Tube de Pitot : mesure de la masse volumique de l'air

Ecrit par Julie Corjon

Notice N299 (tube de Pitot + manomètre universel) et Notice N157 (manomètre numérique : pressiomètre Jeulin, celui que nous avons utilisé pour nos mesures)

Références :

- Hydrodynamique physique, Guyon et al (notamment p 104 pour les conditions d'incompressibilité + paragraphe sur l'anémomètre à fil chaud)

- Poly de TP « Fluides et capillarité »

- CR LP 9 2019/2020 « Modèle de l'écoulement parfait »

- E-learning Physique « PC/PSI. Mécanique des fluides : Tube de Pitot » sur Youtube

- https://fr.wikipedia.org/wiki/Tube_de_Pitot

I . Historique

Le tube de Pitot doit son nom au physicien français Henri Pitot qui propose en 1732 un dispositif de mesure des eaux courantes et de la vitesse des bateaux. Cette méthode de mesure a été inventée pour mesurer les pressions totales. Le physicien DARCY le compléta, permettant ainsi la mesure simultanée des deux pressions totale et statique. C'est enfin, PRANDTL qui pensa à utiliser ce tube dans une canalisation pour y relever, en chaque point, ces mêmes pressions et obtenir ainsi les vitesses locales.

En aéronautique, un Pitot mesure la pression totale au sein du circuit de pression statique et totale et permet de déterminer la vitesse relative de l'aéronef par rapport à son environnement. Si ces tubes sont encrassés par du givre, des débris, des insectes, une mesure incorrecte de vitesse est apportée aux pilotes ainsi qu'aux instruments de bord de l'avion. Une mesure erronée de vitesse sur des tubes de Pitot a été mise en cause dans plusieurs catastrophes aériennes : (cf article Wikipédia).

II. Théorie : écoulement parfait, théorème de Bernoulli

- Un écoulement est dit *parfait* si tous les phénomènes diffusifs sont négligés, notamment la viscosité.

- Démontrons l'équation de Bernoulli, qui traduit la conservation de l'énergie, à partir de l'équation d'Euler.

$$\rho\left(\frac{\partial\vec{v}}{\partial t}+\vec{\nabla}\left(\frac{v^2}{2}\right)+(\vec{\nabla}\times\vec{v})\times\vec{v}\right)=-\vec{\nabla}P+\rho\vec{g}$$

On choisit les hypothèses suivantes : écoulement parfait (sauf dans les zones où les effets de la viscosité sont concentrés : couches limites), stationnaire, incompressible et on considère un fluide homogène. Il est tout à fait possible d'établir d'autres formes de l'équation de Bernoulli sous d'autres hypothèses.

Ainsi, à cause de la stationnarité, $\frac{\partial\vec{v}}{\partial t}=0$ et on peut de plus écrire $\vec{g}=-\vec{\nabla}(gz)$ en orientant l'axe z vers le haut.

Ainsi, on peut réécrire l'équation d'Euler sous cette forme :

$$\vec{\nabla}\left(\frac{v^2}{2}+\frac{P}{\rho}+gz\right)=\vec{v}\times(\vec{\nabla}\times\vec{v})$$

Cas 1 : En considérant un **écoulement irrotationnel** c-à-d $(\vec{\nabla}\times\vec{v})=\vec{0}$, on peut écrire :

$$\frac{v^2}{2}+\frac{P}{\rho}+gz=cte$$

Il s'agit de la relation de Bernoulli qui est valable dans tout le fluide sous l'hypothèse d'irrotationnalité.

Cas 2 : Si **on ne considère pas l'écoulement irrotationnel**

En se plaçant le long d'une ligne de courant entre A et B, on peut écrire, par définition du gradient :

$$d\left(\frac{v^2}{2}+\frac{P}{\rho}+gz\right)=\vec{\nabla}\left(\frac{v^2}{2}+\frac{P}{\rho}+gz\right).\overrightarrow{dl}=\vec{v}\times(\vec{\nabla}\times\vec{v}).\overrightarrow{dl}$$

Or, sur une ligne de courant, $\vec{v}$ et $\overrightarrow{dl}$ sont colinéaires, donc :

$$\frac{v_A^2}{2}+\frac{P_A}{\rho}+gz_A=\frac{v_B^2}{2}+\frac{P_B}{\rho}+gz_B$$

Il s'agit de la relation de Bernoulli qui n'est valable que le long d'une ligne de courant.

D'un point de vue énergétique, cette équation est la somme d'une énergie cinétique volumique et d'énergies potentielles volumiques de pression et de pesanteur, c'est donc bien une équation de conservation de l'énergie.

