

Régimes d'écoulement des fluides incompressibles

par Alain BUJARD
BTS CIRA - Lycée E. Branly - 69000 Lyon

La dynamique des fluides peut être un domaine privilégié pour l'activité du physicien. La complexité des phénomènes nécessite de recourir à un arsenal mathématique élaboré, et ceci peut être en soi une protection du physicien contre l'outrance de certains développements, en le sollicitant pour une recherche expérimentale d'un modèle.

L'inconvénient est que l'expérimentation n'est pas forcément simple et les dispositifs existants encombrants et coûteux. On peut proposer ici des solutions simples peu coûteuses et performantes, à la condition de limiter ses ambitions.

On se propose d'étudier les pertes de charges dans une conduite cylindrique horizontale et de mettre en évidence, avant de les caractériser quantitativement les divers régimes d'écoulement.

QUELQUES RAPPELS : LE THÉORÈME DE BERNOULLI

Soit un fluide incompressible s'écoulant dans une conduite de section variable entre deux points A et B de cotes z_A et z_B , où les vitesses d'écoulement du fluide sont v_A et v_B , les masses volumiques du fluide ρ_A et ρ_B les pressions p_A et p_B .

Le théorème de Bernoulli exprime la conservation de l'énergie entre les points A et B. On peut l'écrire sous la forme :

$$\left[\frac{p_A}{\rho_A g} + \frac{1}{2} \frac{v_A^2}{g} + z_A \right] - \left[\frac{p_B}{\rho_B g} + \frac{1}{2} \frac{v_B^2}{g} + z_B \right] = 0$$

En fait l'écoulement se fait avec dissipation d'énergie et la différence des deux termes n'est pas nulle. On dit qu'il y a perte de charge et on note :

$$\left[\frac{P_A}{\rho_A g} + \frac{1}{2} \frac{v_A^2}{g} + z_A \right] - \left[\frac{P_B}{\rho_B g} + \frac{1}{2} \frac{v_B^2}{g} + z_B \right] = \Delta h$$

Δh mesure donc une hauteur de colonne de liquide. On peut aussi l'exprimer sous la forme :

$$\lambda \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{l}{d}$$

où l est la distance entre les points A et B ($l = AB$) et d le diamètre du tuyau.

Le coefficient λ fait l'objet de l'étude.

PRINCIPE DE L'ÉTUDE

Un liquide de masse volumique constante ($\rho_A = \rho_B = \rho$) connue circule dans un tube cylindrique horizontal, de section constante (d où $v_A = v_B = v$) connue. Deux manomètres reliés aux prises de pression A et B permettent de mesurer la perte de charge. Pour mesurer le débit on mesure le temps de remplissage d'un récipient de volume connu : on en déduit la vitesse d'écoulement.

Dans ces conditions l'expression de Bernoulli se simplifie :

$$\frac{P_A - P_B}{\rho \cdot g} = \lambda \frac{v^2}{2g} \frac{l}{d}$$

ou
$$\Delta h = \lambda \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{l}{d}$$

Afin de caractériser plus commodément la perte de charge on la ramène à l'unité de longueur de la conduite : $i = \frac{\Delta h}{AB}$.

$$i = \lambda \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{1}{d}$$

ou
$$i = K \cdot v^n \quad \text{ou} \quad \log i = \log K + n \log v$$

On relève alors $\log i$ en fonction de $\log v$.

La courbe obtenue a l'allure ci-dessous : elle se présente sous forme de trois segments.

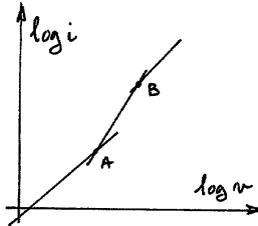


Figure 1

Les points d'intersections de ces segments correspondent à une modification du régime d'écoulement. Associés aux pentes des segments ils permettent de déterminer la loi $i = K \cdot v^n$.

Chaque intersection correspond à une valeur particulière de la vitesse d'écoulement, et on la caractérise par un nombre sans dimension : le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

μ étant la viscosité dynamique du fluide.

On admet en général que :

- pour $Re < 2000$ le régime est laminaire,
- pour $2000 < Re < 4000$ le régime est transitoire,
- et pour $Re > 4000$ le régime est turbulent.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le problème essentiel réside dans la qualité des prises de pression : elles ne doivent pas perturber l'écoulement, être étanches.

