Chapitre 4 : Les régimes d'écoulement dans les conduites, résistances hydrauliques

Introduction :

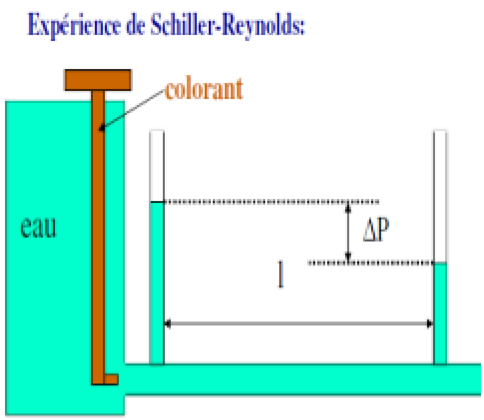
L'écoulement d'un fluide réel est plus complexe que celui d'un fluide idéal. En effet, il existe des forces de frottement, dues à la viscosité du fluide, qui s'exercent entre les particules de fluide et les parois, ainsi qu'entre les particules elles-mêmes. Pour résoudre un problème d'écoulement d'un fluide réel, on fait appel à des résultats expérimentaux, en particulier ceux de l'ingénieur et physicien britannique Osborne Reynolds.

I. Fluide réel

Un fluide est dit réel si, pendant son mouvement, les forces de contact ne sont pas perpendiculaires aux éléments de surface sur lesquelles elles s'exercent (elles possèdent donc des composantes tangentielles qui s'opposent au glissement des couches fluides les unes sur les autres). Cette résistance est caractérisée par la viscosité

II. Régimes d'écoulement - nombre de Reynolds

Un réservoir alimente une conduite horizontale en verre munie de deux prises de pression. Une vanne permet de régler la vitesse d'écoulement. Un tube effilé muni d'un réservoir de colorant permet de visualiser l'écoulement.



Aux faibles vitesses: le filet coloré conserve son individualité jusqu'à l'extrémité du tube, il ne se mélange pas aux autres filets de fluide: l'écoulement est dit laminaire. La perte de charge est faible.

On augmente la vitesse: le filet coloré se met à osciller un certain temps et se mélange au reste du fluide. En même temps, on observe une brusque augmentation de la perte de charge. Le régime est dit turbulent lisse.

On augmente encore la vitesse du fluide: le filet coloré se mélange presque aussitôt son introduction dans le tube. Le régime est dit turbulent rugueux.

En utilisant divers fluides à viscosités différentes, en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds (1883) a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent est un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds donné par l'expression suivante:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

ρ : masse volumique

V: vitesse de l'écoulement

D: diamètre

μ: viscosité dynamique

<u>Résultats empiriques à titre indicatif</u>

Si $Re < 2000$ l'écoulement est laminaire

Si $Re > 2000$ l'écoulement est turbulent

- → Lisse si $2000 < Re < 100000$
- → Rugueux si $Re > 100000$

III Equation de Bernoulli pour les fluides réels :

Nous avons vu que pour le cas d'un fluide réel et en régime permanent, d'autres forces interviennent, notamment les forces dues au frottement, qui font apparaître une dissipation de l'énergie mécanique en énergie thermique. On appelle ce phénomène la perte de charge due aux frottements dans un fluide.

L'intégration de cette équation différentielle s'effectue simplement comme suit :

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{\rho g} + \int_{Z_1}^{Z_2} dZ + \int_{V_1}^{V_2} d\frac{V^2}{2g} + \int_{0}^{\Delta H_{12}} dh_T = 0$$

On trouve finalement :

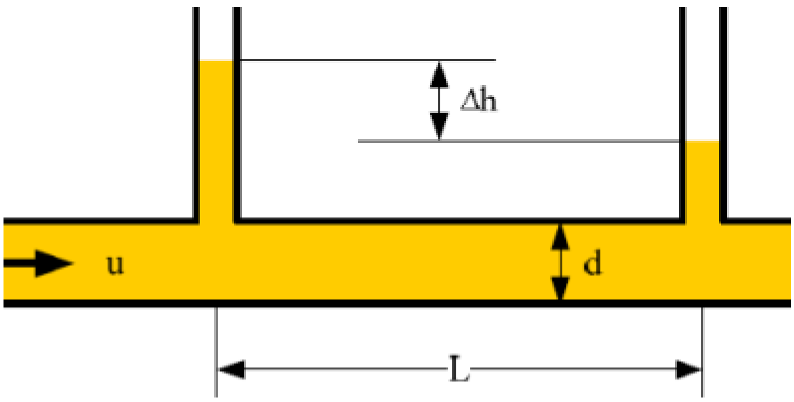
$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \Delta H_{12}$$

IV Pertes de charge

Selon l'état de surface intérieur d'une canalisation et la géométrie d'un circuit hydraulique (changement de section, changement de direction, …) nous pourrons constater des frottements plus ou moins importants exercés par le fluide sur les parois. Cela va se traduire par des pertes de charge plus ou moins importantes.

A) Pertes de charge linéaire :

Soit une conduite cylindrique horizontale de diamètre invariable d, dans laquelle s'écoule un fluide à une vitesse U. Supposons que l'on dispose sur cette conduite en deux endroits éloignés d'une longueur L, deux tubes manométriques permettant de mesurer la pression statique.