III. Matériel

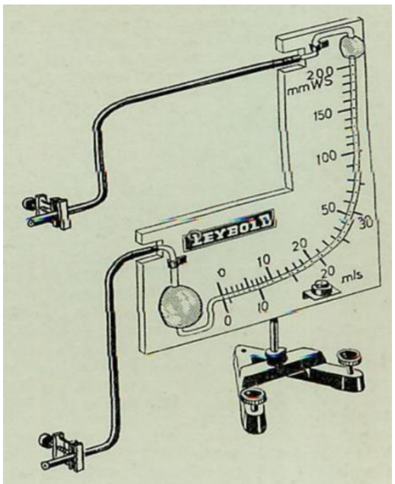
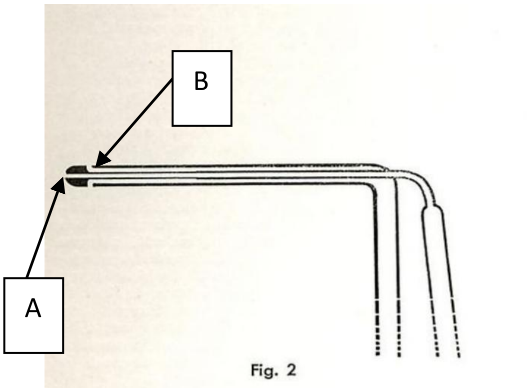


Schéma du manomètre universel extrait de la notice : les deux tubes doivent être reliés aux tuyaux émergeant du tube de Pitot.

Les graduations sont en mm de colonne d'eau (mm WS). 1mm WS =9,81 N/m².

Pressiomètre Jeulin que l'on peut utiliser à la place du manomètre universel (fig.3).



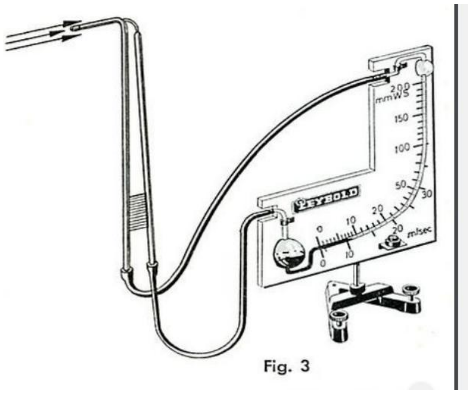


Schéma du tube de Pitot (fig. 2) et du raccordement entre le tube de Pitot et le manomètre universel (fig.3).

Le manomètre universel (ou le pressiomètre Jeulin) affiche la pression dynamique P_d, c'est-à-dire la différence entre la pression totale (pression au point A) et la pression statique (pression au point B).

On aura également besoin d'un anémomètre à fil chaud afin de mesurer la vitesse de l'écoulement. On tracera la courbe P(v), à visée de remonter à la masse volumique de l'air.

Principe de l'anémomètre à fil chaud : (2 utilisations possibles)

- On chauffe un fil métallique en y faisant traverser un courant électrique. La résistance électrique augmente avec la température. Le fil est refroidi par le vent. Plus le vent souffle fort, plus le fil est refroidi et plus la résistance électrique diminue. L'élément résistif étant placé dans un pont de Wheatstone, la variation de résistance due à la convection atmosphérique déséquilibre le pont. Un voltmètre placé au milieu de ce dernier permet de lire la tension de déséquilibre du pont, et par suite, si l'anémomètre est calibré, la vitesse de l'air. Dans ce mode de fonctionnement l'intensité du courant de chauffe du fil est constante.

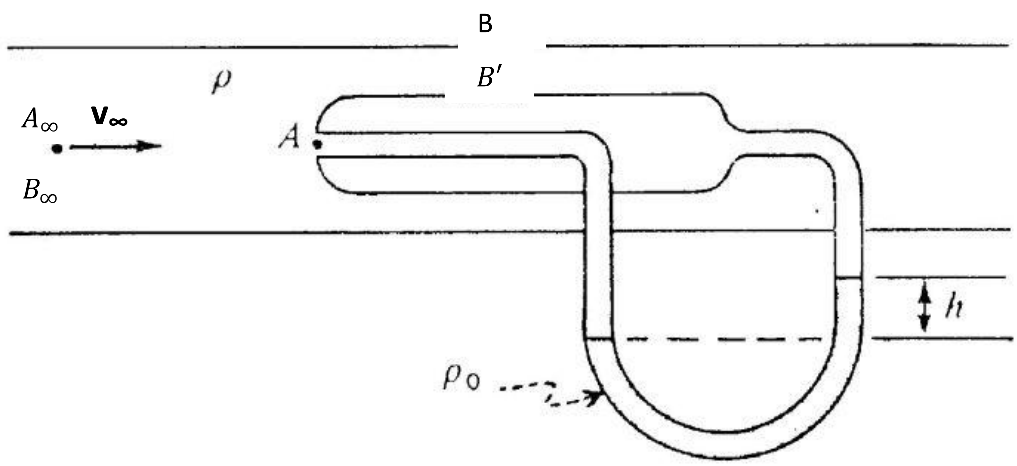
- Une autre utilisation du fil chaud consiste à avoir une température de fil constante. La température du fil est mesurée comme explicité précédemment, et un système d'asservissement permet d'adapter l'intensité envoyée dans le fil pour maintenir cette température constante. On peut alors remonter à la vitesse du fluide en partant de la puissance envoyée dans le fil.

