

AERODYNAMIQUE

B. AMANA , CH. RICHTER et O. HECKMANN

I INTRODUCTION

Ce TP est consacré à l'étude de l'écoulement de l'air. Nous présenterons d'abord les éléments théoriques nécessaires à la compréhension des manipulations qui vont suivre, notamment le théorème de Bernoulli dans le cas des gaz parfaits. Nous procéderons ensuite à la mesure de débits de gaz dans différentes sections d'un tube de Venturi, puis nous déterminerons les coefficients aérodynamiques de corps de profils différents, nous traiterons pour terminer le cas de l'écoulement dans une veine aérodynamique où nous mesurerons la traînée et la portance sur un profil en aile d'avion.

II THEORIE

II.1 Pression dans un fluide

Considérons la figure suivante caractérisant un milieu fluide que nous décomposons en deux parties (1) et (2). La force que la partie (1) exerce sur la partie (2) à travers un élément de surface réel ou fictif dS a une direction quelconque. Mais cette force \vec{df}_{12} peut toujours être décomposée en :

- une composante tangentielle \vec{df}_T et
- une composante normale \vec{df}_N

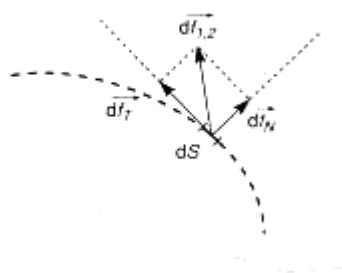


Figure II-1

La quantité df_T/dS représente la contrainte tangentielle et df_N/dS la contrainte normale. Ce sont des grandeurs scalaires.

Par définition, on appelle pression la contrainte normale

$$p = df_N/dS. \quad (1)$$

En statique des fluides seules interviennent les forces de pression \vec{df}_N . Les forces tangentielles n'apparaissent qu'en dynamique des fluides. Elles correspondent aux frottements visqueux des couches fluides en mouvement les unes par rapport aux autres et par rapport à la paroi de la conduite.

Intéressons-nous dans un premier temps uniquement aux forces de pression \vec{df}_N

II.1.1 Variation de pression d'un point à un autre : $\vec{\text{grad}} p$

Soit un point M de coordonnées (x,y,z) pris dans un fluide. En M la pression est p_M . On écrira que p_M est une fonction de x,y,z :

$$p_M = p(x,y,z).$$

Soit M' un point très voisin de M de coordonnées (x+dx, y+dy, z+dz). La pression en M' différente de celle en M peut s'écrire :

$$p_{M'} = p_M + dp$$

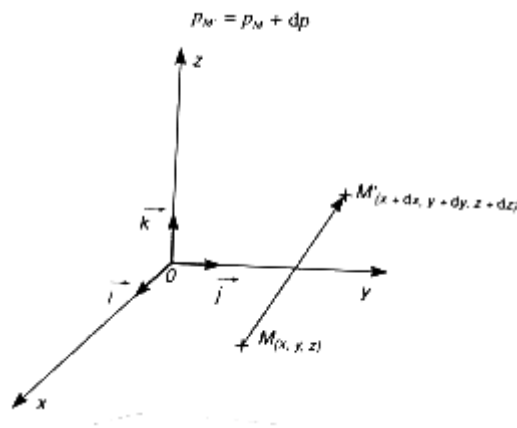


Figure II-2

$$p_{M'} = p(x+dx, y+dy, z+dz)$$

$$dp = p(x+dx, y+dy, z+dz) - p(x,y,z)$$

on peut alors écrire en utilisant les dérivées partielles :

$$dp = \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_{y,z} dx + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)_{x,z} dy + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{x,y} dz$$

D'autre part le vecteur déplacement de M en M' s'écrit: $\vec{MM'} = dx \vec{i} + dy \vec{j} + dz \vec{k}$

En appelant $\vec{\text{grad}} p$ le vecteur de composantes $(\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z})$, on a:

$$\vec{\text{grad}} p \cdot \vec{MM'} = \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz$$

Donc

$$dp = \vec{\text{grad}} p \cdot \vec{MM'} \quad (2)$$

II.1.2 Résultante des forces de pression

Soit un élément de volume dV. Il est soumis à des forces qu'exercent sur lui les parties voisines du fluide.

On supposera l'élément dV parallélépipédique de côtés da, db, dc, (voir figure suivante).

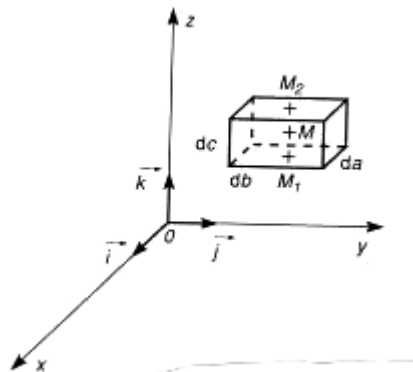


Figure II-3

En M la pression est p. Soit M₁ et M₂ les centres des faces parallèles au plan xOy. Les pressions sont respectivement p₁ en M₁ et p₂ en M₂.

La résultante des forces de pression sur les faces parallèles au plan xOy est parallèle à Oz et de la forme.

$$d\vec{f} \cdot \vec{k} = p_1 da db - p_2 da db = (p_1 - p_2) da db$$

$$\text{or } (p_1 - p_2) = (p_1 - p) - (p_2 - p)$$

Sachant que $p_2 - p_1 = \vec{\text{grad}} p_M \cdot \overrightarrow{MM_2}$ et $p_1 - p_2 = \vec{\text{grad}} p_M \cdot \overrightarrow{MM_1}$

on peut écrire :

$$p_1 - p_2 = \vec{\text{grad}} p_M \cdot (\overrightarrow{MM_1} - \overrightarrow{MM_2}) \Rightarrow p_1 - p_2 = \vec{\text{grad}} p_M \cdot \overrightarrow{M_2M_1}$$

or $\overrightarrow{M_2M_1} = -dc \vec{k}$ d'où $p_1 - p_2 = \vec{\text{grad}} p_M \cdot dc (-\vec{k})$

La résultante est donc telle que $dF_z \cdot \vec{k} = \vec{\text{grad}} p_M \cdot dc da db (-\vec{k})$

Comme $da db dc = dV$, on a $dF_z \cdot \vec{k} = -\vec{\text{grad}} p_M \cdot \vec{k} dV$

On obtient des résultats analogues pour dF_y et dF_x . On peut alors déduire que

$$\vec{dF} = -\vec{\text{grad}} p_M \cdot dV = \left(-\frac{\partial p}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial p}{\partial y} \vec{j} - \frac{\partial p}{\partial z} \vec{k} \right) dV$$

II.2 LES LOIS DE L'ÉCOULEMENT DES FLUIDES

Pour caractériser un fluide en mouvement deux grandeurs interviennent : la vitesse et le débit.

Le débit est la quantité de matière qui traverse une section droite de la conduite par unité de temps. On distingue le débit volumique et le débit massique.

II.2.1 Les débits volumique et massique.

Si dV est le volume qui a traversé une section droite de la conduite dans le temps dt , le débit volumique est par définition $Q_v = \frac{dV}{dt}$

Pour les fluides incompressibles ou peu dilatables (cas des liquides) dont la masse volumique est constante, il n'y a pas d'équivoque en parlant de volume ou de débit volumique.

On dit que l'écoulement des liquides est isovolume dans le cas particulier où la masse volumique est constante, indépendamment de la pression. Il en va différemment pour les gaz.

Si le gaz est assimilable à un gaz parfait d'équation d'état $pV = \frac{m}{M} RT$, on a $\rho = \frac{Mp}{RT}$.

La masse volumique ρ dépend donc de la température et de la pression.

- Si la vitesse d'écoulement du gaz est grande ($>70\text{m/s}$), on doit tenir compte de cette dépendance : l'écoulement est celui d'un gaz compressible.

- Si la vitesse est suffisamment faible, les variations de pression sont limitées et on peut admettre que la masse volumique du gaz ne dépend que de sa température : on dit que l'écoulement est celui d'un gaz dilatable.

- Enfin si la vitesse est faible et que la température est sensiblement constante, on pourra admettre que la masse volumique est constante : on retrouve un écoulement isovolume comme dans le cas des liquides.

Le débit massique est défini par la relation $Q_m = dm/dt$

La masse volumique étant définie par $\rho = dm/dV$ on peut écrire

$$\rho = Q_m/Q_v \text{ soit } Q_m = \rho Q_v$$

II.2.2. Ecoulements permanents et stationnaires.

Un régime est dit permanent ou stationnaire si les paramètres (pression, température, vitesse, etc.) ont une valeur constante dans le temps en chaque point de la conduite.

II.2.2.1. Définitions

On appelle ligne de courant (en régime stationnaire) la courbe suivant laquelle se déplace un élément de fluide. La ligne (L) (voir figure suivante) est une ligne de courant.

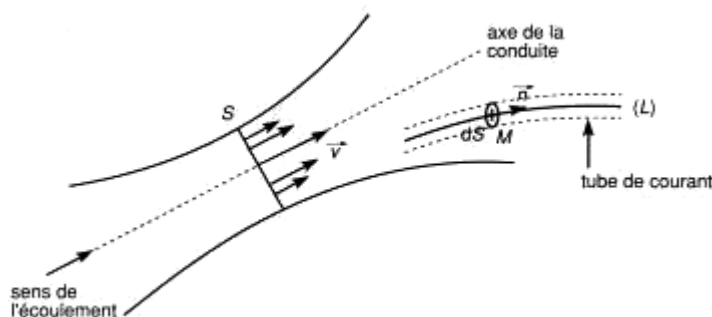


Figure II-4

Soit dS une très petite surface centrée sur M et normale à (L) . Les lignes de courant qui s'appuient sur dS délimitent un filet fluide aussi appelé tube de courant. La section dS du tube de courant est suffisamment petite pour que la vitesse du fluide soit la même en tous ses points.

II.2.2.2 Conservation du débit massique.

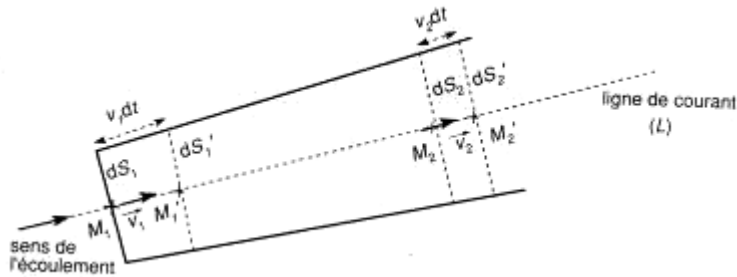


Figure II-5

Soit m la masse de fluide qui à l'instant t se trouve entre les sections dS_1 et dS_2 . A l'instant $t+dt$ elle se trouve entre les sections dS_1' et dS_2' .

