

B1. Aérodynamique

I. INTRODUCTION

Cette expérience, reliée au domaine de la *mécanique des fluides*, a pour but d'étudier expérimentalement quelques écoulements d'air sur des maquettes placées dans un tunnel aérodynamique. On y aborde les notions d'*écoulements laminaires et turbulents*, suivant la valeur du *nombre de Reynolds* de l'écoulement, ainsi que l'étude de certains nombres caractérisant les écoulements turbulents, comme le *coefficient de pénétration* C_x , le *coefficient de traînée* C_w et le *coefficient de portance* C_F , qui ont une implication technologique importante en aérodynamique.

II. RAPPELS THEORIQUES

Écoulements laminaires et turbulents, nombre de Reynolds

Un écoulement de fluide est caractérisé par un champ vectoriel de vitesse \vec{v} et un champ scalaire de pression p . On distingue deux types d'écoulements:

- les *écoulements laminaires* pour lesquels la fonction $\vec{v}(\vec{r}, t)$ est univoquement déterminée par \vec{r} , caractérisée par des lignes de courant (trajectoire des éléments de fluide) ne s'entrecroisant jamais,
- les *écoulements turbulents* pour lesquels la fonction $\vec{v}(\vec{r}, t)$ n'est pas univoque, ce qui signifie que les lignes de courant se mélangent, et que seule la notion de vitesse moyenne en un point de l'espace a un sens.

Lorsque la vitesse d'écoulement d'un fluide (dans un tuyau ou autour d'un obstacle solide) dépasse un certaine valeur, le régime laminaire observé aux basses vitesses devient instable et se transforme en écoulement turbulent. Ce régime est déterminé par la formation de remous (tourbillons) dont l'origine réside dans les forces de frottement visqueux. Le passage de l'écoulement laminaire à l'écoulement turbulent est déterminé à partir du *nombre de Reynolds* Re de l'écoulement, qui est une grandeur sans dimension définie par la relation :

$$Re = \frac{\rho l v}{\eta}$$

où ρ est la densité du fluide, v la vitesse caractéristique de l'écoulement, η le coefficient de viscosité du fluide et l une dimension linéaire de l'obstacle ou des limites de l'écoulement.

Le nombre de Reynolds qui correspond à la vitesse critique v_c déterminant le passage du régime laminaire au régime turbulent est appelé *nombre de Reynolds critique* Re_c . Ce nombre dépend essentiellement de la géométrie de l'écoulement. Par exemple, pour l'écoulement d'un fluide dans un tuyau cylindrique à parois lisses, le nombre de Reynolds critique est de l'ordre de $Re_c = 2300$, ce qui signifie que tout écoulement pour lequel $Re < Re_c$ est laminaire et tout écoulement pour lequel $Re > Re_c$ est turbulent.

Le nombre de Reynolds est aussi à la base de la *théorie de la similitude mécanique*. Cette théorie permet entre autres de résoudre le problème technique important de l'étude des caractéristiques des dispositifs aérodynamiques à partir de modèles à échelle réduite dans des souffleries. Pour que deux écoulements soient physiquement équivalents, on montre qu'il faut à la fois:

- une similitude géométrique des tubes ou des obstacles au sein des deux écoulements,
- l'égalité des nombres de Reynolds des deux écoulements.

Force de résistance sur un obstacle dans un écoulement visqueux

Si un obstacle fixe (objet solide) est placé dans l'écoulement d'un fluide visqueux, il subit de la part du fluide une *force de résistance* \vec{R} (Fig. 1).

Dans le cas d'un écoulement à faibles vitesses ($Re < Re_c$), le régime du fluide est laminaire, et la force de résistance dépend essentiellement des forces de friction développées à l'interface obstacle-fluide.

La force de résistance \vec{R} dépend de la viscosité η du fluide, de la dimension géométrique l de l'obstacle et de la vitesse v_∞ de l'écoulement (la vitesse de l'écoulement par rapport à l'obstacle, mesurée à grande distance de l'obstacle). Par exemple, si on considère une sphère solide placée dans un fluide, la force de résistance dans le régime laminaire est donnée par la *formule de Stokes*

$$\vec{R} = 6\pi \cdot \eta \cdot a \cdot \vec{v}_\infty$$

où a est le rayon de la sphère et v_∞ est la vitesse à l'infini (très éloigné).