=> plutôt ce mode utilisé pour des raisons de temps de réponse du capteur (cf *Hydrodynamique physique*, Guyon et al).

IV. Objectifs et mesures à effectuer

L'objectif est la détermination de la masse volumique de l'air ρ via le tracé de la droite d'étalonnage $\Delta P(v_\infty^2)$ (car $P_d = \frac{1}{2}\rho v^2$, cf ci-dessous).

Démonstration :



Sur la ligne de courant entre A_∞et A (en supposant que $z_{A_\infty} = z_A$ et en sachant que A est un point d'arrêt, donc $v_A = 0$), on a d'après la relation de Bernoulli :

$$P_A = P_0 + \frac{\rho v_\infty^2}{2}$$

Entre B_∞ et B' (B_∞ et A_∞ sont infiniment proches), en les supposant à une même altitude, et en considérant que $v_{B_\infty} = v_{B'}$ car le tube est fin (donc perturbe peu l'écoulement) et l'écoulement est rapide, on obtient $P_{B'} = P_0$.

Enfin, la condition d'incompressibilité implique que la pression dans une colonne d'air ne varie pas avec l'altitude, donc $P_{B'} = P_B$.

Finalement $P_B = P_0$.

On en déduit donc la vitesse de l'écoulement ou la vitesse de l'objet dans l'écoulement (utilisé par exemple en aéronautique)

$$v_\infty = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

De même, $\Delta P = P\_d = \frac{1}{2}\rho v_\infty{}^2$.

Protocole :

* Raccorder le tube de Pitot et le pressiomètre.

* Placer le tube devant la soufflerie (parallèlement à l'écoulement).

* Lire la pression affichée sur le pressiomètre, et la vitesse avec l'anémomètre à fil chaud (à l'aide de l'étalonnage sur l'appareil).

* On peut tracer la droite $\Delta P(v_\infty{}^2)$, de coefficient directeur $\rho/2$.

V. Résultats

*ρ_{air} = 1,292 kg. m^{-3} pour l'air sec à 0°C et 1 atm, 1,204 kg.m^{-3} à 20 °C.

=> d'après Julien, cette manip ne marche jamais, on obtient souvent un facteur 2,3,4… en trop. Pour éviter ça, il faut utiliser l'anémomètre 3878.

*Pour v_∞ =20 m/s, $Re = \frac{\rho v_\infty L}{\eta}$ ~ 200, en prenant ρ=1,2 kg.m^{-3}, L=1cm, η=1.10^{-3} Pl.

VI. Biais et incertitudes

Biais :

* Compressibilité : Un écoulement gazeux peut être considéré comme incompressible tant que sa vitesse est inférieure à celle du son dans le fluide. Au-delà, on doit appliquer un facteur correctif au coefficient de pression au point d'arrêt.

Ici, l'écoulement provoqué par la soufflerie ne peut dépasser 40 m/s, ce qui est très inférieur à la vitesse du son dans l'air (~340 m/s), on peut le considérer incompressible.

* Pour des vitesses supérieures à Mach = 0.85, l'apparition de petites ondes de choc locales sur le nez de la sonde peut légèrement fausser les mesures de pression. Naturellement, ce n'est pas non plus le cas ici.

* Les résultats sont tout à fait convenables tant que l'écoulement est rapide et parallèle ($Re >> 1$), même si l'écoulement n'est pas parfait.

Incertitudes :

* incertitude sur v_∞ liée à l'affichage de l'anémomètre qui fluctue.

=> en pratique cette incertitude est bien plus élevée que celle sur ΔP, il est donc plus intéressant de tracer v_∞^2 en fonction de ΔP sur Qtiplot.

*incertitude sur ΔP : 2% ± 4hPa

=> on en déduit l'incertitude sur le coefficient directeur de la droite $\Delta P(v_\infty^2)$, donc sur ρ.

* Intrusion de l'anémomètre ou du tube de Pitot qui perturbe l'écoulement.