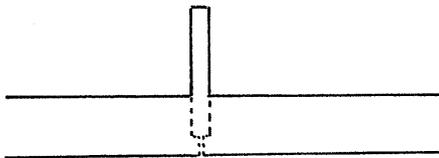


Figure 2 : Prise de pression sur la conduite.

La conduite est un tube de plexiglas d'environ 1 m de long, de diamètre intérieur 3,5 mm. Les prises de pression sont situées à une vingtaine de centimètres des extrémités.

Deux tubes d'acier de 1 mm de diamètre, de quelques dixièmes de millimètres de diamètre intérieur, d'environ 1 cm de long, provenant d'une ancienne colonne de chromatographie en phase gazeuse, sont entrés en force dans un trou dont la profondeur fait environ les 3/4 de l'épaisseur du tube cylindrique formant la conduite.

Ce trou de 1 mm est prolongé pour le dernier quart par un trou de 0,1 mm de diamètre.

Le tout est fixé à l'aide de mastic colle.

Le manomètre à eau

Un bloc de PVC parallélépipédique est percé de deux trous parallèles pouvant recevoir deux cannes de verre. Ces trous sont prolongés par des trous de plus faibles diamètres dans lesquels aboutissent deux trous qui recevront les tubes d'acier de 1 mm de diamètre fixés avec du mastic colle.

Les deux trous initiaux sont légèrement chanfreinés pour recevoir des joints toriques. Une plaque de PVC sera fixée par vis sur le bloc de PVC afin de bloquer les joints toriques et assurer l'étanchéité.

Les liaisons prises de pression manomètres sont assurées par des tubes souples transparents afin de repérer les éventuelles bulles d'air à évacuer.

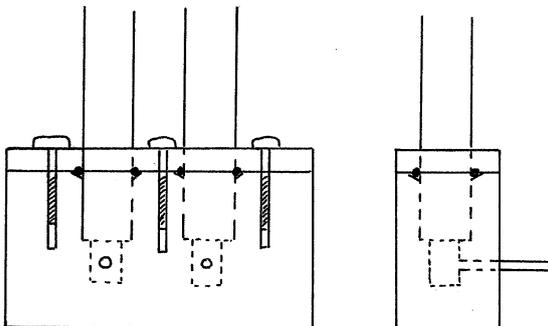


Figure 3 : Pied du manomètre.

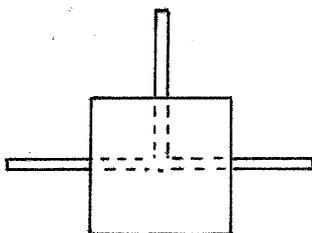


Figure 4 : Dérivation manomètres.

Le manomètre à mercure

Lorsque la perte de charge devient importante on passe du manomètre à eau au manomètre à mercure monté en différentiel.

C'est un tube en U contenant du mercure et de l'eau. Deux robinets R_1 et R_2 dans la partie supérieure permettent de purger l'appareil de bulles d'air. Deux robinets R_3 et R_4 permettent de mettre hors service le manomètre à eau.

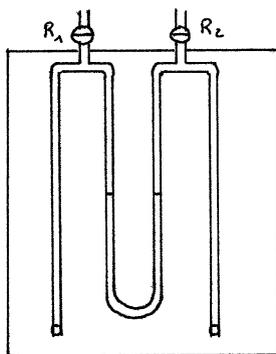


Figure 5 : Manomètre différentiel à mercure.

Alimentation en eau

Le plus simple est d'alimenter à partir d'un réservoir à niveau constant placé à une hauteur suffisante pour assurer les débits suffisants. Sinon une pompe de circulation permet d'augmenter le débit jusqu'aux valeurs souhaitées. Comme les pompes sont rarement à débit variable sur de grandes plages on obtient un réglage en organisant une fuite réglable dans le circuit, à l'aide de pinces de Mohr montées sur les tuyaux.

FOURNITURES

Vous trouverez chez votre fournisseur de produits plastiques le tube, ainsi que le PVC. Des chutes peuvent se trouver.

On trouve chez les fournisseurs de matériel pour chromatographie du tube pour colonne. Contactez le service maintenance on peut y récupérer des colonnes usagées.

Les robinets se trouvent dans les grandes surfaces au rayon arrosage. Voyez les modèles pour goutte-à-goutte (Gardena).