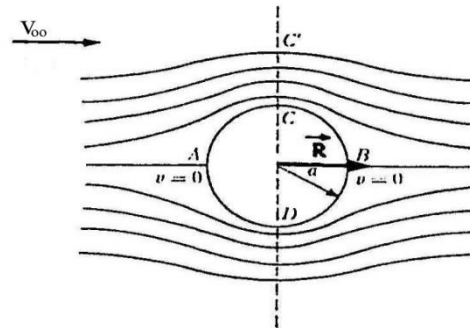


Fig 1 : La force de résistance dans le cas d'écoulement laminaire.

Dans le cas d'un écoulement à grandes vitesses ($Re > Re_c$), le régime du fluide est turbulent (Fig.2), et la force de résistance dépend alors essentiellement des forces d'inertie associées au travail de formation des tourbillons à l'arrière de l'obstacle, de sorte que \vec{R} ne dépend plus de la viscosité η du fluide.

La force de résistance \vec{R} dans le régime turbulent dépend en fait des dimensions géométriques de l'obstacle, représentées par la section apparente S de l'obstacle (la surface de l'obstacle mesurée perpendiculairement à l'écoulement fluide), du carré de la vitesse de l'écoulement par rapport à l'objet v et de la densité ρ du fluide par l'intermédiaire d'un nombre sans dimension, appelé le *coefficient de pénétration* C_x

$$|\vec{R}| = C_x \frac{\rho v^2}{2} S$$

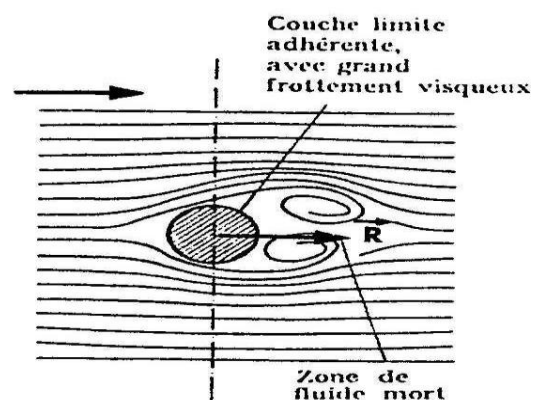


Fig2 : Régime turbulent

Le coefficient de pénétration C_x dépend de la forme géométrique de l'obstacle et il varie très lentement avec le nombre de Reynolds. Dans des domaines relativement étendus de R ($5'000 < R < 50'000$), le coefficient de pénétration C_x peut être considéré comme sensiblement constant pour une forme géométrique donnée. Quelques exemples de C_x sont donnés dans la Fig. 3 pour des obstacles à symétrie de révolution.

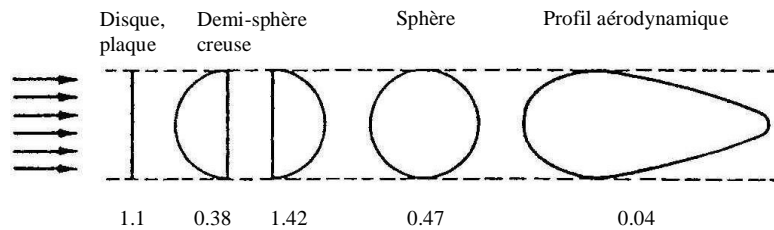


Fig 3 : Coefficients de pénétration pour différentes symétries de révolution

Force de portance et force de traînée sur une aile d'avion

Dans le cas d'une aile d'avion (Fig. 4), par suite de l'asymétrie de l'aile, en particulier de l'arête postérieure aiguë, et des forces de frottement visqueux développées à la surface de l'aile, il se forme un tourbillon à l'arrière de l'aile. La formation de ce remous est responsable à la fois de l'apparition d'une force de traînée \vec{W} (résistance horizontale à l'avancement de l'avion) et d'une force de portance \vec{F} (sustentation verticale de l'avion). On montre que ces forces peuvent s'écrire sous la forme suivante

$$|\vec{W}| = C_W \frac{\rho v^2}{2} A \quad \text{et} \quad |\vec{F}| = C_F \frac{\rho v^2}{2} A$$

où C_W et C_F sont respectivement le *coefficient de traînée* et le *coefficient de portance* de l'aile, et A est l'*aire portante* de l'aile, donnée par le produit $A = l \cdot t$ de la longueur l par la profondeur t de l'aile.



