

DYNAMIQUE DES FLUIDES

Toutes les expériences proposées portent sur des écoulements stationnaires.

I RELATION DE BERNOULLI

Si le fluide est parfait (sans viscosité) et incompressible, on a le long d'une ligne de courant en régime permanent :

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = cte$$

Cette relation exprime la conservation de l'énergie mécanique. Le premier terme correspond à la pression statique, le deuxième à la pression dynamique et le troisième à la pression de pesanteur.

I.1 Effet Venturi

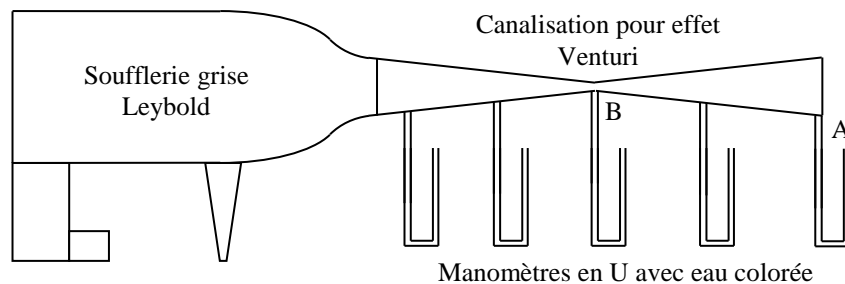
Lorsqu'un fluide incompressible s'écoule dans une canalisation, l'équation de continuité impose la relation $S.v = S'.v' = cte$. La vitesse augmente donc là où la section diminue. Si la différence de niveau entre deux sections du tube de courant est nulle, l'équation de Bernoulli devient :

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = p' + \frac{1}{2}\rho v'^2 = P_{totale} = cte$$

Par conséquent, la pression statique sera plus faible là où la vitesse est plus grande, c'est à dire là où la section du tube de courant est plus faible. C'est ce que l'on propose de vérifier.

Manipulation :

Attention à bien installer la canalisation Venturi pour éviter qu'elle tombe.



Notez l'évolution de la pression statique le long de la canalisation à l'aide des manomètres en U (on peut aussi utiliser pour mesurer les faibles ΔP le manomètre en verre Leybold qui sert au tube de Pitot en laissant une de ses extrémités à l'air libre). Mesurez $P_A - P_B$; sachant que le diamètre des sections A et B vaut respectivement 10 et 5 cm, en déduire la vitesse v_A à la sortie de la canalisation en utilisant la relation suivante (cf. [4], p. 463 ou [2], p. 369) :

$$P_A - P_B = \frac{\rho v_A^2}{2} \left(\frac{S_A^2}{S_B^2} - 1 \right)$$

Comparez le résultat obtenu avec une mesure à l'anémomètre à fil chaud (on peut aussi déduire de l'équation de continuité la vitesse v_B dans l'étranglement).

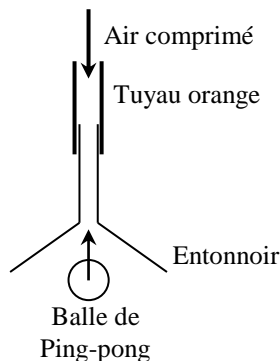
Remarques :

Cet effet sert en pratique à mesurer les vitesses dans les canalisations horizontales.

Si l'hypothèse d'incompressibilité semble raisonnable pour les liquides à des vitesses pas trop grandes, on peut se poser la question pour les gaz → pour plus de précision à ce sujet, se reporter en [2], p. 370 (§ 21.8) ou en [4], p. 445.

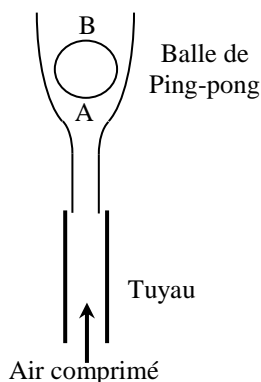
I.2 Balle de Ping-pong

Expériences qualitatives mais spectaculaires. Dans ce qui suit, on négligera les variations de $\rho_{\text{air}} \cdot g \cdot h$ dans l'équation de Bernoulli.

