moyen), la Faéro est multipliée par $1,4^2$, donc par 2).

C'est ce qui explique les réductions de voilure, ou bien qu'il faut avoir de la vitesse pour faire du cap, ou bien qu'un bateau qui ralentit dérive plus (ce qui revient au même).

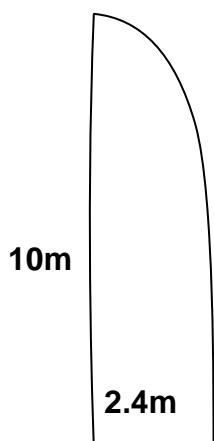
- La **surface du profil** : une grande voile développe une plus grande force qu'une petite.

- Le **creux** : plus le profil est creux, plus il dévie un nombre important de filets, donc plus il est efficace (exemple : le spi). Attention toutefois à ne pas trop dévier les filets, sinon il y a risque de décrochage, avec diminution de la portance et augmentation de la traînée.

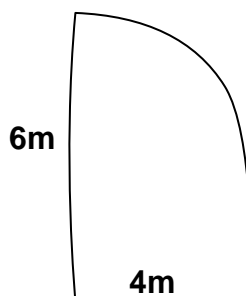
- La **rugosité de la surface** : plus la surface est lisse, plus la zone de transition va apparaître tard. Plus de portance et moins de traînée.

- La **viscosité du fluide** : plus le fluide est visqueux plus la force est élevées. On ne choisit pas, mais ça explique la taille relative des voiles et des appendices sous l'eau.

- L'**allongement** du profil et la forme de son(s) extrémité(s).
L'allongement est le rapport de la hauteur d'une voile (ou d'une dérive, ou d'un safran,...) sur sa largeur.



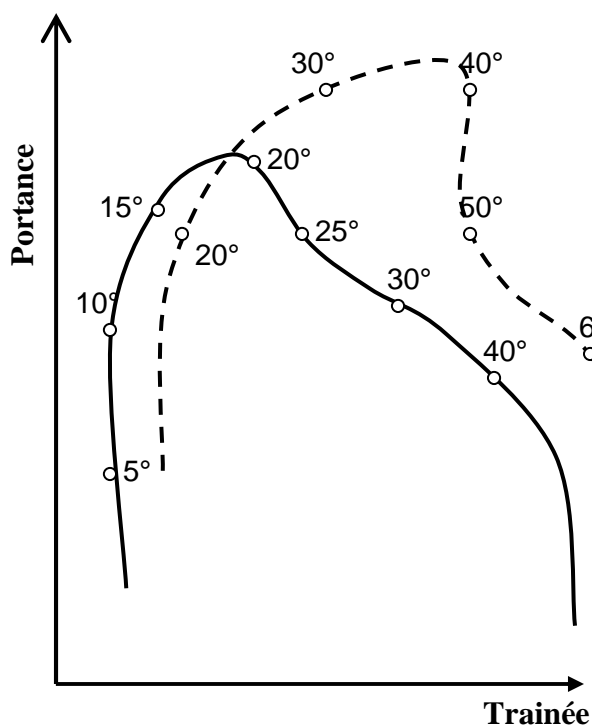
Fort allongement
Environ 4/1
C'est beaucoup pour une voile



Faible allongement
Environ 1,5/1
C'est peu pour une voile

La surface des 2 voiles est la même, (24m²), mais celle de droite est plus allongée.

Un profil à fort allongement développe une portance plus faible, mais à une incidence très faible. Il provoque aussi une traînée induite plus réduite.



Allongt 3/1 Allongt 1,5/1
 ————— - - - - -

La voile à faible allongement (1,5/1) développe une portance importante même à incidence élevée (30 à 35°), mais avec une trainée élevée. Elle décroche vers 40°.

La voile à faible allongement (3/1), développe un protance un peu plus faible, mais dès 10°. Sa trainée est plus faible, mais elle décroche plus tôt (vers 20°).

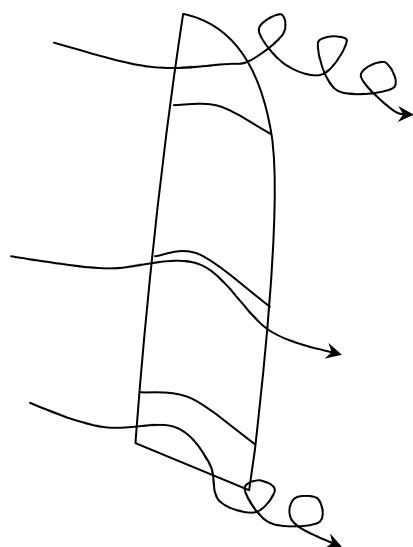
L'allongement est intéressant au petit angle d'incidence (donc au près, ou sur les bateaux qui vont vite. VApp très « pointu »).