Fig 4: Illustrations d'une aile portante.

Les coefficients de traînée C_W et de portance C_F d'une aile dépendent de la géométrie de l'aile, notamment de la forme de sa section (épaisseur et asymétrie), du rapport l/t de l'aile (longueur/profondeur) et surtout de l'*angle d'attaque* γ de l'aile, à savoir l'angle formé entre le plan de l'aile et la direction de l'écoulement fluide.

Pour une aile donnée, l'angle d'attaque γ est donc un paramètre ajustable permettant d'influer les coefficients de traînée C_W et de portance C_F . Le *diagramme polaire de Lilienthal*, dans lequel on trace le coefficient de portance C_F en fonction du coefficient de traînée C_W pour différents angles d'attaque,

permet de trouver l'angle d'attaque γ optimal, défini comme celui fournissant le rapport $\frac{|\vec{F}|}{|\vec{W}|} = \frac{C_F}{C_W}$

(portance/trainée) maximum.

La tangente menée depuis l'origine à la courbe dans le diagramme de Lilienthal (Fig. 5) correspond à un rapport $\frac{C_F}{C_W}$ maximum, et le point

de contact donne l'angle d'attaque optimum.

Il faut encore noter que la valeur maximum du rapport $\frac{C_F}{C_W}$ d'une aile, obtenue pour l'angle

d'attaque optimal, dépend elle aussi de la géométrie de l'aile. Notamment, cette valeur est d'autant plus grande que le rapport l/t de l'aile (longueur/profondeur) est important, ce qui explique entre autre pourquoi les planeurs sont équipés d'ailes très longues et très fines.

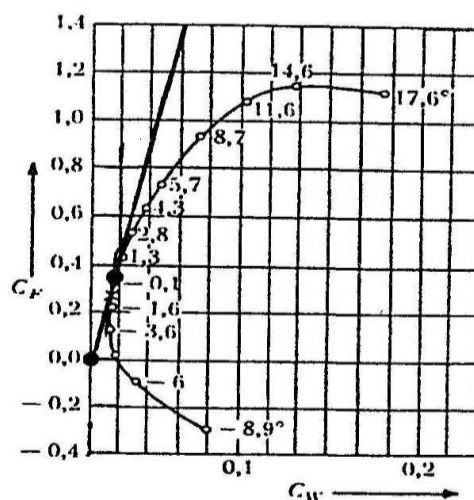


Fig 5: Diagramme de Lilienthal.

III. MATERIEL A DISPOSITION

La soufflerie à disposition comprend (voir Fig. 6) :

- un tunnel aérodynamique, transparent et de section rectangulaire, accessible par le bas, qui est relié à une soufflerie dont le débit peut être varié électroniquement,
- un support sur lequel on peut fixer des objets de différentes formes géométriques pour en étudier leur coefficient de pénétration C_x , ou une section d'aile d'avion pour en étudier les coefficients C_W et C_F de traînée et de portance, ou encore un modèle réduit de voiture pour en étudier le coefficient de pénétration C_x . Dans le cas du modèle réduit de voiture, le tunnel doit encore être équipé d'une plaque de base simulant la route,
- deux micromètres incorporés au support d'objets, permettant d'ajuster l'horizontalité et la position verticale des objets géométriques et des modèles réduits, ou de varier l'angle d'attaque de l'aile,
- deux capteurs incorporés au support d'objets, qui permettent une mesure précise de la force de résistance ou de traînée et de la force de portance. L'électronique de mesure associée à ces capteurs est équipée de boutons de mise à zéro grossière et fine. La mesure des forces est effectuée à travers des filtres passe-bas pour éliminer les fluctuations dues au régime turbulent (mesure de la valeur moyenne des forces). A noter que ces filtres introduisent un retard de la réponse, de sorte qu'il faut attendre la stabilisation de la valeur affichée avant la saisie,
- un anémomètre à hélice pour la mesure digitale de la vitesse d'écoulement d'air dans le tunnel. Cet anémomètre est placé à la sortie du tunnel, après la soufflerie et un tronçon d'homogénéisation du flux, et il peut être déplacé verticalement afin de mesurer le profil de vitesse dans le tube de sortie.