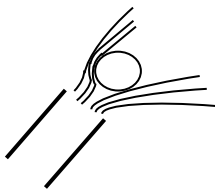
Expérience 1 :

Placez la balle dans l'entonnoir → la balle est aspirée. L'explication est à peu près la même que précédemment : la surface augmente lorsque l'air débouche dans l'entonnoir → la vitesse diminue (cf. éq. de continuité) → si on néglige la variation de pression de pesanteur, la pression statique est plus faible à l'embouchure de l'entonnoir (cf. équation de Bernoulli).

Cette expérience peut aussi être réalisée avec une feuille de papier (cf. [2], p. 371).

Expérience 2 :

La balle se maintient en équilibre. La encore, on a $p + \rho v^2/2 = \text{cte}$ le long d'une ligne de courant. Comme la vitesse est nulle en A (point d'arrêt), la pression y est maximum : $p_A = p + \rho v^2/2 \rightarrow$ il existe donc une position de la balle (qui dépend du débit) pour laquelle cette surpression permet de compenser le poids de la balle. Ce qui est surprenant, c'est la stabilité de cet équilibre. En effet, si la balle se déplace vers la gauche, les lignes de courant s'évasent sur ce côté (cf. [4], p. 466) provoquant une diminution de la vitesse (cf. effet Venturi) et par conséquent une augmentation de pression. A droite, on a l'effet inverse donc une pression plus faible. Il en résulte une force latérale dirigée en sens inverse du déplacement. On remarquera que la balle tourne sur elle même du fait de la viscosité de l'air (comportement imparfait du fluide).

Expérience 3 :

Inclinez le tuyau → la balle reste en équilibre

Attention aux erreurs d'interprétation : l'air ne passe pas sous la balle pour la soutenir !

Les lignes de courant se resserrent à gauche → la vitesse augmente → la pression est plus faible. Les lignes de courant s'évasent à droite → la vitesse diminue → la pression est plus forte. On a donc globalement une force de pression qui maintient encore en équilibre la balle. Vous pouvez vérifier expérimentalement avec votre doigt ou avec un bout de papier que le débit est plus important à gauche qu'à droite. Le sens de rotation que prend alors la balle dû à la viscosité confirme ce fait (la mise en rotation de la balle accentue encore l'effet de sustentation par effet Magnus - cf. [2], p. 393).

Remarque :

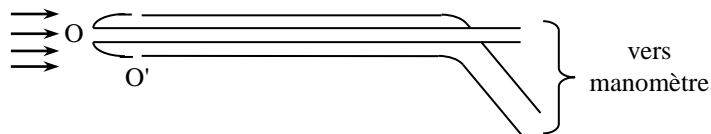
Cette expérience explique l'arrachement des toits par les ouragans (cf. [2], p. 371), la

déflexion du jet d'un robinet lorsqu'on y place un doigt dedans (cf. [6], p. 199). De nombreuses autres manipulations de ce genre sont encore possibles (pulvérisateur, jet entre deux sphères légères, effet de sol, syphon ...). Se reporter en [4], p. 466 et en [1], p. 113. Dans le même esprit, on peut citer la trompe à eau ([4], p. 463, [2], p. 370), qui a le mérite sur l'expérience précédente d'être réellement utilisée.

I.3 Mesure de la vitesse d'un fluide - Tube de Pitot

[1], p. 111

C'est un double tube qui permet de mesurer la vitesse v du fluide à partir de la différence de pression entre l'orifice O, où la vitesse est négligeable (point d'arrêt), et l'orifice O' placé latéralement où la vitesse du fluide n'est pas modifiée. Si on applique en effet la relation de Bernoulli à une ligne de courant passant par ces deux points, on a :