La conservation de la masse s'écrit :

$$\rho_1 M_1 M'_1 dS_1 = \rho_2 M_2 M'_2 dS_2 \quad (4)$$

ρ_1 et ρ_2 sont respectivement les masses volumiques du fluide en M_1 et M_2 . Le produit $\rho M M' dS = \rho dV$ représente la masse de fluide qui a traversé la section dS dans le temps dt . C'est donc le débit massique à travers dS .

En régime stationnaire le débit massique est le même à travers toutes les sections droites d'un tube de courant.

$$dQ_{m1} = dQ_{m2}$$

Cette équation est aussi appelée équation de continuité.

Si v_1 et v_2 désignent les vitesses du fluide en M_1 et en M_2 , les distances parcourues dans le temps dt peuvent s'écrire :

$$M_1 M'_1 = v_1 dt \quad \text{et} \quad M_2 M'_2 = v_2 dt$$

l'équation (4) devient :

$$\rho_1 v_1 dS_1 = \rho_2 v_2 dS_2$$

La conservation du débit massique à travers les sections droites d'un tube de courant s'écrit donc aussi

$$dQ_m = \rho v dS = \text{constante.} \quad (5)$$

Les quantités $v_1 dS_1$ et $v_2 dS_2$ désignant les volumes de fluide ayant traversé dS_1 et dS_2 dans l'unité de temps, on peut écrire:

$$dQ_v = v dS \text{ et donc } dQ_m = \rho dQ_v.$$

dQ_m est constant et ne dépend pas de dS , dQ_v , lui dépend généralement de dS .

Rappelons que l'écoulement isovolume désigne l'écoulement d'un fluide de masse volumique constante. Si l'écoulement est isovolume, alors

$$v dS = dQ_v = dQ_m / \rho = \text{constante.}$$

Dans ce cas, le débit volumique est constant comme le débit massique. La vitesse v , dans ce cas, dans une section droite du tube de courant est inversement proportionnelle à l'aire de cette section.

Appliquons la conservation du débit à une canalisation régulière (on appelle canalisation régulière une canalisation dont la courbure est faible et dont les variations de section sont progressives).

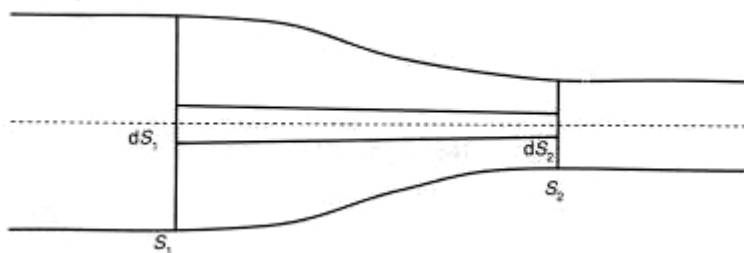


Figure II-6

A travers les éléments dS_1 et dS_2 on avait $dQ_{m1} = dQ_{m2}$. Pour les sections S_1 et S_2 on aura:

$$Q_m = \int_{(S1)} dQ_{m1} = \int_{(S2)} dQ_{m2} \text{ soit } Q_m = \int_{(S1)} \rho_1 v_1 dS_1 = \int_{(S2)} \rho_2 v_2 dS_2 = \text{constante.}$$

Donc tout au long de l'écoulement le débit massique reste constant.

Le débit volumique n'est généralement pas une constante sauf si l'écoulement est isovolume (soit dans le cas où $\rho_1 = \rho_2$).

Dans ce cas on peut écrire : $\int_{(S1)} v_1 dS_1 = \int_{(S2)} v_2 dS_2$.

Généralement les vitesses mesurées sont des vitesses moyennes. On appelle vitesse moyenne v_{ms} , la vitesse telle que

$$v_{ms} \cdot S = Q_{v/s}$$

$$Q_m = \rho_s Q_{v/s} = \rho_s v_{ms} S = \text{constante.}$$

avec ρ_s : masse volumique du fluide au niveau de la section S

v_{ms} : vitesse moyenne dans la section S.

Si l'écoulement est isovolume $\rho = \text{constante}$ et $Q_v = \text{constante}$

$$Q_m = \rho Q_v = \rho v_m S = \text{constante.} \quad (8)$$

Cette vitesse moyenne v_m apparaît comme la vitesse uniforme à travers S qui assurerait le même débit que la répartition réelle des vitesses. Elle est inversement proportionnelle à l'aire de la section si l'écoulement est isovolume.

II. 2. 3 Application de la relation fondamentale de la dynamique aux fluides

L'équation fondamentale de la dynamique appliquée à un élément de fluide de masse dm s'écrit : $dm \vec{a} = d\vec{F}$;

\vec{a} : accélération de l'élément de fluide étudié;

$d\vec{F}$: résultante des forces extérieures s'exerçant sur cet élément.

Les forces extérieures sont les suivantes :

- forces de pesanteur de l'élément : $dm \vec{g}$

- forces de pression résultante (confer équation (3) $d\vec{F}_p = - \text{grad } p \cdot dV$).

- forces de frottement visqueux que l'on n'explicitera pas pour l'instant $d\vec{F}_f$

La relation fondamentale s'écrit donc : $dm \vec{a} = dm \vec{g} - \text{grad } p \cdot dV + d\vec{F}_f$

ou encore

$$\vec{a} = \vec{g} - \text{grad } p \cdot dV/dm + d\vec{F}_f/dm$$

et avec $dV/dm = \rho$

$$\Rightarrow \vec{a} = \vec{g} - \text{grad } p / \rho + d\vec{F}_f/dm \quad (9)$$

Pour pouvoir tirer des renseignements plus concrets, on va projeter le vecteur \vec{a} de l'équation (9) sur la direction de la ligne de courant et sur la direction perpendiculaire.

Soit (L) la ligne de courant, trajectoire de l'élément de fluide étudié. Soit M, la position de l'élément à l'instant t et soit \vec{v} et \vec{a} sa vitesse et son accélération (voir figure suivante)

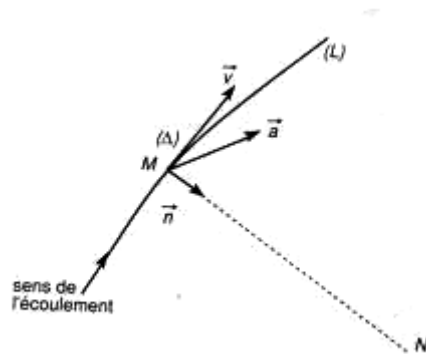


Figure II-7

La projection de \vec{a} sur MN (normal à (L)) n'est autre chose que la composante normale de l'accélération.

$$\vec{a} \cdot \vec{n} = v^2/R$$

\vec{n} : vecteur unitaire pris sur MN et R rayon de courbure de la trajectoire (L) en M.
on aura donc

$$v^2/R = \vec{g} \cdot \vec{n} - (\text{grad } p / \rho) \cdot \vec{n} + d\vec{F}_f/dm \cdot \vec{n} \quad (10)$$

Si \vec{i} est le vecteur unitaire de la direction Δ normale en M au plan de la figure alors:

$$\vec{a} \cdot \vec{i} = 0$$

$$d'où 0 = \vec{g} \cdot \vec{i} - (\vec{\text{grad}} p / \rho) \cdot \vec{i} + d\vec{F}_f / dm \cdot \vec{i} \quad (11)$$

On va supposer que les lignes de courant sont peu courbées c'est-à-dire le rayon de courbure R très grand en M; v^2/R tendra vers 0.

On va aussi supposer que les forces de viscosité sont nulles (ou négligeables) ou bien tangentes aux lignes de courant. Ces deux suppositions se résument concrètement à étudier l'écoulement d'un fluide loin de tout obstacle (où les lignes de courant sont rectilignes et assez loin de la paroi de la conduite (où les vecteurs vitesses varient peu d'un élément à ses voisins).

Si les vecteurs vitesses sont sensiblement parallèles entre eux et sensiblement égaux, il en est de même des forces de viscosité qui sont alors tangentes aux lignes de courant. Une telle zone d'écoulement est dite zone de « fluide libre ». On aura alors :

$$d\vec{F}_f \cdot \vec{i} = d\vec{F}_f \cdot \vec{n} = 0;$$

et comme $v^2/R=0$, on déduit de (10) et (11) que

$$0 = (\vec{g} - \vec{\text{grad}} p / \rho) \cdot \vec{i}$$

$$0 = (\vec{g} - \vec{\text{grad}} p / \rho) \cdot \vec{n}$$

Le vecteur $\vec{g} - \vec{\text{grad}} p / \rho$ est donc tangent en M à la ligne (L).

Ainsi quelle que soit la direction MX normale à (L) et quel que soit le point M' appartenant à MX, on aura

$$(\vec{g} - \vec{\text{grad}} p / \rho) \cdot \vec{MM}' = 0.$$

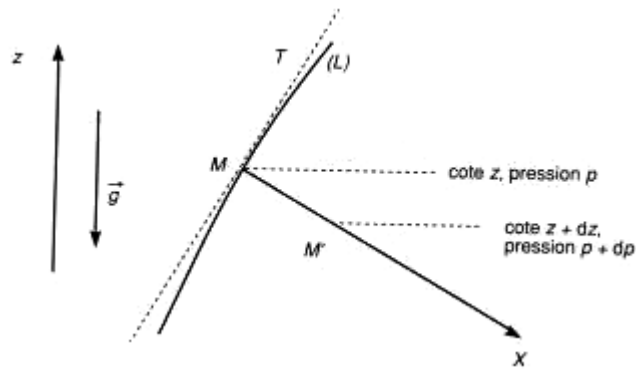


Figure II-8

On sait que $\vec{\text{grad}} p \cdot \vec{MM'} = dp$ (voir relation (2)) et par ailleurs (voir figure précédente) que

$$\vec{g} \cdot \vec{MM'} = -gdz$$

On obtient donc $:-gdz-dp/\rho = 0$ ou encore $\rho gdz+dp = 0$

Cette relation est applicable sur toute direction normale à la ligne de courant (L) à condition de se trouver dans une zone de fluide libre.

Si la masse volumique ρ du fluide est constante, on peut intégrer la relation précédente.

On obtient alors **$\rho gz+p = \text{constante}$** (12).

Ce résultat important exprime que lors d'un écoulement isovolume, dans un zone de fluide libre, la quantité $\rho gz+p$ est la même en tous les points d'une section normale aux lignes de courant.

NB: En statique des fluides (fluides en équilibre) les forces de frottement n'interviennent pas et l'accélération \vec{a} est nulle en tous les points du fluide.