RÉSULTATS

Voici la courbe obtenue. On peut relever :

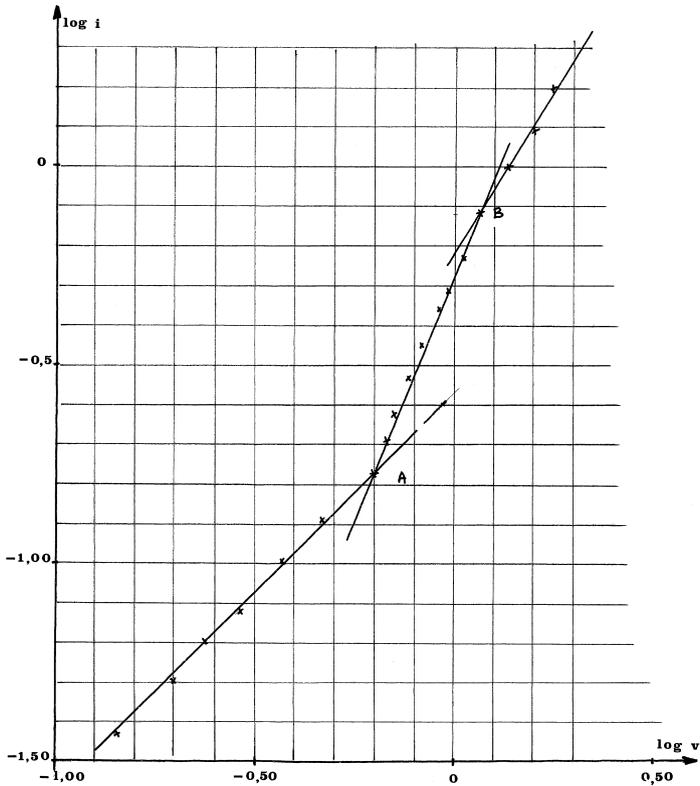


Figure 6

a - Passage du régime laminaire au transitoire

$$A (-0,20 ; -0,78) : \log v = -0,2 \quad \text{soit} : v = 0,63 \text{ ms}^{-1}$$

A la température de l'eau de 15°C on a $\rho = 10^3 \text{ kgm}^{-3}$;
 $\mu = 11 \times 10^{-4} \text{ Ns.m}^{-2}$. Avec d : diamètre du tube $3,5 \times 10^{-3} \text{ m}$:

$$\text{Re} = \frac{\rho d v}{\mu} \quad \text{ou} \quad \text{Re} = \frac{10^3 \times 0,63 \times 3,5 \times 10^{-3}}{11 \times 10^{-4}}$$

$$\text{Re} = 2004$$

b - Passage du régime transitoire au turbulent

$$B (+0,06 ; -0,12) \quad \text{ou} \quad \log v = +0,06 \quad v = 1,15 \text{ ms}^{-1}$$

avec les valeurs précédentes :

$$\text{Re} = \frac{10^3 \times 1,15 \times 3,5 \times 10^{-3}}{11 \times 10^{-4}} \quad \text{Re} = 3660$$

En régime laminaire on montre que $\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$ d'où $i = \frac{64 \mu}{\rho v d} \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{1}{d}$

$$\text{et } \log i = \log \frac{32 \mu}{\rho g d^2} + \log v.$$

Avec les valeurs numériques précédentes $\log i = -0,533 + \log v$.
 D'après le graphe on trouve $\log i = -0,560 + \log v$.

En régime transitoire on aurait de même $i = K' \cdot v^2$.

En régime turbulent : $i = K'' v^{1,65}$.

Remarques : Le dispositif réalisé doit beaucoup aux catalogues des maisons spécialisées. Seul le prix diffère, les principes mis en œuvre étant les mêmes.

Sur le même principe, en mettant à contribution les rayons plomberie des magasins spécialisés type Castorama, on peut réaliser un circuit hydraulique avec des accidents variés : coudes à 90°, à 45°, à large rayon de courbure, étranglement, élargissement, rétrécissement...

Chacun de ces accidents produit une perte de charge que l'on peut étudier suivant la méthode précédente. Il faut cependant dans ce cas réaliser une batterie de manomètres à eau. J'utilise jusqu'à vingt-cinq manomètres.

Les tuyaux plastiques collables du type GIRPI conviennent bien malgré leur prix.