$$P_O + 0 = P_{O'} + \frac{1}{2} \rho_{air} v^2$$

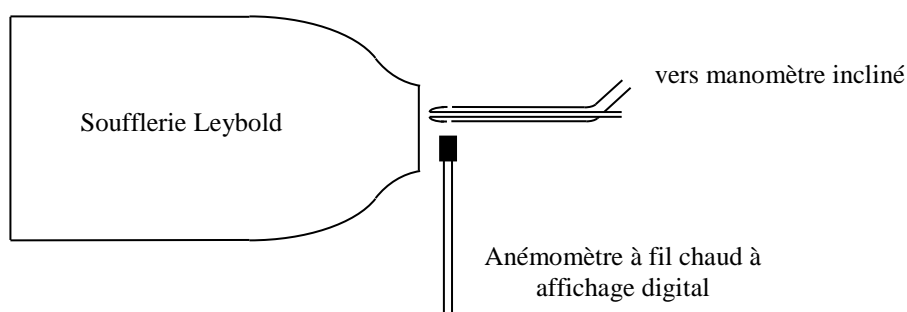
On a donc :

$$v = \sqrt{\frac{2(P - P')}{\rho_{air}}}$$

Avec $P - P' = \rho_{liquide}gh$ → la différence entre les pressions en O et O' donne accès à la vitesse en O'.

Manipulation :

Expérience à réaliser avec le gros collecteur.



La sonde de l'anémomètre à fil chaud est extrêmement fragile → remettre le capuchon dès qu'on ne s'en sert plus ! Il faut faire attention à la position du tube et de l'anémomètre à fil chaud car ils donnent une valeur locale de la vitesse → fixez les sondes sur des trépieds, explorez la distribution de la vitesse à l'embouchure avec l'anémomètre à fil chaud puis ajustez la position des deux sondes en conséquence. Mesurez pour différentes valeurs de la vitesse la dénivellation obtenue avec le tube de Pitot ; tracer la courbe $h = f(v^2)$ → vous devez obtenir une droite.

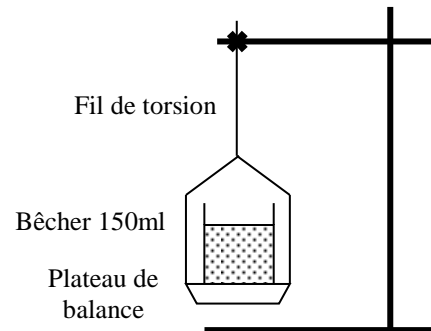
II REGIME LAMINAIRE

II.1 Mise en évidence des forces de viscosité

[2], p. 328

Ces forces peuvent être mises en évidence dans les liquides ou les gaz. La manipulation avec l'air (cf. [1], p. 134) est cependant délicate à réaliser car les forces de viscosité sont faibles → on propose ici la mise en évidence avec des liquides (une autre manipulation simple permettant de mettre en évidence ces forces de viscosité consiste à faire rouler un œuf dur et un œuf frais sur une table) :

Fixez fortement le fil de torsion sur le trépied à l'aide d'une noix circulaire. Mesurez dans un premier temps la période du pendule avec 100 gr d'eau. Videz le bêcher et l'essuyer. Refaire une nouvelle mesure avec cette fois ci 100 gr de glycérine. Conclure.

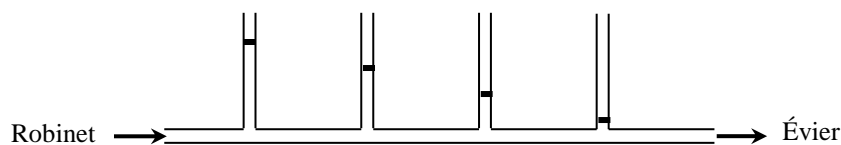


Précautions à prendre :

Lancez à chaque fois le pendule avec le même angle initial. Effectuez les mesures sur plusieurs périodes pour plus de précision.

Conséquence sur un écoulement dans une canalisation horizontale :

L'application du théorème de Bernoulli impliquerait que la pression serait uniforme dans la canalisation, l'expérience montre que non. En effet sur l'expérience ci-dessous, les tubes verticaux mesurent la pression statique ; comme la vitesse est constante le long du tube, il en est de même pour la pression dynamique et les variations de la pression statique mesurent aussi celles de la pression totale.



Observez la perte de charge. Vérifiez expérimentalement qu'elle est proportionnelle à la distance des tubes verticaux considérés (cf. [1], p. 137 et [3], p. 496). Un étranglement produit une grande perte de charge ; vous pouvez le vérifier sur un tube similaire au précédent mais présentant une diminution de sa section au centre (cf. [2], p. 379).