L'équation(9) devient $\vec{0} = \vec{g} - \vec{\text{grad}} p / \rho$

Pour tout point quelconque M' du fluide on a

$$(\vec{g} - \vec{\text{grad}} p / \rho) \cdot \vec{MM'} = 0.$$

Ou encore

$$-gdz-dp/\rho = 0$$

en intégrant on obtient :

$$\rho gz+p = \text{constante}.$$

Cette équation est valable pour tous les points du fluide en équilibre contrairement au cas du fluide en mouvement où elle n'est valable qu'en des points d'une section droite normale aux lignes du courant.

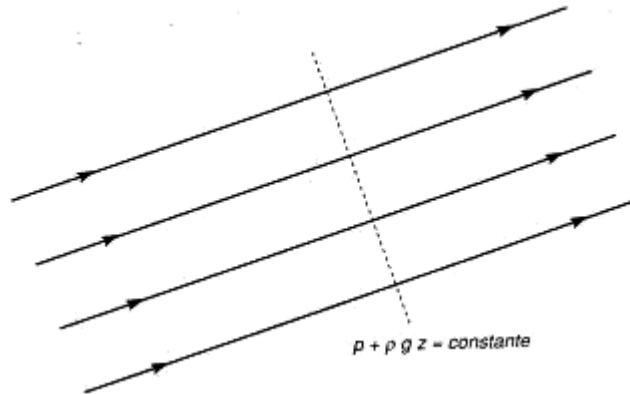


Figure II-9

II.2.4. Théorème de Bernoulli

On va appliquer le théorème de l'énergie cinétique à l'écoulement stationnaire dans une conduite quelconque (régulière ou non). Soit un tube de courant et soit M_1M_2 la ligne de courant passant par les centres M_1 et M_2 des deux sections droites dS_1 et dS_2 (voir figure suivante).

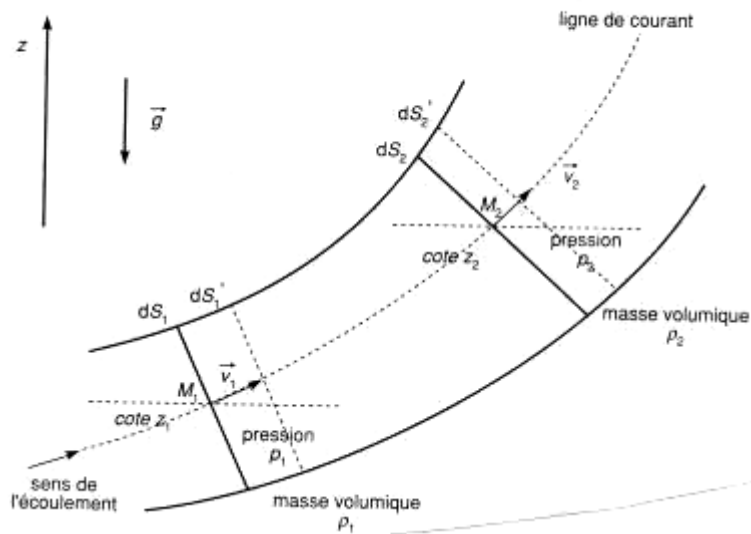


Figure II-10

Si m est la masse de fluide compris entre les sections dS_1 et dS_2 à l'instant t , celle du fluide compris entre dS'_1 et dS'_2 à l'instant $t+dt$ est aussi m .

La variation de l'énergie cinétique de cette masse m entre les instants t et $t+dt$ est égale à la somme des travaux de toutes les forces extérieures qui s'exercent sur elle.

Les forces extérieures qui s'exercent sur une masse dm sont:

- des forces de pesanteur
- des forces de pression
- des forces de frottement.

Variation de l'énergie cinétique: $\frac{1}{2} dm (v_2^2 - v_1^2)$

- Travail des forces de pesanteur: $-dm g (z_2 - z_1)$ (g orienté de haut en bas)

- Travail des forces de pression: $p_1 dV_1 - p_2 dV_2$

$$\text{Or } dV_1 = M_1 M'_1 dS_1 \text{ et } dV_2 = M_2 M'_2 dS_2$$

$$M_1 M'_1 = v_1 dt \text{ et } M_2 M'_2 = v_2 dt.$$

$$\Rightarrow p_1 v_1 dS_1 dt - p_2 v_2 dS_2 dt = \text{travail des forces de pression.}$$

$$\text{Or } dQ_m = \rho_1 v_1 dS_1 = \rho_2 v_2 dS_2$$

$$\Rightarrow \rho_1 dV_1 = \rho_2 dV_2 = dm \Rightarrow dV_1 = \frac{dm}{\rho_1} \text{ et } dV_2 = \frac{dm}{\rho_2}$$

d'où $dm \left(\frac{p_1}{\rho_1} - \frac{p_2}{\rho_2} \right) = \text{travail des forces de pression.}$

-Travail des forces de frottement dW_f

Ce travail qui ne sera pas explicité est toujours négatif. L'énergie qu'il représente est dissipée en chaleur tout au long de l'écoulement.

Le théorème de l'énergie cinétique s'écrit alors :

$$\frac{1}{2} dm (v_2^2 - v_1^2) = -dm g (z_2 - z_1) + (p_1/\rho_1 - p_2/\rho_2) dm + dW_f$$

ou encore l'équation de Bernoulli

$$\left(\frac{1}{2}v_2^2 + g z_2 + \frac{p_2}{\rho_2}\right) - \left(\frac{1}{2}v_1^2 + g z_1 + \frac{p_1}{\rho_1}\right) = \frac{dW_f}{dm} = \left(\frac{1}{Q_m}\right) \left(\frac{dW_f}{dt}\right) \quad (13)$$

puisque $dm = Q_m dt$

dW_f / dt représente la puissance P_f perdue par la masse de fluide dm du fait des frottements.

La quantité $\frac{1}{2}v^2 + gz + p/\rho$ représente l'énergie totale de l'unité de masse au point M, on l'appelle charge massique du fluide en M.

L'équation de Bernoulli s'écrit donc:

$$(\text{charge massique})_2 - (\text{charge massique})_1 = P_f / Q_m$$

La quantité $\frac{1}{2}v^2$ correspond à l'énergie cinétique de l'unité de masse du fluide, la quantité gz l'énergie due à la pesanteur (énergie potentielle) et le terme p/ρ représente l'énergie due à la pression.

Si on multiplie l'expression présente par la masse volumique ρ , on obtient :

$\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gz + p$. Chacun des termes est homogène à une pression. On retrouve la quantité $\rho gz + p$ qui est la pression motrice au point considéré et $\frac{1}{2} \rho v^2$ est la supplément de pression dû au mouvement du fluide : c'est la pression dynamique.

La quantité $\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gz + p$ correspond donc à la pression totale.

II.2.4. Le théorème de Bernoulli pour les fluides parfaits

On dit qu'un fluide est parfait lorsqu'il n'est le siège d'aucune force de frottement.

Lorsqu'un fluide est immobile, quelle que soit sa nature, il se comporte comme un fluide parfait. En dynamique, le fluide est animé d'une certaine vitesse et de forces de frottement apparaissent inévitablement entre le fluide et la paroi de la conduite et entre les couches de fluides animés de vitesses différentes.

On peut cependant sous certaines conditions traiter le fluide comme s'il était parfait:

- si les vitesses sont faibles
- si la viscosité du fluide est faible : c'est souvent le cas des gaz

- si la vitesse varie peu d'un point à un autre d'une section droite de la conduite : c'est le cas dans une canalisation rectiligne en des points éloignés de la paroi et d'éventuels obstacles;

Si on reprend la relation (13) en admettant qu'il n'y a pas de frottements, on peut écrire :

$$1/2v_2^2 + g z_2 + p_2/\rho_2 = 1/2v_1^2 + g z_1 + p_1/\rho_1 \quad (14)$$

On peut donc énoncer que lors d'un écoulement permanent isovolume d'un fluide parfait, la quantité $1/2v^2 + gz + p/\rho$ ou encore que la pression totale $1/2 \rho v^2 + \rho gz + p$ est un invariant.

II. 3 APPLICATION DES LOIS DE L'ÉCOULEMENT DES FLUIDES

II.3.1 Mesure des débits

Pour mesurer un débit on utilise la relation $Q_v = vS$ en considérant que l'écoulement est isovolume.

On peut envisager deux types de méthodes : la section S étant connue, mesure de la vitesse ; ou bien la vitesse v étant connue, mesure de la section S . La mesure de la vitesse peut être effectuée directement ou par l'intermédiaire de la mesure de la pression.

II.3.1.1 Mesure de vitesse locale par l'intermédiaire de la pression : tube de Pitot.

Si on introduit dans une conduite ou circule un fluide, un tube coudé à angle droit (voir figure suivante), on constate que le liquide remonte jusqu'à la hauteur h au-dessus de l'axe horizontal.

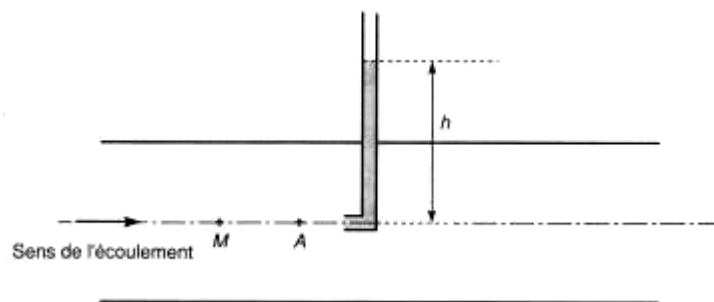


Figure II-11

Au point M, la vitesse du fluide est v , sa pression p . En A, on admet que l'obstacle constitué par le tube arrête le fluide qui est obligé de le contourner. A est appelé point d'arrêt et la vitesse du fluide est nulle en A. Soit p_A la pression en A. On a $z_A = z_M$ (même horizontale).

L'équation de Bernoulli (14) appliqué au fluide sur la ligne MA s'écrit :

$$1/2v^2 + p/\rho = p_A/\rho$$

On a alors : $p_A = p + \rho v^2/2$.

On voit que $p_A > p$.

- p_A est la pression totale p_T de l'écoulement et est parfois appelée pression d'arrêt.

- La pression p en M est la pression statique p_S .

- $\rho v^2/2$ correspond à la pression dynamique p_D

La hauteur h mesure la pression totale p_T .

La vitesse de l'écoulement au point M sera donnée par:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_T - p_S)} = \sqrt{\frac{2}{\rho} p_D} \quad (15).$$

$p_D = p_T - p_S$ s'appelle pression différentielle. Pour mesurer la vitesse v il faut donc disposer aussi d'une prise de pression statique p_S et d'une prise de pression totale.