- La Trainée induite

Nous avons déjà évoquée une trainée de forme et une trainée de frottement, dès qu'un profil est placé dans un écoulement.

Nous avons aussi vu qu'avec un angle d'incidence avec l'écoulement, ce profil provoque une différence de pression entre son intrados et son extrados, qui engendre une portance.

Mais cette différence de pression entre intrados et extrados provoque aussi des tourbillons aux extrémités du plan porteur. C'est la **Trainée induite** (par la différence de pression, donc par l'incidence).



La pression est plus élevée sur l'intrados que sur l'extrados.

Au milieu de la voile, les molécules n'ont pas d'autre choix que de longer le profil jusqu'au bord de fuite.

Aux extrémités du profil (en haut et en bas pour une voile), rien n'empêchent les molécules de rejoindre l'extrados en passant au dessus ou au dessous de la voile, provoquant des tourbillons, et une trainée supplémentaire (la trainée induite).

Augmenter l'allongement diminue la Trainée induite.

ANNEXES

- Les physiciens qualifient un écoulement (dans la couche limite) selon son **Nombre de Reynolds**. $Rn=V*L/\nu$, où V est la vitesse de l'écoulement (en m/s), L est la longueur de l'écoulement (en m), et ν la viscosité cinématique (c'est-à-dire le rapport entre la viscosité et la masse ; $\nu=0.0000145$ m²/s pour de l'air sec à 15° et au niveau de la mer. $\nu=0,00000114$ m²/s pour l'eau douce et $\nu=0.000 001 19$ m²/s pour l'eau salée à 15°). La zone de transition intervient pour un nombre de Reynolds compris entre 90 000 et 1 100 000, avant l'écoulement est laminaire, après, il est turbulent.

Ces chiffres permettent de déterminer la longueur utile d'une quille ou d'une voile en fonction de la vitesse du bateau ou du vent. Ils mettent aussi en évidence qu'on peut très bien effectuer des tests de voile dans l'eau, ou de carènes dans l'air, avec des maquettes à différentes échelles, mais qu'il faut modifier la vitesse des écoulements pour obtenir des résultats cohérents.

Exemple de nombre de Reynolds :

- pour une quille de 70cm de long, à une vitesse de 6kts dans l'eau de mer : $Rn=3m/s*0,70m/0,000 001 19m^2/s=1 760 000$. On peut en déduire que l'écoulement est turbulent avant le bord de fuite !

A cette vitesse de 6kts dans l'eau de mer, on peut calculer que la zone de transition s'étend de 3,5cm à 45cm du bord d'attaque. ($L=Rn*\nu/V$, pour Rn compris entre 90 000 et 1 100 000). Autrement dit, la couche limite est laminaire sur les 3 premiers centimètres de la quille, et franchement turbulente sur les 25 derniers cm.

Viscosité : propriété d'un fluide de résister plus ou moins aux forces qui déplacent les unes par rapport aux autres les particules qui le constituent.

Fluide : un liquide ou un gaz. Les molécules d'un fluide ne sont pas liées entre elles (si ce n'est pas la viscosité). Un fluide se déforme, et occupe tout l'espace qui lui est disponible. Par opposition à un solide.

Théorème de Bernoulli (1623-1708)

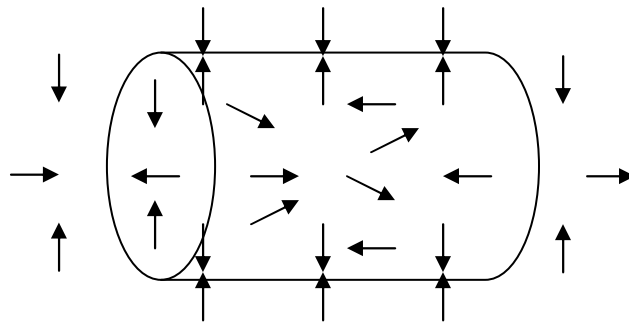
« L'eau ou l'air en mouvement exerce moins de pression qu'immobile. »

Ou bien : « En un point donné, la somme de la pression dynamique et de la pression statique reste constante ».