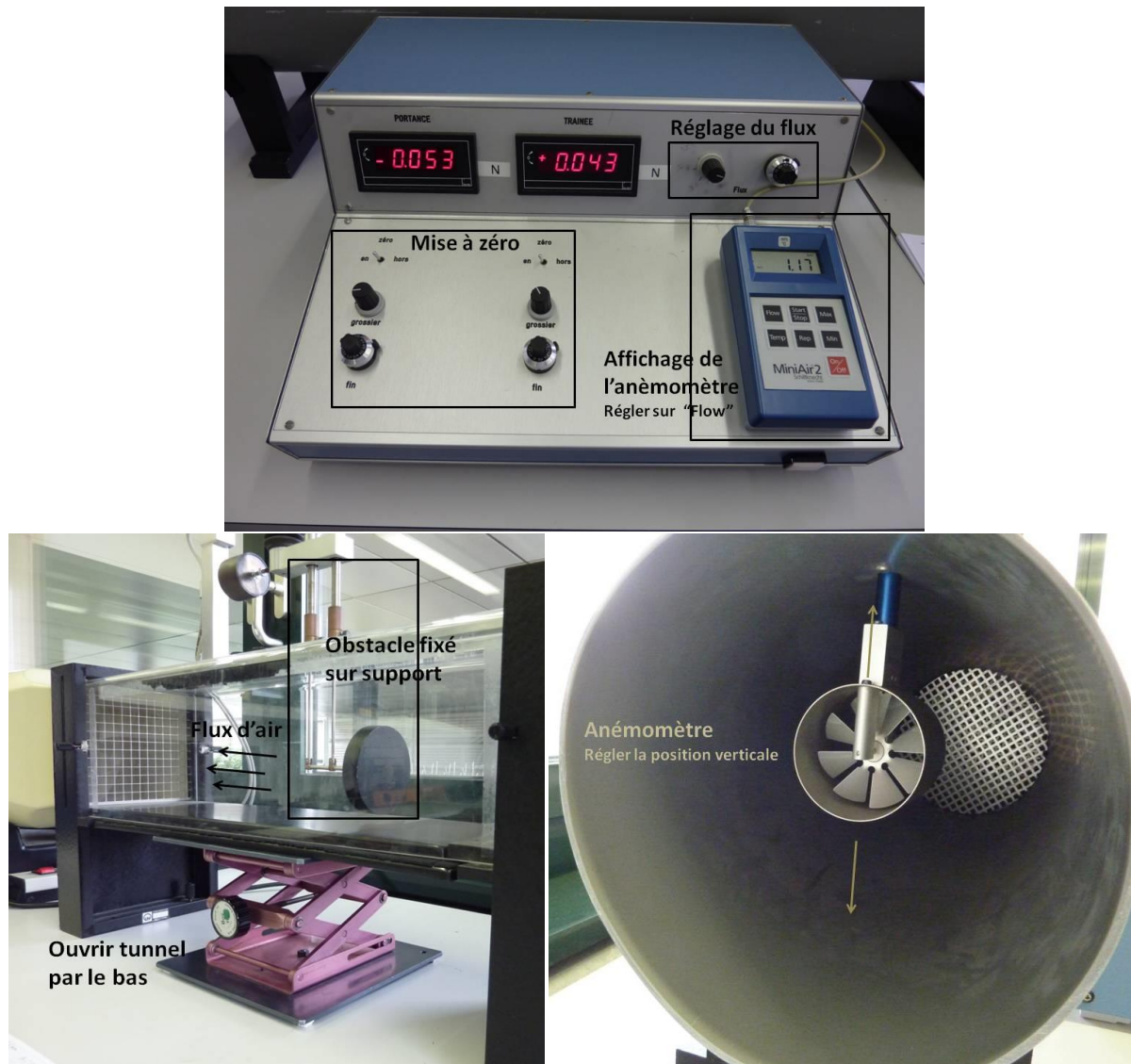


Fig 6: Dispositif expérimental.