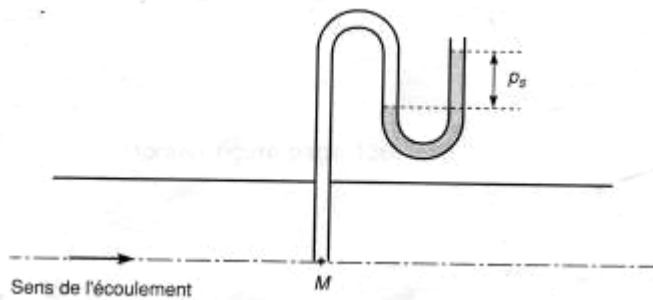


Figure II-12

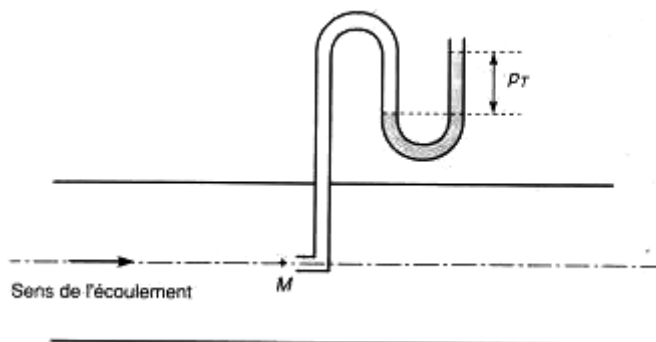


Figure II-13

D'où la nécessité d'un tube de Pitot double ou sonde de Pitot souvent appelée sonde manométrique.

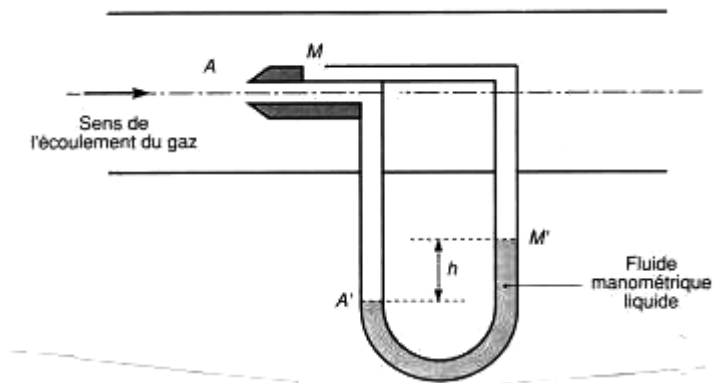


Figure II-14

L'écoulement étudié est celui d'un gaz alors que le fluide manométrique est un liquide de masse volumique ρ'

On a vu plus haut que $p_A - p_M = \rho v^2/2$ (16)

Considérons maintenant les fluides en équilibre dans la sonde manométrique (statique des fluides).

Les fluides étant immobiles (l'air et le liquide), la quantité $\rho g z + p$ est un invariant en tous les points d'un fluide donné. On peut alors écrire :

$$p_A + \rho g z_A = p_{A'} + \rho g z_{A'} \quad (17)$$

$$p_M + \rho g z_M = p_{M'} + \rho g z_{M'} \quad (18)$$

$p_{A'} + \rho' g z_{A'} = p_{M'} + \rho' g z_{M'}$ (19) (A' et M' sont séparés par du liquide de masse volumique ρ').

$$(17) - (18) \Rightarrow p_A - p_M = p_{A'} - p_{M'} + \rho g (z_{A'} - z_{M'}) \quad (20) \quad \text{car } z_A - z_M = 0$$

$$(19) \Rightarrow p_{A'} - p_{M'} = \rho' g (z_{M'} - z_{A'})$$

En remplaçant (19) dans (20), on obtient :

$$p_A - p_M = \rho' g (z_{M'} - z_{A'}) + \rho g (z_{A'} - z_{M'})$$

$$p_A - p_M = g (z_{M'} - z_{A'}) (\rho' - \rho). \quad \text{Or } z_{M'} - z_{A'} = h.$$

Alors $p_A - p_M = g (\rho' - \rho) h$ (21)

En combinant (21) avec l'équation (16) on obtient :

$$\rho v^2/2 = g (\rho' - \rho) h$$

ou encore

$$v = \sqrt{2\left(\frac{\rho'}{\rho} - 1\right)gh}$$

Le fluide dans la conduite étant un gaz, sa masse volumique ρ est toujours faible devant celle du liquide manométrique. Donc $\rho'/\rho \gg 1$.

$$\Rightarrow v = \sqrt{2\left(\frac{\rho'}{\rho}\right)gh} \quad (22)$$

Sur certains manomètres on lit directement la pression $\rho'gh$ en Pascal.

Si Δp est la pression lue, on a

$$v = \sqrt{2\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (22')$$

II.3.1.2. Le tube de Venturi

Le tube de Venturi comporte trois parties successives (voir figure suivante) Une partie convergente A, un col cylindrique C et une partie divergente B. Deux prises de pression sont pratiquées, l'une en amont, l'autre en aval.

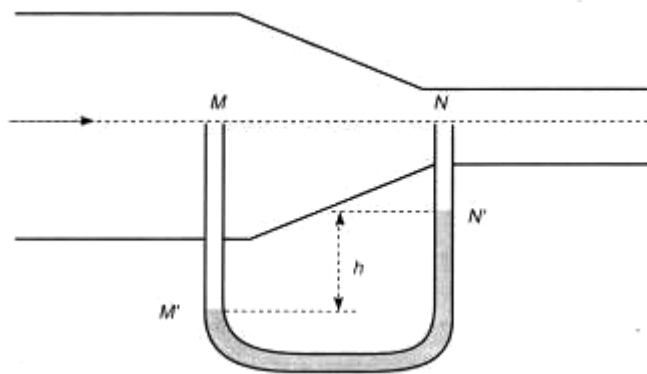


Figure II-15

On peut écrire l'équation de Bernoulli pour les points M et N

$$\frac{1}{2} \rho v_M^2 + \rho g z_M + p_M = \frac{1}{2} \rho v_N^2 + \rho g z_N + p_N$$

Les points M et N étant à la même côte (conduite horizontale), on a alors

$$\frac{1}{2} \rho v_M^2 + p_M = \frac{1}{2} \rho v_N^2 + p_N$$

v_M étant la vitesse d'écoulement que l'on cherche à mesurer il vient:

$$v_M^2 - v_N^2 = \frac{2}{\rho} (p_M - p_N)$$

Pour exprimer la différence de pression entre les points MN, on écrit pour les fluides en équilibre dans le manomètre (statique des fluides):

$$p_M + \rho g z_M = p_{M'} + \rho g z_{M'}$$

$$p_N + \rho g z_N = p_{N'} + \rho g z_{N'}$$

$$p_{M'} + \rho' g z_{M'} = p_{N'} + \rho' g z_{N'}$$

Or $z_{N'} - z_{M'} = h$ et $z_M = z_N$; on obtient alors:

$$p_N - p_M = g(\rho - \rho')h$$

ou encore $v_M^2 - v_N^2 = 2gh(1 - \rho'/\rho)$

Le débit étant constant $Q_v = v_M S_M = v_N C$

S_M et S_N étant respectivement les sections en M et N

d'où

$$v_N = \frac{v_M \cdot S_M}{S_N}$$

$$v_M^2 \left(1 - \frac{S_M^2}{S_N^2}\right) = 2gh \frac{\rho - \rho'}{\rho} = 2gh \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right)$$

$$\Rightarrow v_M = \sqrt{\frac{2gh \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right)}{1 - \frac{S_M^2}{S_N^2}}}$$

$$\frac{\rho'}{\rho} \gg 1$$

$$\Rightarrow v_M \approx \sqrt{\frac{2gh \frac{\rho'}{\rho}}{\frac{S_M^2}{S_N^2} - 1}} = \sqrt{\frac{2\rho'gh}{\rho \left(\frac{S_M^2}{S_N^2} - 1\right)}}$$

$$v_M \approx \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \left(\frac{S_M^2}{S_N^2} - 1\right)}}$$

II.3 RÉSISTANCE DES CORPS IMMERGES DANS UN FLUIDE EN MOUVEMENT.

Cet effet de résistance est rencontré lorsqu'un fluide en mouvement circule autour d'un solide immobile immergé qui constitue un obstacle ou soit lorsqu'un solide est en mouvement dans un fluide initialement en équilibre.

II.3.1 Mouvement relatif très lent

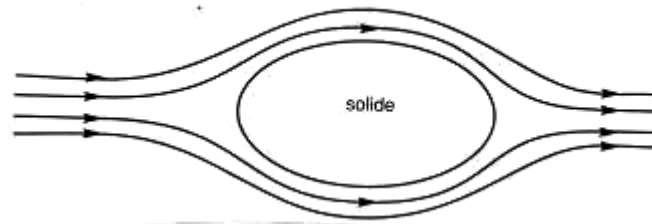


Figure II-16

On parle dans ce cas d'écoulement laminaire les filets fluides étant progressivement déformés aux alentours du solide.

II.3.2 Mouvement plus rapide

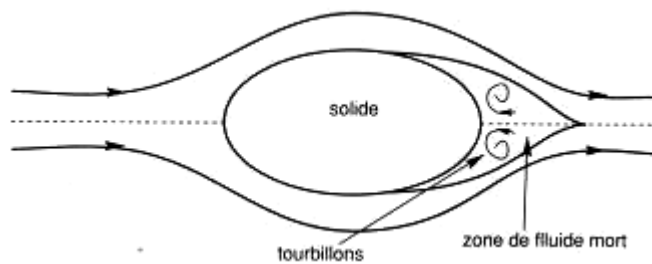


Figure II-17

On voit apparaître un sillage de fluide mort à l'arrière de l'obstacle.

II.3.3 Mouvement encore plus rapide

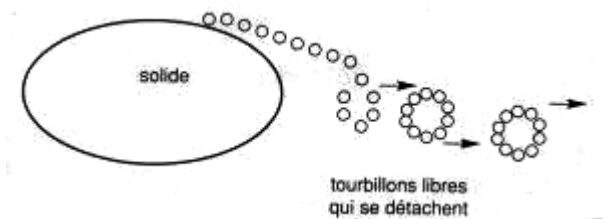


Figure II-18

Les tourbillons qui se forment à l'arrière du solide se détachent et il apparaît une série de tourbillons libres.

II.3.4 Expression de la résistance

Si la différence entre l'avant et l'arrière de l'obstacle correspondait à la pression dynamique $\frac{1}{2} \rho v^2$ et si le fluide n'avait aucune viscosité (fluide parfait), la force de résistance s'écrirait :

$\frac{1}{2} \rho v^2 \cdot S$ (S est la section droite de l'obstacle).