II.2 Loi de Stokes

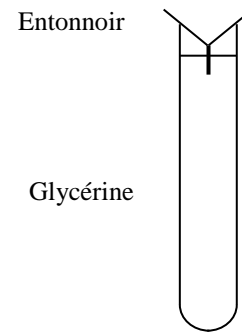
Cette loi s'établit par intégration des forces de pression (l'expression de la pression étant obtenue en résolvant l'équation de Navier Stokes dans le cas d'un écoulement à petit nombre de Reynolds ; cf. [5], p. 85 à 89) qu'exerce l'écoulement d'un fluide sur une sphère → on obtient l'expression de la force s'opposant au mouvement $F = 6\pi\eta r v$. On peut s'en servir pour mesurer la viscosité d'un fluide en laissant tomber dedans une bille judicieusement choisie de façon à obtenir un mouvement uniforme. La force précédente est alors compensée par le poids apparent de la bille (c'est le poids diminué de la poussée d'Archimède) et on a :

$$\frac{4}{3}\pi r^3(\rho_{bille} - \rho_{fluide})g = 6\pi\eta r v_{limite}$$

L'expression $F = 6\pi\eta r v$ n'est valable que pour des nombres de Reynolds très inférieurs à 1 → Il faudra le vérifier sur la manip (cf. [5], p. 86 formule 20.17). Quelles valeurs de r sont à préférer ?

Manipulation :

On laisse tomber une bille d'acier. Quand le mouvement est uniforme (s'en assurer), on mesure la vitesse v en prenant le temps que la bille met à parcourir une distance fixée au préalable. Répétez l'expérience avec des billes de différents rayons r . Calculez la viscosité de la glycérine en utilisant la formule ci-dessus (densité de l'acier = 7,81 ; densité de la glycérine 1,261) et comparer à la valeur attendue (cf. [1], p. 142).

**II.3 Ecoulement laminaire dans un tube fin**

Lorsque le tube dans lequel se passe l'écoulement est assez fin pour avoir un débit assez faible pour rester en régime laminaire (nombre de Reynolds inférieur à $10^3 \rightarrow$ s'en assurer lors des mesures), il s'établit à l'intérieur de la conduite un régime laminaire particulier, l'écoulement de Poiseuille. Le profil radial de vitesse est parabolique et le débit volumique varie alors linéairement avec la chute de pression suivant la relation :

$$D_m = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 \eta L} \quad \text{avec} \quad \Delta P = \rho g h$$

Manipulation :

Se reporter au montage sur les phénomènes de transport. S'assurer que le tube et le récipient sont bien propres sinon l'écoulement risque d'être perturbé.

II.4 Changement de régime**II.4.1 Visualisation d'un écoulement autour d'un obstacle**

Il y a à l'oral une cellule permettant de visualiser des écoulements bidimensionnels autour d'un objet circulaire. La cellule se place sur un rétroprojecteur. La visualisation se fait à l'aide de filets d'encre injectés en amont de l'obstacle. A Rennes, on dispose d'un système similaire mais aux performances limitées \rightarrow demander conseil au professeur.

II.4.2 Transition laminaire turbulent

Il suffit de reprendre un dispositif similaire à celui employé pour l'étude de l'écoulement de Poiseuille en prenant un tube de plus grande section \rightarrow Se reporter au montage sur les phénomènes de transport .

III ECOULEMENTS A HAUT NOMBRE DE REYNOLDS**III.1 Résistance de l'air**

[3], p. 502 ; [1], p. 324

La force de traînée F exercée par l'air sur le corps immobile dépend de nombreuses grandeurs dont principalement :