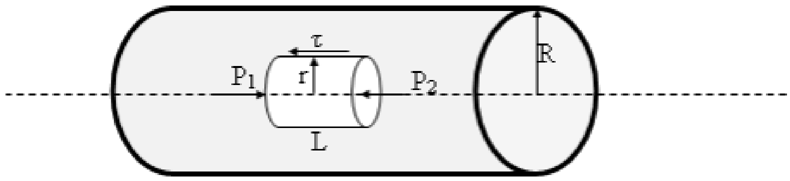
On constate que la hauteur du fluide est plus grande dans le tube amont que dans le tube aval. La différence des deux niveaux donne la hauteur de fluide correspondant à la perte de charge Δh. Les pertes de charge linéaires sont proportionnelles à la longueur L de la conduite, inversement proportionnelles à son diamètre d, proportionnelle au carré de la vitesse débitante V du fluide. Elle est calculée par la formule de Darcy – Weisbach :

$$\Delta H_L = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Pertes de charge en régime laminaire :

Soit une conduite circulaire, dans laquelle l'écoulement est laminaire. Considérant une particule de fluide cylindrique de rayon r et de longueur L. les forces agissant sur cette particule sont :

1. Les forces de pression ;
2. Les forces de frottement.

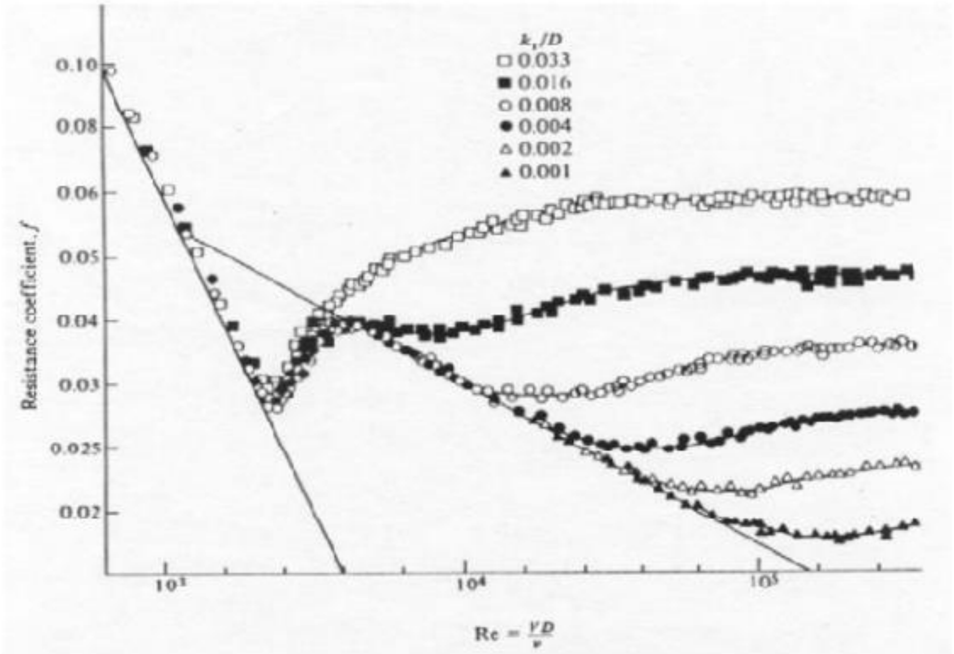


λ étant le coefficient de la perte de charge :

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Pertes de charge en régime turbulent:

Nikuradse (1931-33) a effectué toute une série de mesures des pertes de charge dans des conduites dont la paroi intérieure était enduite d'une couche régulière de grains de sable. Il a observé qu'à partir d'une certaine valeur du nombre de Reynolds, le coefficient λ restait constant quel que soit Re, sa valeur ne dépend que la rugosité relative de la canalisation (domaine horizontale). Ses résultats sont résumés par la courbe suivante :



2. $Re<10^5$:

Le coefficient de perte de charge est donné par la relation de Blasius :

$$\lambda = \frac{0{,}316}{Re^{0{,}25}}$$

formule dans laquelle la rugosité n'intervient pas, on parle d'écoulement **turbulent lisse**

3. $Re> 10^5$ jusqu'à l'horizontale :

Le coefficient de perte de charge est donné par l'équation de Von Karman:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\frac{2{,}51}{Re\sqrt{\lambda}}$$

4. Le domaine de l'horizontale:

Le coefficient de perte de charge est indépendant du nombre de Reynolds. Son expression est donnée par la formule de Nikuradse :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\frac{\varepsilon}{3{,}71D}$$

Dans ce domaine, on dit que l'écoulement est **turbulent rugueux.**

Cyril Colebrook (1939) a intégré en une seule relation les résultats pour les parois lisses et totalement rugueuses. On peut ainsi calculer le coefficient de frottement λ sans avoir à distinguer le type de paroi :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\left[\frac{\varepsilon}{3{,}71D} + \frac{2{,}51}{Re\sqrt{\lambda}}\right]$$