Pour tenir compte des phénomènes réels, on peut poser $F = \frac{1}{2} C \rho v^2 \cdot S$ en introduisant le coefficient de résistance C qui est une fonction du nombre de Reynolds.

II.3.5 Écoulement de fluide sur un profil en aile d'avion

La force exercée par un fluide sur une aile d'avion peut être décomposée en deux composantes. La composante F_t parallèle à la vitesse du fluide est appelée traînée et la composante perpendiculaire F_p est appelée portance.

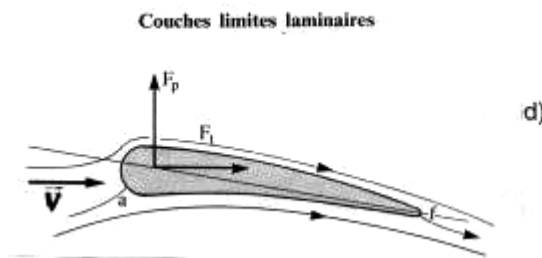


Figure II-19

Ces deux composantes dépendent de l'angle d'attaque qui représente l'angle entre la direction d'écoulement et la tangente à l'aile.

Comme nous l'avons vu plus haut, on peut écrire :

$$F_t = \frac{1}{2} C_t \rho v^2 S \quad \text{et} \quad F_p = \frac{1}{2} C_p \rho v^2 S$$

S : surface de l'aile et ρ : densité du fluide

La traînée F_t est opposée à la vitesse : elle a un effet de freinage et on cherche à la minimiser. La portance F_p maintient l'avion en sustentation et on cherche à la rendre maximale.

Les coefficients C_t et C_p dépendent uniquement de la géométrie et de l'incidence de l'aile. La portance F_p augmente avec la vitesse v de l'aile par rapport au fluide : l'avion peut décoller lorsque la vitesse v est suffisante pour que F_p excède son poids. Pour diminuer les longueurs d'atterrissage et de décollage d'un avion, il faut réduire la vitesse de celui-ci pendant les phases de vol correspondantes et par la suite, augmenter l'incidence de l'aile de manière à maintenir constant le produit $v^2 \cdot C_p$.

Il existe un angle critique α_c au delà duquel la pression sur la face supérieure de l'aile augmente, diminuant rapidement la portance et augmentant la traînée. L'apparition de ce phénomène dit de décrochage peut mener à une chute de l'avion.

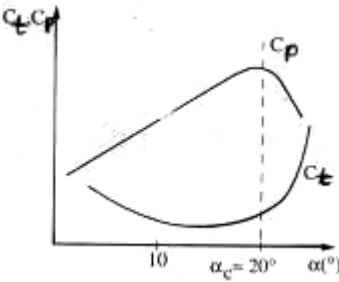


Figure II-20

III-PARTIE EXPERIMENTALE

III . 1 . MATERIEL

III.1.1 Système de ventilation aspirant - refoulant

Les éléments composant le ventilateur aspirant refoulant sont représentés sur la figure suivante

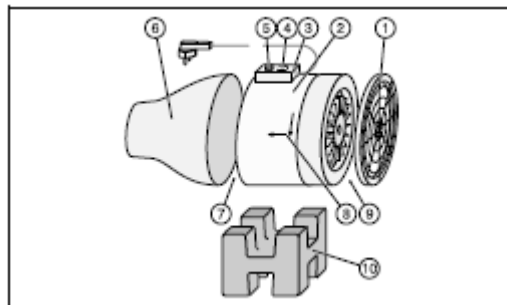


Figure III-1

- (1) Grille de protection enfichable sur le côté aspirant (9) ou refoulant (7) du ventilateur
- (2).Ventilateur : vitesse maximum 2550 tr/mn; débit maximum : 875 m³/h.
- (3) Couvercle pour l'unité de commande.
- (4) Interrupteur secteur.
- (5) Bouton de réglage du potentiomètre pour le réglage en continu de la vitesse entre 10 % et 100 % de la vitesse maximale.
- (6) Buse de diamètre 100 mm à enficher sur le côté refoulement (7) du ventilateur.
- (8) Flèches pour l'indication du sens de rotation et du sens de l'écoulement de l'air.
- (10) Pied pour le montage du ventilateur.

Précaution : Ne mettre en route le ventilateur qu'une fois la grille de protection (1) installée et que la buse ou le tunnel aérodynamique (à voir ci-après) soit en place. La grille de protection sera placée sur le côté aspirant en cas d'utilisation comme ventilateur refoulant, notamment dans les expériences avec le tube de Venturi et la veine d'essai pour l'aérodynamique, ou bien sera sur le côté refoulement en cas d'utilisation comme ventilateur aspirant avec le tunnel aérodynamique.

III.1.2 Tube de venturi

Le tube de Venturi utilisé avec le ventilateur sert à étudier l'influence d'un changement de section sur la pression statique au cours de l'écoulement. Il mesure environ 42 cm de long. Le diamètre décroît de 100 mm aux extrémités, à 50 mm au milieu du tube.

L'ensemble du dispositif est représenté sur la figure suivante

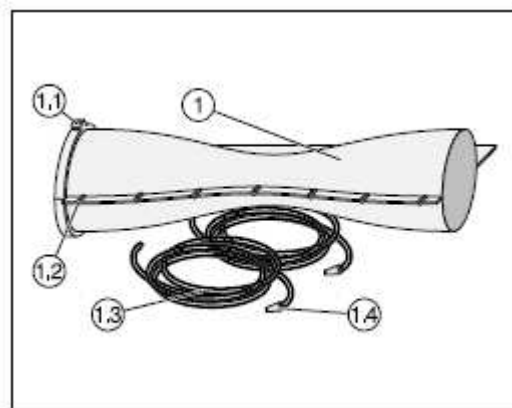


Figure III-2

(1) Tube de Venturi

(1.1) Élargissement annulaire avec échancrure pour une fixation à la base du ventilateur.

(1.2) Sept points de mesure de la pression statique.

(1.3) Tuyaux en plastique.(1.4) Prises pour le branchement des tuyaux (1.3) aux points (1.2).

III.1.3 Multimanoscope

Le multimanoscope permet la représentation simultanée de la pression à cinq points différents du tube. Il sera rempli uniquement avec de l'eau colorée (jamais avec d'autres liquides).

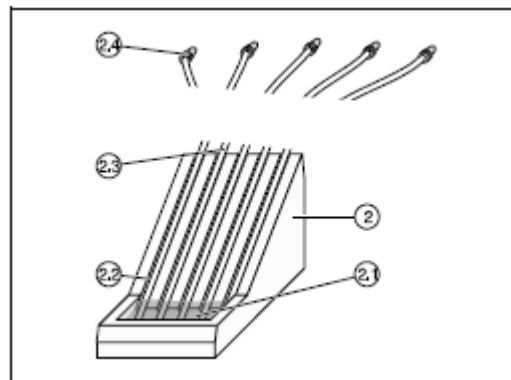


Figure III-3

(2) Multimanoscope.

(2.1) Cuve pour le liquide (eau colorée).

(2.2) Cinq rainures pour le positionnement des tuyaux (2.3).

(2.4) Cinq prises pour les points de mesure 1.2 du tube de Venturi.

III.1.4 Manomètre de précision et sonde manométrique

Le manomètre de précision est un manomètre à pression différentielle. Avec la sonde manométrique, il permet la mesure de la pression statique, de la pression totale et de la pression dynamique de gaz en écoulement. Une deuxième échelle donne la lecture directe de la vitesse d'écoulement. Le manomètre de précision est dessiné sur la figure suivante.

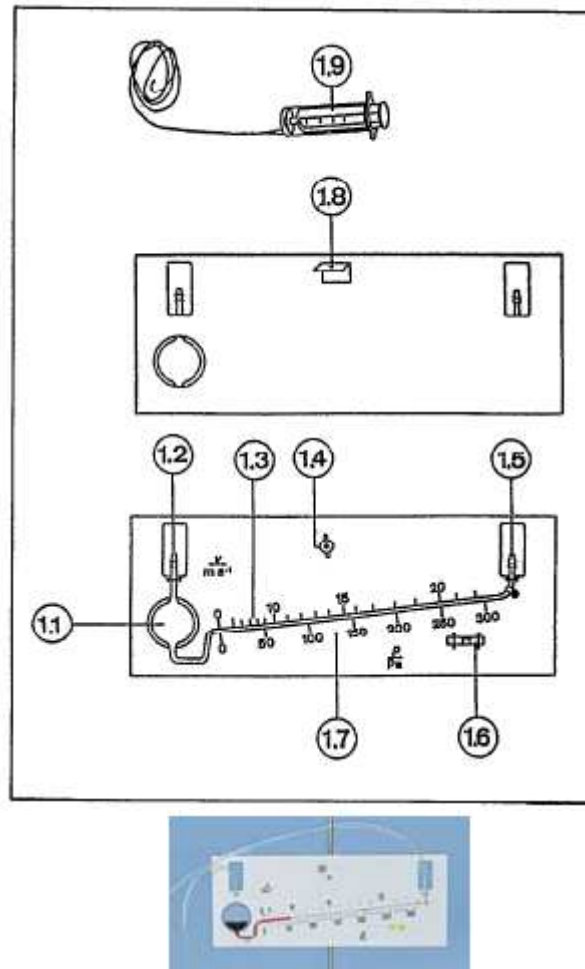


Figure III-4

- (1.1) Bac de réserve pour le liquide du manomètre.
 - (1.2) Tubulure à olive servant de raccord de tuyaux pour la mesure de surpression.
 - (1.3) Échelle de lecture de la vitesse d'écoulement.
 - (1.4) Écrou moleté pour le blocage du manomètre après ajustement horizontal.
 - (1.5) Tubulure à olive pour le raccordement de tuyaux pour la mesure de dépression.
 - (1.6) Niveau à bulle pour l'ajustement horizontal du manomètre.
 - (1.7) Échelle de pression, 0-310 Pa.
- A l'arrière :
- (1.8) Équerre en tôle pour la fixation du manomètre sur un élément de pied.
 - (1.9) Seringue avec tuyau pour remplir et vider le manomètre.

La sonde manométrique est illustrée sur la figure suivante.

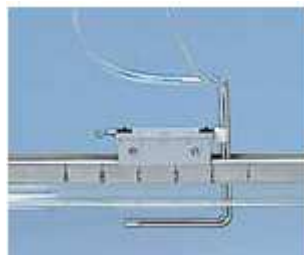
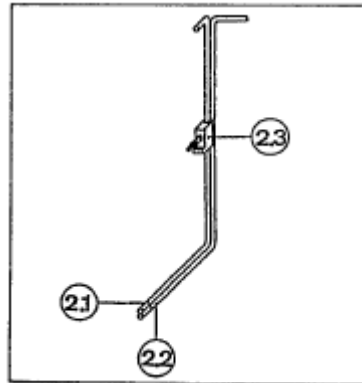


Figure III-5

(2.1) Sonde pour pression totale (ouverture de la sonde orientée contre l'écoulement).