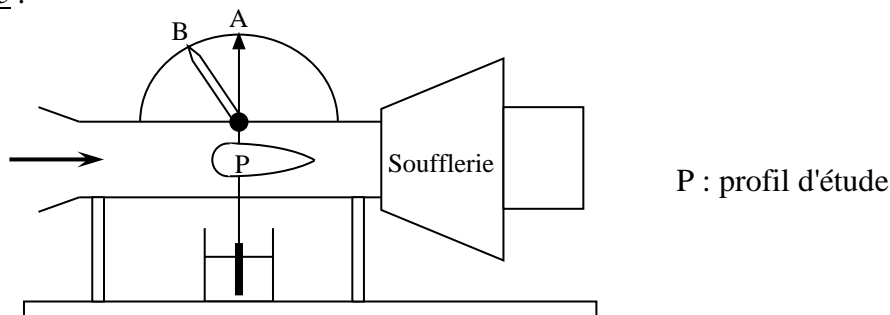
- S la surface de la section du corps perpendiculaire à v
- les dimensions parallèles à v
- v la vitesse moyenne du fluide loin du corps
- ρ la masse volumique du fluide
- la viscosité du fluide

Pour réduire le nombre de paramètres, on travaille avec des grandeurs sans dimension (l'idée étant que les phénomènes physiques sont indépendants des unités de mesure choisies). On définit alors le coefficient de traînée C_X tel que :

$$F = C_X(R_e) \frac{\rho S v^2}{2}$$

C_X dépend du nombre de Reynolds R_e (cf. [4], p. 482) et d'un nombre qui caractérise la forme aérodynamique de l'objet (difficile à quantifier en pratique). $\rho S v^2 / 2$ correspond à la force F dans le cas complètement turbulent (plus de dépendance avec la viscosité moléculaire), ce qui signifie que C_X devient constant dans ces conditions (très grand R_e). Dans le cas laminaire, F va dépendre de la viscosité ce qui implique que C_X va varier avec R_e (construit avec la viscosité).

Système d'étude :



On propose d'étudier ici la dépendance de la force en fonction des différents paramètres (faire des choix en montage). Le profil P dont on veut mesurer la traînée est placé dans la veine d'air d'une soufflerie à axe horizontal (la forme "tube de Venturi" donnée à cette chambre assure le parallélisme des filets d'air). Il est fixé au fléau d'une balance de torsion qui permet de mesurer la force nécessaire pour rétablir l'équilibre rompu par la poussée de l'air (**ne pas toucher au réglage du ressort !**). Le fléau de la balance de torsion comporte, à sa partie inférieure, un système amortisseur composé d'une palette plongeant dans un godet d'huile et, à sa partie supérieure, une flèche rouge A devant être verticale à l'équilibre. Un axe commandé par un bouton noir permet de contraindre le ressort de la balance pour équilibrer la force agissant sur le profil ; une aiguille blanche B , solidaire de cet axe, indique l'intensité de cette force sur le cadran lorsqu'on rétablit l'équilibre.

Réglage du zéro de la balance de torsion :

Fixez le profil d'étude sur le fléau **en soignant son positionnement par rapport à l'axe de l'écoulement** ; agissez sur le bouton noir de façon à aligner la flèche rouge A avec la verticale (graduation 4 cN). Une fois ce réglage effectué, placez manuellement la flèche blanche B sur la graduation 0 cN en bloquant le bouton noir. Vérifiez ensuite si le réglage est correct : bouton noir relâché $\rightarrow B$ est sur 0 cN et A est sur 4 cN.

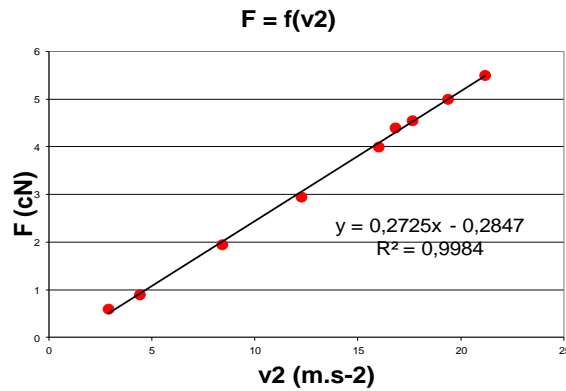
Précaution lors d'une mesure :

Lorsque la soufflerie est en marche, le tube d'écoulement a tendance à se décaler du fait des vibrations du moteur ; il peut alors fausser les mesures en gênant le mouvement du fléau \rightarrow **Regarder toujours si le fléau n'est pas entravé !**

Dépendance en v^2 :

Utilisez par exemple le disque de diamètre moyen (mesurer son diamètre).