IV. TRAVAUX REALISABLES

Calibration de la vitesse d'écoulement

Pour une vitesse donnée de la soufflerie, mesurer le profil de vitesse du flux d'air sortant du tube d'éjection, c'est-à-dire, la vitesse de l'air en fonction de la hauteur de l'anémomètre. En supposant une symétrie cylindrique sur les vitesses, et en appliquant l'équation suivante de continuité de l'hydrodynamique

$$\bar{v} \cdot S_1 = \iint_{S_1} \vec{v}_1 \cdot \vec{dS} = \iint_{S_2} \vec{v}_2 \cdot \vec{dS}$$

S_1 = la section du tunnel aérodynamique

\bar{v} = la vitesse moyenne d'écoulement dans le tunnel

\vec{v}_2 = le profil de vitesse d'éjection

S_2 = la surface de sortie du tube d'éjection

déterminer un facteur de correction C_α permettant de déduire directement la vitesse moyenne \bar{v} d'écoulement dans le tunnel à partir de la mesure de la vitesse d'éjection de l'air au centre v_c du tube d'éjection, i.e. $\bar{v} = C_\alpha v_c$.

Etude du coefficient de pénétration de formes géométriques de révolution

Mesurer la force de résistance et tracer le C_x des différents objets de révolution à votre disposition, en fonction de la vitesse moyenne \bar{v} d'écoulement dans le tunnel. Discuter l'effet de la forme géométrique de l'objet, l'effet de la section efficace de l'objet et l'effet de la vitesse moyenne \bar{v} sur le coefficient de pénétration C_x . Vérifier la loi en v^2 .

Etude des coefficients de traînée et de portance d'une aile

Pour une vitesse moyenne \bar{v} donnée d'écoulement dans le tunnel, mesurer la force de traînée et la force de portance de l'aile à disposition en fonction de l'angle d'attaque. Tracer le diagramme de Lilienthal $C_F(C_W)$ de l'aile, pour des angles d'attaque allant de -10° à $+20^\circ$. On définira par convention l'angle d'attaque nul comme celui pour lequel la force verticale de portance est nulle.

Vérifier la loi en v^2 pour la force de traînée et la force de portance, par exemple en traçant un deuxième diagramme de Lilienthal de l'aile avec une valeur très différente de la vitesse moyenne d'écoulement \bar{v} .

A l'aide du diagramme de Lilienthal, déterminer le rapport C_F/C_W maximum de cette aile, ainsi que l'angle d'attaque optimum de cette aile.

Etude du coefficient de pénétration d'une maquette d'automobile

Mesurer la force de résistance et tracer le C_x de la maquette d'automobile à votre disposition, en fonction de la vitesse moyenne \bar{v} d'écoulement dans le tunnel. Pour effectuer la mesure, ajouter dans le tunnel le support plan simulant la route, et ajuster, à l'aide des micromètres, la position de la voiture de telle sorte que les quatre roues soient situées à 1/2 mm au-dessus de la "route" pour éviter les frottements.

Mesurer en même temps la force aérodynamique de portance sur l'automobile, en fonction de la vitesse moyenne \bar{v} d'écoulement, et discuter les raisons du signe de cette force.

Discuter, en calculant les nombres de Reynolds des écoulements respectifs, de la validité de la mesure du C_x faite sur cette maquette en comparaison avec le C_x de la voiture réelle, connaissant l'échelle de réduction de la maquette et sachant que la voiture réelle est capable d'atteindre les 300 km/h! Que faudrait-il changer lors de l'étude de cette maquette en tunnel pour obtenir des valeurs de C_x comparables avec celles de la voiture réelle?