(2.2) Sonde pour pression statique (ouverture de la sonde perpendiculaire à l'écoulement).

(2.3) Support pour la fixation de la sonde sur le chariot de mesure.

III.1.5 Tunnel aérodynamique

Le tunnel aérodynamique (**connecté sur le côté aspiration du ventilateur**) permet la réalisation d'expériences aérodynamiques dans une veine fermée. On pourra ainsi y effectuer la vérification de l'équation de Bernoulli, étudier l'écoulement de l'air dans l'environnement d'une aile etc.

Le tunnel aérodynamique est illustré sur la figure suivante.

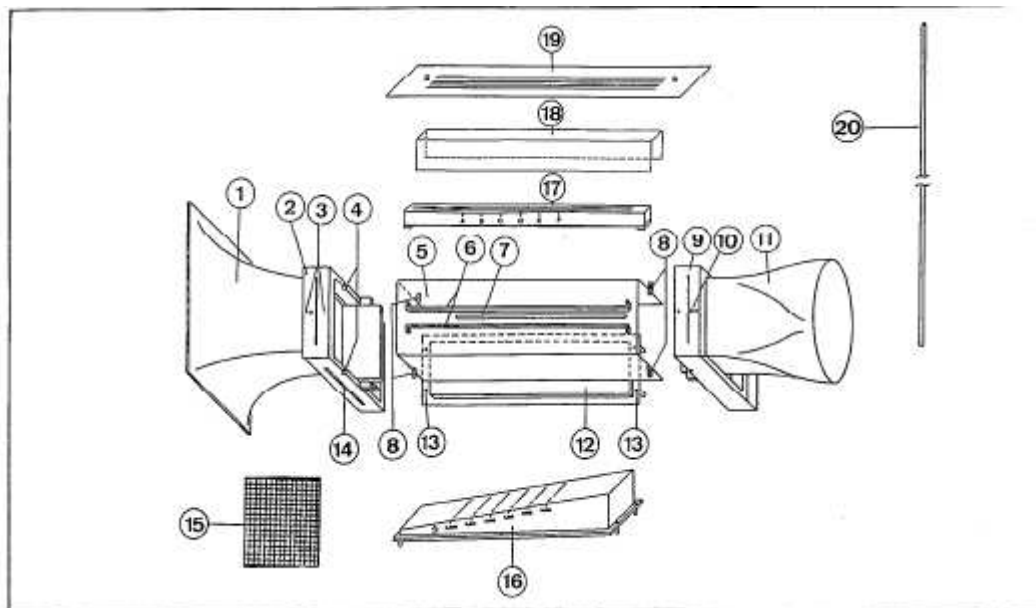


Figure III-6

- (1) Buse d'aspiration fixée à la porte d'entrée (2).
- (3) Trous pour enfoncer le dynamomètre de secteur.
- (4) Évidements pour les vis de fixation sur le couvercle en Plexiglas (5).
- (6) 2 rails polis pour supporter le chariot de mesure (à voir plus loin).
- (7) Fente pour le passage des tubes de maintien de l'aile et de la sonde manométrique.
- (8) 4 vis moletées pour la fixation du couvercle (5) sur les portes d'entrée et de sortie (2) et (9).

(10) Douille fileté pour fixer la tige (20) qui sert à la fixation du manomètre de précision.

(11) Diffuseur relié fixement à la porte de sortie pour l'introduction du ventilateur.

(12) Fond plat avec garniture en mousse pour étancher le tunnel.

(13) 4 vis pour visser le fond plat (12) ou la rampe de Bernoulli (16) pour les essais sur la loi de Bernoulli.

(14) Fente pour l'introduction du filtre de stabilisation (15)

(17) Baguette pour étancher la fente (7) du couvercle en Plexiglas pour les expériences avec la rampe de Bernoulli. Les marques de position pour la sonde manométrique correspondent à l'échelle des sections sur la rampe de Bernoulli.

(19) Paroi arrière en plastique noir avec lignes d'orientation horizontale blanches.

III.1.6 Dispositif de mesure des forces sur l'aile

Ce dispositif permet la mesure de la résistance de l'air et de la portance des ailes. Les éléments composants ce dispositif sont rassemblés sur la figure suivante.

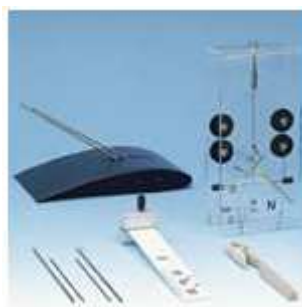
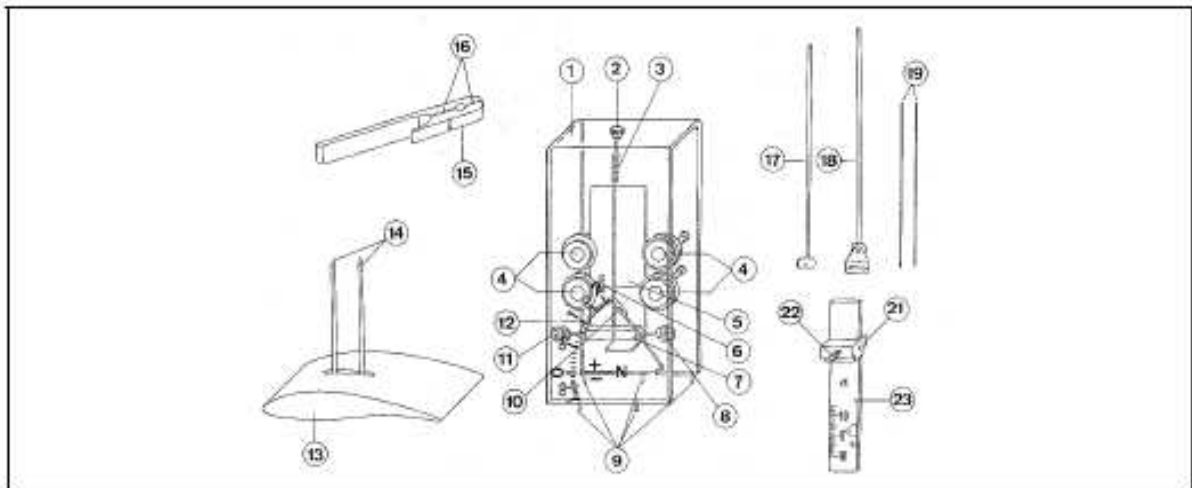


Figure III-7

(1) Balance aérodynamique.

- (2) Écrou moleté pour le réglage du point 0.
- (3) Ressort à spirale pour la mesure de la portance.
- (4) Poulie pour le guidage du traîneau (5).
- (6) Échelle de réglage de l'angle d'inclinaison.
- (7) Bloc d'accrochage des tiges de maintien (14) (2 tiges pivotantes) ou (17) (avant) et (18) (arrière).
- (8) Vis moletée pour le blocage de la tige arrière maintenant l'aile.
- (9) 5 fiches pour la fixation de la balance aérodynamique sur le chariot de mesure.
- (10) Indicateur de la portance sur l'échelle (12).
- (11) Vis moletée pour le blocage de la tige avant maintenant l'aile.
- (12) Échelle de portance -1+2 N (1 graduation = 0,1 N).
- (13) Aile.
- (15) Pince de fixation pour faciliter le montage de l'aile dans le bloc d'accrochage (7).
- (16) Deux trous de serrage des tiges de maintien.
- (19) Deux tiges transversales.
- (20) Support d'angle d'inclinaison.
- (21) Vis moletée pour le blocage de la plaque graduée (22). Cette dernière est déplaçable verticalement. Sa graduation va de -16° à 16° .

7) Accessoires complémentaires



Sont aussi utilisés pour les expériences aérodynamiques :

- Un rail de guidage de 50 cm de long avec une fente au milieu pour les essais d'aérodynamique à l'air libre.
- Un dynamomètre pour la mesure de la traînée.
- Des corps de différents profils.
- Un chariot sur rails auquel sera fixé soit l'aile ou les corps de différents profils, soit la sonde de précision.

III . 2 MANIPULATIONS

III . 2 .1 Mesure du débit avec le tube de Venturi

Dans cette première expérience, on va déterminer la quantité d'air s'écoulant par unité de temps à travers le tube en mesurant la différence de pression entre deux positions d'un tube de Venturi.

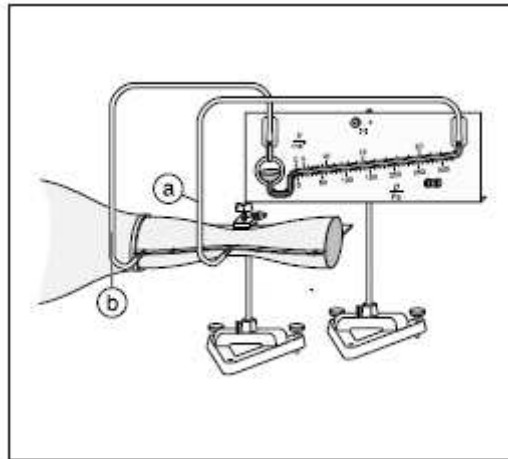


Figure III-8

- Munir le ventilateur d'un ajutage de 100 mm et du tube de Venturi et le placer horizontalement sur le pied (voir figure ci-dessus).
- Soutenir le tube de Venturi à l'aide d'un pied en V, d'une tige et d'une noix. **Ne pas serrer fort** (tube en plastique).
- Fixer le manomètre de précision au support à pied en V par l'équerre en tôle située à l'arrière et le disposer horizontalement en utilisant le niveau à bulle.
- Relier à l'aide d'un tuyau le côté suppression (a) du manomètre au premier orifice (1) et le côté dépression (b) à l'orifice central (4) du tube de Venturi.

Attention : Introduire les tuyaux à fond, mais délicatement dans les orifices du tube de Venturi. Faire de même avec le manomètre (**attention: verre facilement cassable**).

- Placer le ventilateur sur la vitesse minimale (le potentiomètre (c) du ventilateur en butée à gauche) et alors seulement le mettre en route.

Important : Pour une vitesse d'écoulement trop élevée, le liquide manométrique est aspiré par le tube de Venturi.

-Lire la différence de pression p_1-p_4 . - Calculer la vitesse v_4 en position 4 en utilisant la loi de Bernoulli et l'équation de continuité (voir théorie). Comparez v_4 à la valeur de vitesse lue directement sur le manomètre.