Faire varier le débit d'air au moyen de l'alternostat ; mesurer la vitesse du flux à l'entrée de la conduite à l'aide de l'anémomètre à fil chaud et la force de traînée du profil. Tracez la courbe $F = f(v^2)$. Voici à titre le résultat d'une série de mesures :



Il faudrait en toute rigueur tenir compte de l'effet Venturi pour la mesure de v ; cette correction n'est pas critique en pratique.

Dépendance en S :

Mesurez la force de traînée pour les trois disques ; ajustez l'alternostat pour avoir à chaque fois la même vitesse. La courbe $F = f(S)$ est approximativement une droite.

Influence de la forme :

Comparez pour une même vitesse la traînée de différents profils ayant la même section principale. On illustre l'influence du C_X .

III.2 Etude d'une aile d'avion

[3], p. 506 ; [1], p. 327

III.2.1 Répartition des pressions

Utilisez le profil d'aile Leybold prévu à cet effet (notée "Répartition des pressions sur une aile"). Placez-le en sortie de la grosse soufflerie grise Leybold munie du collecteur de 18 cm. Des trous sur les faces latérales permettent de mesurer la pression au-dessus et au-dessous du profil. Y raccorder le manomètre en verre Leybold à l'aide des petits raccords en plastique (ne pas les perdre !) en laissant une de ses extrémités à la pression atmosphérique (inversez les branchements suivant que l'on mesure une surpression ou une dépression). Reproduire le profil de l'aide sur un calque et représenter les différentes pressions par des flèches (cf. [1], p. 327). Conclusions ?

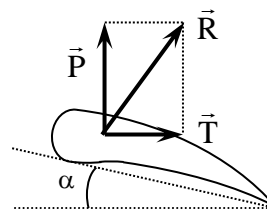
III.2.2 Résultante des forces de pression : Traînée et portance

La résistance de

l'air R peut se décomposer en deux forces :

une force T parallèle à la vitesse

une force P perpendiculaire à la vitesse



La résistance de l'air étant proportionnelle au carré de la vitesse, on peut mettre P et T sous les formes suivantes :

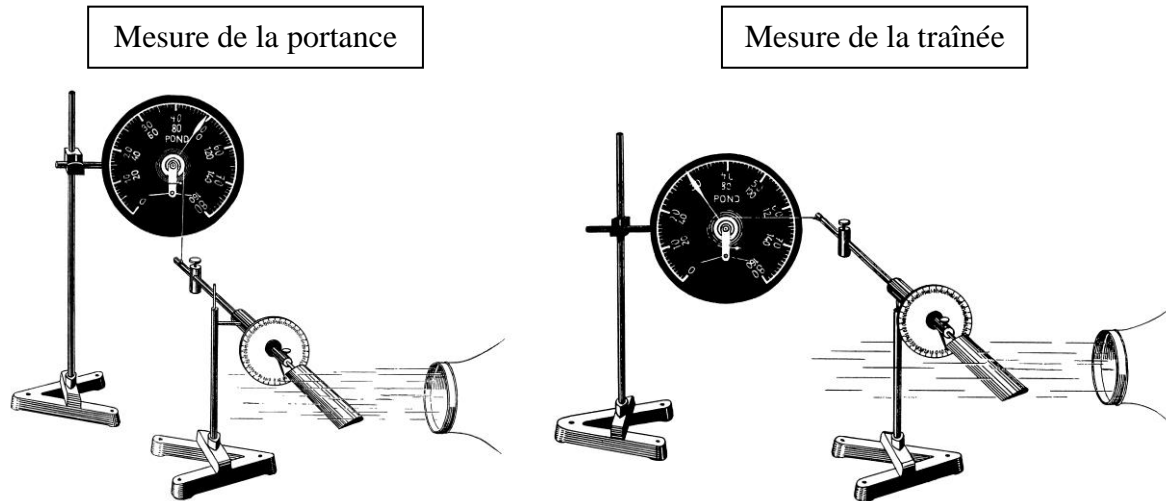
$$P = C_z \frac{\rho S v^2}{2} \quad T = C_x \frac{\rho S v^2}{2}$$