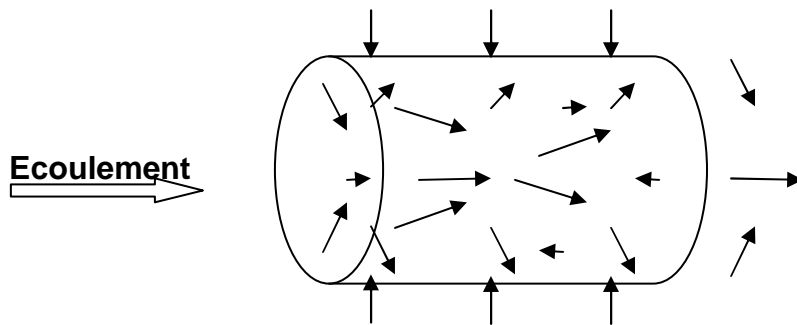
Et qu'est-ce donc que la pression dynamique et la pression statique ?

La pression dynamique est mesurée parallèlement à l'écoulement, la pression statique est mesurée perpendiculairement à l'écoulement, c'est-à-dire, dans le cas qui nous concerne, sur le profil.

Plaçons un tube ouvert dans un fluide immobile.



Les particules du fluide contenues dans un tube ouvert se déplacent dans toutes les directions. Certaines d'entre elles viennent donc percuter les parois du tube, d'autres entrent ou sortent du tube. Il y a autant de particules qui frappent l'intérieur du tube que de particules qui frappent l'extérieur du tube, autant qui entrent et qui sortent. La pression est la même partout.



Si vous forcez les particules à suivre la direction du tube (vous créez un écoulement), le nombre de particules venant percuter les parois du tube va diminuer : la pression sur la paroi diminue (c'est la pression statique). Parallèlement, le nombre de particules sortant du tube (ou frappant votre main à la sortie du tube) va augmenter : la pression dynamique augmente.

Rque : dans la pratique, il n'est pas possible de mesurer directement la pression dynamique.

UNE PETITE EXPERIENCE DE PHYSIQUE,...ET QUELQUES EXPLICATIONS

L'énergie cinétique ($E=1/2mV^2$)

Prenez un panneau de bois posé en équilibre sur la tranche.

Lancez une balle de pingpong sur ce panneau. Il risque fort de tomber.

Relancez cette balle de pingpong, mais tout doucement cette fois-ci. Il se peut que le panneau reste debout.

Par contre, avec une boule de pétanque, il tombera quelque soit la vitesse à laquelle vous la lancez.

L'énergie reçue par le panneau de bois (celle transmise lors de l'impact par le projectile) est proportionnelle à la masse du projectile et à sa vitesse. Pour être plus précis, l'énergie d'un corps en mouvement (appelée énergie cinétique) vaut $1/2mV^2$, où m est la masse (en Kg) et V la vitesse (en m/s). On s'aperçoit au passage que la vitesse est prépondérante.

Plaçons-nous à l'échelle des molécules (aproche de la thermodynamique)

Pour information, 1 cm³ d'air à 20° à une pression normale de 1013,5 hPa contient $20 \cdot 10^{18}$ molécules qui s'agitent à 340 m/s (autrement dit, il y a 20 milliards de milliards de molécules qui se déplacent à la vitesse du son, soit 950 km/h, dans 1 cm³ d'air à 20° au niveau de la mer).

Ça fait pas mal de collisions entre elles (ce qui explique la température), et pas mal de collisions avec les parois d'un ballon, si on enferme toutes ces particules dans un ballon (par exemple).

La pression sur les parois du ballon correspond au nombre de particules qui le percutent. Ce qui explique que si on augmente le nombre de particules dans le ballon, la pression augmente. Et le volume du ballon augmente, parce qu'il est souple.

Enfermons maintenant ces particules dans un bocal rigide : les parois ne se déforment pas, donc le nombre de collisions entre les particules augmentent, et la température augmente.

Comme vous pouvez le voir, la pression, le volume et la température sont liés ($PV=nRT$, où P est la pression, V le volume, T la température. *Quant à n et R ils correspondent au nombre de molécules de gaz parfait dans un volume donné* R est la constante du gaz parfait et vaut 8,314 J/K/mol, et n est la quantité de matière).

On a aussi vu qu'il existe une relation entre la chaleur et le mouvement (théorie de Laplace).