- En déduire le débit d'air.

On donne :

- Diamètre du tube en position 1 : 100 mm.
- Diamètre du tube en position 4 : 50 mm.
- Masse volumique de l'air $\rho = 1,26 \text{ kg/m}^3$

III . 2 .2 Évolution de la pression dans le tube de Venturi

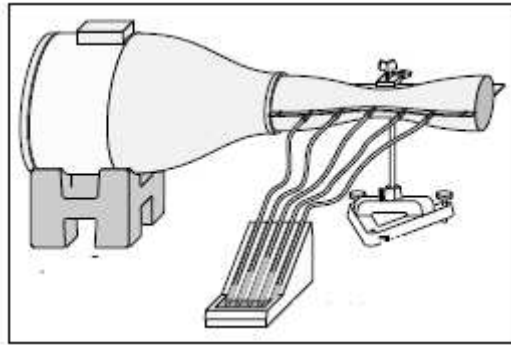


Figure III-9

- Réaliser le montage ci-dessus en reliant les points de mesure du tube de Venturi au multimanoscope à l'aide des tuyaux
- Verser de l'eau colorée dans la cuve de réserve du multimanoscope jusqu'à ce que le liquide l'élève à 1 cm environ dans les tuyaux.
- Le potentiomètre de vitesse étant en position minimale, mettre en marche le ventilateur, puis augmenter très lentement la vitesse.
- Que remarque-t-on ? Expliquer.
- Quelles sont les régions du tube de Venturi de pressions maximales et minimales ? Commenter.

III .2. 3 Étude de la traînée en fonction de la forme du corps

Comme nous l'avons vu dans la partie théorique, la force que subit un corps parallèlement à l'écoulement appelée traînée a pour expression :

$$F_t = \frac{1}{2} C_t \rho v^2 . S$$

S : aire de la section du corps perpendiculaire à la direction de l'écoulement.

ρ : masse volumique de l'air : $1,26 \text{ kg m}^{-3}$

La constante de proportionnalité C_t appelée coefficient de traînée dépend de la forme du corps. Nous allons dans cette expérience mesurer la pression dynamique p_{dyn} et la force F_t exercée sur des corps de formes différentes puis déduire les constantes C_t correspondantes.

III.2.3.1 Montage

- Réaliser le montage de la figure suivante :

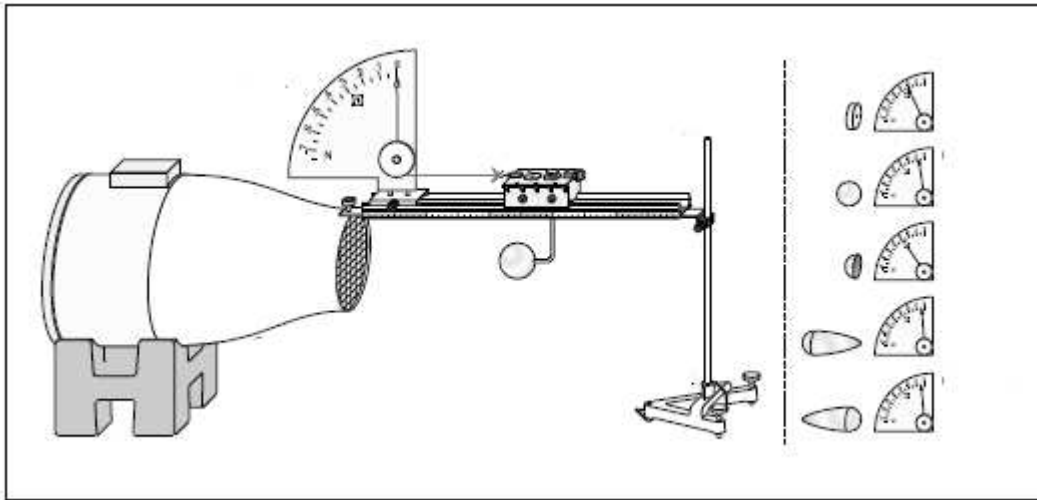


Figure III-10

- Fixer la tige sur le pied en V.
- Placer le ventilateur sur son pied de façon que l'écrou de fixation soit situé à la partie supérieure du pourtour de l'ajutage.
- Fixer la grille de protection du côté aspiration du ventilateur et l'ajutage $d = 150$ mm du côté refoulement.
- Fixer le rail de guidage (1) à l'ajutage à l'aide de sa noix de serrage puis l'aligner parallèlement à l'axe du ventilateur.
- Munir le chariot de mesure d'un crochet d'attache et d'un support en équerre destiné à la fixation des corps aérodynamiques (2). Poser le chariot sur le rail de guidage et régler l'horizontalité de ce dernier de manière que le chariot ne se mette pas de lui-même en mouvement.

-Fixer le cavalier de serrage au début du rail, y placer le dynamomètre de secteur avec son index réglé sur zéro. Accrocher l'oeillet coulissant du cordon du dynamomètre au crochet d'attache du chariot de mesure.

-Fixer le manomètre de précision à la tige à l'aide d'une noix et régler sur horizontalité à l'aide du niveau à bulle.

- Relier la sonde manométrique sur le manomètre à l'aide de 2 tuyaux et mesurer la pression dynamique (voir figure précédente).

III.2.3.2 Manipulation

- Allumer le ventilateur et le faire fonctionner à la vitesse maximale (bouton à fond à droite).

- Pour les mesures, placer d'abord les différents corps sur le support en équerre, puis installer le chariot de manière à ce que les corps soient à 20 cm environ de l'orifice.

- Lire, pour chacun des corps, la valeur de la traînée au dynamomètre.

- Laisser le ventilateur fonctionner, enlever le support en équerre du chariot de mesure et fixer la sonde manométrique au chariot de mesure. Mesurer la pression dynamique.

III.2.3.3 Exploitation des résultats.

- Calculer pour chaque corps le coefficient C_t .

N.B.: Les corps sphérique, en coupe hémisphérique, le corps aérodynamique et le plus petit disque circulaire ont un diamètre de 5,6 cm. Les diamètres des 2 autres disques sont à mesurer.

- Comparer les valeurs du coefficient de traînée des 3 disques en votre possession. Conclure.

- Comparer ensuite les valeurs expérimentales aux valeurs $(C_t)_{litt}$ théoriques données dans la littérature (voir ci-dessous):

disque circulaire : $(C_t)_{litt} = 1,15$

coupe hémisphérique : $(C_t)_{litt} = 1,33$

sphère : $(C_t)_{litt} = 0,45$

corps aérodynamique : $(C_t)_{litt} = 0,06$
(extrémité émoussée à l'avant)

extrémité pointue à l'avant : $(C_t)_{litt} = 0,243$

-Discuter les éventuels écarts entre les valeurs théoriques et expérimentales.

III .2. 4 Relevé des lignes de courant autour des corps de formes différentes

Nous allons dans cette expérience visualiser les lignes de courant autour des corps étudiés dans l'expérience précédente.

- Modifier le montage précédent de manière à obtenir le montage suivant.
- Fixer un peigne à fils à quelques centimètres du corps.
- Placer l'un après l'autre les corps précédents et pour chacun, observer puis dessiner l'allure des lignes de courant pour une vitesse de ventilation maximale.

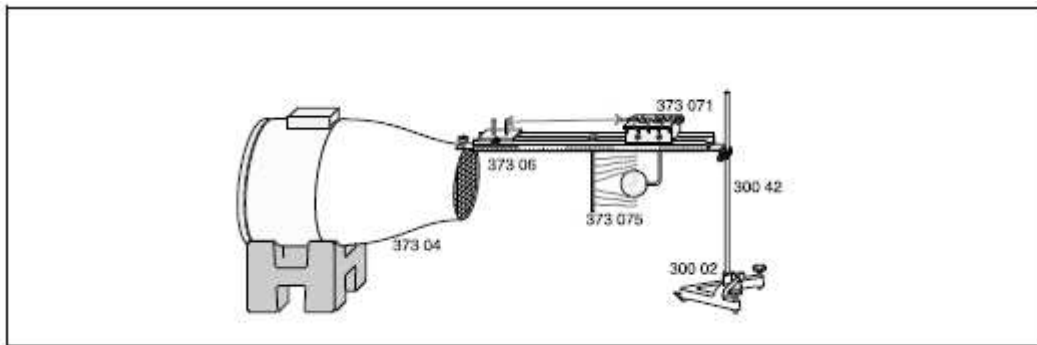


Figure III-11

- Diminuer progressivement la vitesse. Qu'observe-t-on ?
- Des observations effectuées, expliquez les différences entre les valeurs des coefficients de traînée.

III .2. 5 Rampe de Bernoulli

Dans cette expérience, nous allons vérifier que l'écoulement dans le tunnel aérodynamique est isovolume.

III.2.5.1 Montage

En principe, le tunnel aérodynamique est déjà monté (voir figure III-6).

- Vérifier que la rampe de Bernoulli (16) est bien montée. Sinon retirer le fond plat (12) en dévissant les vis (13) et l'installer.
- Installer la baguette (17) pour étancher la fente 7.
- Visser la tige (20) dans la douille fileté (20).
- Fixer le manomètre de précision sur la tige (20) à l'aide d'une noix.
- Fixer le chariot de mesure sur la baguette (17) et installer la sonde manométrique.
- Réaliser les connexions entre la sonde et le manomètre données sur la figure suivante (pression totale de la sonde sur le côté surpression du manomètre et le côté pression statique de la sonde au côté dépression).

- Accorder le côté aspirant du ventilateur au diffuseur (11)

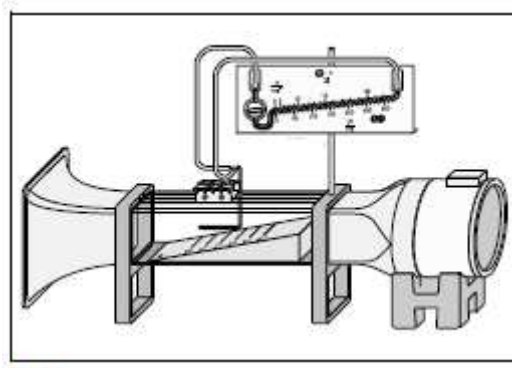
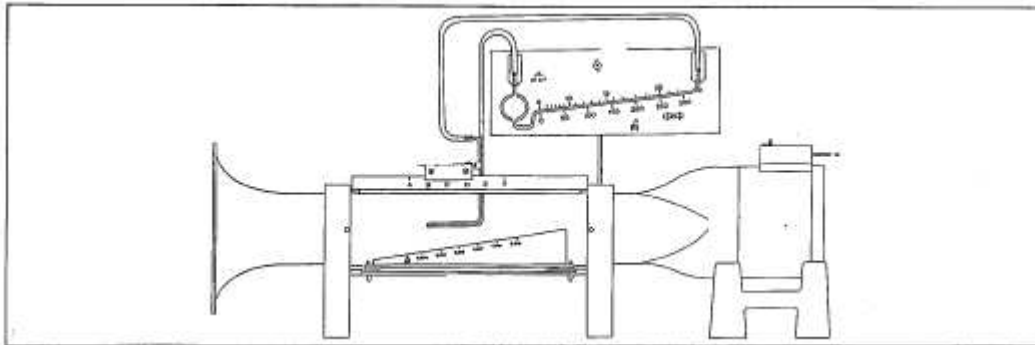


Figure III-12

- S'assurer que tous les éléments sont bien fixés.