La finesse de l'air correspond au rapport des deux grandeurs :

$$F_{aile} = \frac{P}{T} = \frac{C_z}{C_x} = f(\alpha)$$

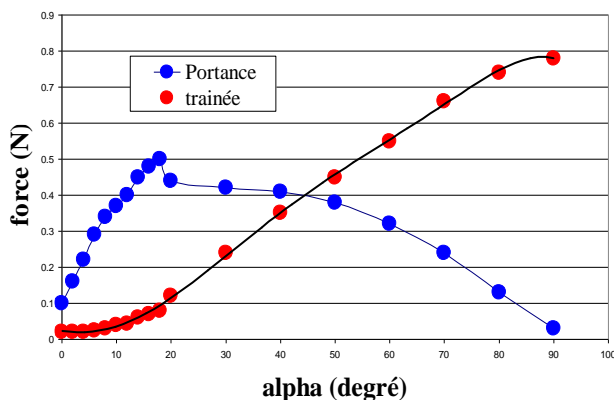
Manipulation :

On propose de mesurer la portance et la trainée d'une aile afin de déterminer l'évolution de la finesse en fonction de l'angle ; utilisez le dispositif prévu à cet effet. Modifiez le montage comme indiqué ci dessous suivant la grandeur à mesurer.

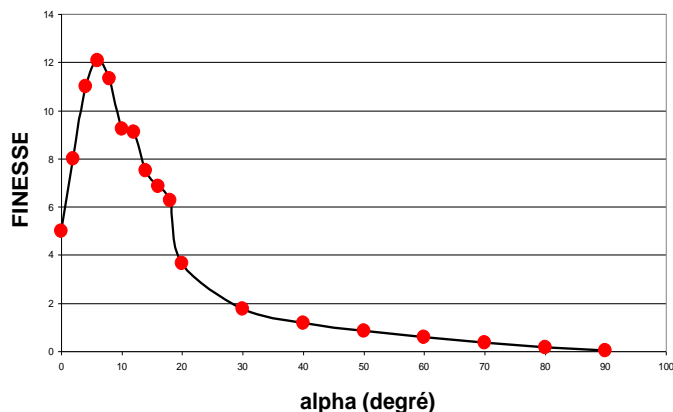


Le dynamomètre à torsion est gradué en pond ; un pond correspond à 1 gramme force soit 0.01 Newton. La zone de mesure 0-160 pond correspond à une utilisation du dynamomètre avec le fil enroulé sur le petit tambour ; la zone 0-80 pond correspond à une utilisation avec le fil enroulé sur le grand tambour (le cordon doit être enroulé des trois quart à une fois et demie autour du tambour si on veut employer entièrement la zone de mesure choisie). Equilibrez préalablement l'aile à l'aide du contrepoid lorsque vous mesurez la portance ; le contrepoid est sans effet sur la mesure de la trainée. Placez l'aile dans le flux de la grosse soufflerie grise (collecteur de 18 cm , rhéostat à 50 % de puissance environ) ; mesurez P et T pour différents angles α (de moins 15 à + 90 °). Faire plus de mesures entre -15 et 20 °. Tracez les courbes $P = f(\alpha)$, $T = f(\alpha)$ et $F = f(\alpha)$. En déduire l'angle d'attaque optimal de l'aile à la vitesse considérée et la finesse maximale .Voici à titre indicatif une série de mesures :

PORTANCE ET TRAINEE EN FONCTION DE ALPHA



FINESSE EN FONCTION DE ALPHA



On peut aussi tracer la polaire de l'aile et comparer le résultat obtenu à la courbe donnée dans [3], p. 507 (la courbe en pointillé correspond à l'approximation $P \propto \alpha$ et $T \propto \alpha^2$).

Bibliographie :

- [1] : Quaranta I p. 108, 133 et 320
- [2] : Fleury Mathieu : Mécanique physique p.360 à 388
- [3] : Bruhat : Mécanique p. 487 à 514
- [4] : Pérez : Mécanique
- [5] : Landau : Mécanique des fluides
- [6] : E. Guyon, J.P. Hulin et L. Petit : Hydrodynamique physique
- [7] : Giles : Mécanique des fluides et hydraulique (série Schaum)
- [8] : BUP 814 (mai 1999)