III.2.5.2 Manipulation

Au vu des connexions, on mesure la différence entre la pression totale et la pression statique, soit la pression dynamique.

- Mettre le ventilateur en marche et monter la vitesse au maximum.

- Mesurer la pression dynamique pour le chariot placé successivement aux points A, B, C, D, E et F. Remarquer que la position de la sonde correspond à des emplacements marqués sur la rampe de Bernoulli.

- A partir de l'expression de la pression dynamique, calculer la vitesse du fluide correspondant aux différentes sections du tunnel. Comparer ces vitesses à celles lues sur le manomètre.

- Calculer pour chaque aire le débit volumique et dire si l'écoulement est isovolume. On donne $\rho_{\text{air}} = 1,26 \text{ kg/m}^3$.

Remarque : Les valeurs des sections sont marquées sur la rampe de Bernoulli.

III.2. 6 Écoulement autour d'une aile dans le tunnel aérodynamique.

Dans cette partie, nous allons mesurer la portance et la traînée exercée sur une aile d'inclinaison variable. En reportant la portance F_p en fonction la traînée F_t (l'angle α : paramètre de la courbe) on obtient la courbe dite polaire de l'aile portante étudiée. A partir de cette courbe, on devra déterminer les qualités en vol du profil utilisé.

III.2.6.1 MONTAGE

Le montage à réaliser est illustré sur la figure suivante

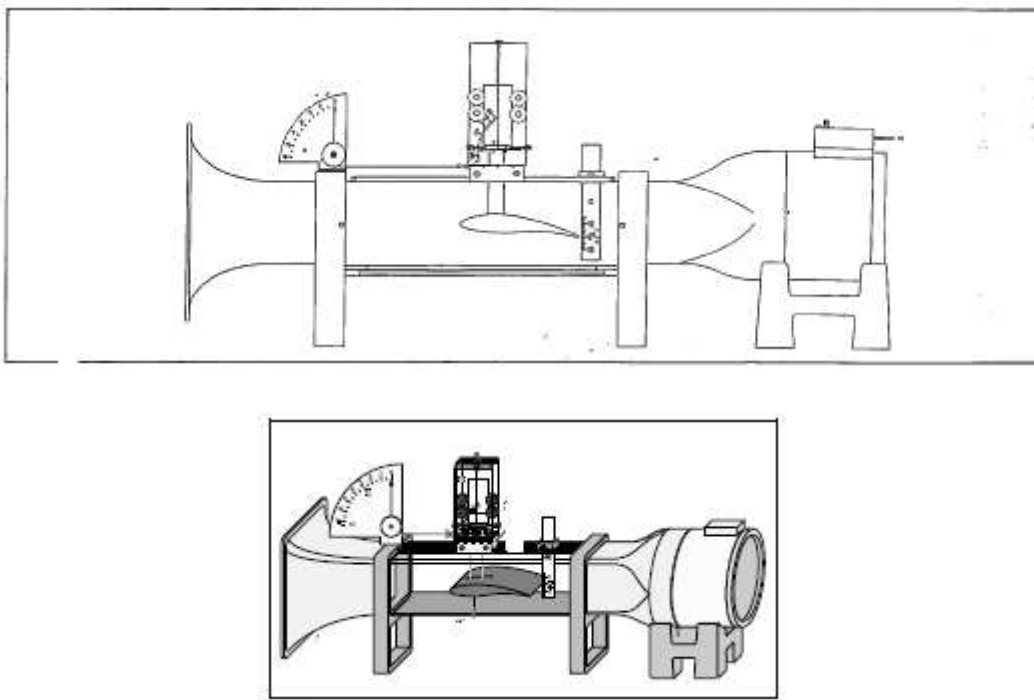


Figure III.13

-Introduire le ventilateur dans le diffuseur (1) de manière à ce que l'air soit aspiré par le tunnel aérodynamique.

-Retirer les filtres tranquillisants.

-Poser la balance aérodynamique(3) (voir figure suivante) sur le chariot de mesure en enfichant ses chevilles dans les trous correspondants du chariot. Poser ensuite le chariot muni de la balance sur les rails du couvercle en Plexiglas de la soufflerie.

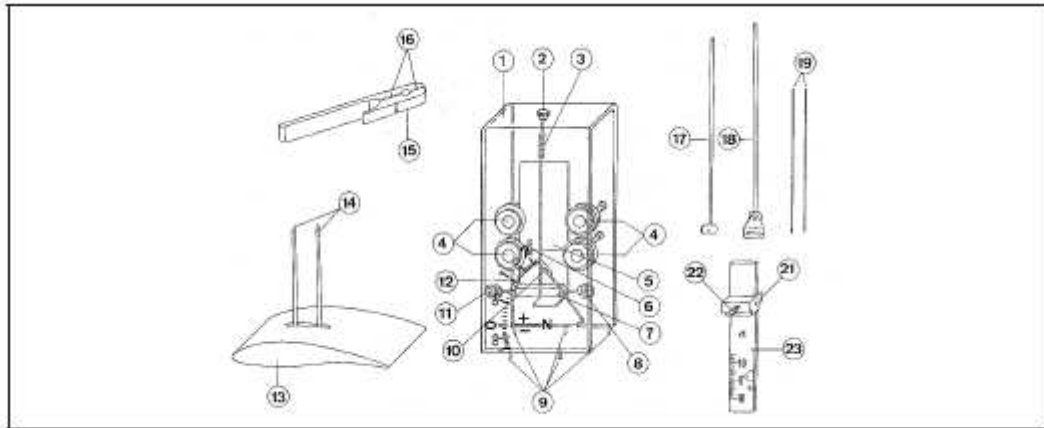


Figure III.14

-Ajuster la veine en position horizontale jusqu'à ce que le chariot ne se mette pas en mouvement de lui même

-Introduire l'aile (13) par la buse d'aspiration dans la soufflerie. **Faire très attention aux tiges de maintien (14).**

-Faire passer les tiges de maintien par la fente du couvercle en plexiglas puis les saisir juste au-dessus de la surface de l'aile avec la pince (15) de telle sorte qu'elles entrent dans les trous de serrage.

-Soulever légèrement le chariot avec la balance aérodynamique et faire passer les tiges qui maintiennent l'aile par les ouvertures du chariot.

-Reposer le chariot sur les rails sans lâcher l'aile et introduire les tiges de maintien dans les trous du bloc d'accrochage (7) (figure précédente) et serrer délicatement les vis moletées (8) et (11) du bloc d'accrochage de telle sorte que l'aile soit suspendue à la balance.

-Retirer la pince. Soulever l'aile à l'aide d'une main, desserrer la vis moletée (11) puis faire correspondre le point de la tige de maintien avec la marque zéro de l'échelle (6) (optiquement) et resserrer solidement la vis (11). Procéder à l'ajustement de l'autre tige de maintien en desserrant la vis (8).

-Accrocher la deuxième échelle de l'angle d'attaque dans le tunnel et l'approcher du bord postérieur de l'aile portante.

-Après desserrage de la vis moletée (22), déplacer verticalement la plaque de l'échelle de l'angle d'attaque jusqu'à ce que le bord postérieur de l'angle d'attaque indique exactement le zéro. Resserrer la vis moletée.

-Fixer la base 2 sous le capot en plexiglas à l'aide des quatre vis.

- Poser le dynamomètre de secteur sur la porte d'entrée (5) et régler son index sur zéro.
- Accrocher l'œillet coulissant du cordon du dynamomètre au crochet d'attache du chariot de mesure et le déplacer sur le cordon de façon que le chariot de mesure soit situé à peu près au centre de la veine d'essai.

III.2.6.2 Manipulation

La manipulation consistera à mesurer la portée F_p et la traînée F_t (tous les deux proportionnelles respectivement aux coefficients de portance et de traînée pour différentes inclinaisons de l'aile portante.

- Avant de commencer les mesures, découper deux bandes de papier de 3 cm de largeur et de 30 cm de longueur chacune.
- Régler l'angle d'attaque à 15 degrés en desserrant la vis moletée antérieure (11) du bloc d'accrochage. Tenir la tige de maintien antérieure de l'aile et faire basculer cette dernière de façon que son bord postérieur puisse toucher le marquage à 15 degrés de l'échelle l'angle d'attaque.
- Serrer ensuite à nouveau la vis moletée et retirer l'échelle de l'angle d'attaque hors du tunnel aérodynamique.
- Mettre le ventilateur en route et le régler de façon que le dynamomètre de secteur indique une traînée de 0,5N. Ne plus toucher au potentiomètre

NB : Lors de la mise au point des différents angles d'attaque, ne desserrer en tous cas que la vis moletée antérieure (11). L'ajustement serait perdu en cas de desserrage de la vis postérieure (8) du bloc d'accrochage.

- Pour des angles d'attaque allant de 15° à -15° par pas de 3 degrés mesurer la portance et la traînée.

NB : Ne régler l'angle d'attaque que lorsque la vitesse de l'air est nulle (on arrêtera le ventilateur en agissant sur l'interrupteur principal). On ne doit plus modifier la position du potentiomètre destiné à régler la vitesse de l'air. Durant les mesures une fois que l'échelle de mesure de l'angle d'attaque est retirée du tunnel, on posera les deux bandes de papier découpées sur la fente du capot de manière à empêcher l'air d'être aspiré par la fente du capot en plexiglas. Après chaque mise en route du ventilateur attendre au moins 30s pour que la vitesse soit stable.

III.2.6.3 Exploitation des résultats.

- Tracer la polaire du profil de l'aile en portant F_p en fonction de F_t .
- Ecrire à côté de chaque point la valeur de l'angle d'attaque.

- Commenter la courbe observée.

-Pour quels angles la polaire atteint-elle un maximum ; conclusion sur ce qui peut se passer si on continue à augmenter l'angle au delà de 15° .

-Déterminer à partir de la courbe précédente l'orientation que devrait avoir l'aile portante pour obtenir un coefficient F_p / F_t aussi grand que possible.

-Conclure.