

III.1 Introduction

La deuxième partie de ce travail étant l'étude expérimentale de la mesure de perte de charge, nous avons utilisé une nouvelle installation expérimentale récemment réceptionnée.

Remarque : La majorité des expériences faites correspondent au régime turbulent, et ce à cause de la pompe. En effet, pour petites ouvertures de la vanne principale V2 (voir paragraphe III.2) ce qui provoquait des complications au niveau de la pompe (échauffement, bruit, vibration,...) et au niveau de l'installation (fuite).

III.2 Description de l'installation

L'installation expérimentale utilisée (figure III.1) dans ce travail est du type « ARMFIELD (C6-00 FLUID FRICTION APPARATUS) » et sert à mesurer la perte de charge linéaire et singulière. Elle est composée d'une unité centrale (banc hydraulique) et d'un circuit hydraulique.

L'unité centrale comporte un réservoir central (23), un réservoir de mesure de débit (22) comportant une jauge de niveau (25), une pompe immergée (24) avec la mise en marche (26) muni d'une coupe courant (27) et un robinet de vidange (V1).

Le circuit hydraulique qui est alimenté par la pompe immergée comporte parties, la première partie qui sert à mesurer la perte de charge linéaire est alimentée par la vanne de régulation de débit (V2) et comporte :

- Quatre conduites dont trois sont lisses (1), (2) et (4) de diamètre respectifs 6mm, 10 mm et 17.5 mm. La quatrième conduite (3) de diamètre 17.5 mm est rugueuse artificiellement.
- Plusieurs singularités disposées de la façon suivante : un rétrécissement brusque (5) et un élargissement brusque (6) et une vanne d'arrêt (V4) sont portés par la conduite (2). La vanne d'arrêt (V4) est aussi montée sur les conduites (1) et (3). Une vanne (robinet à boisseau) (V7) et un coude à 45° (8) portés par la conduite (4). Une jonction en « Y » à 45° (9) jouant le rôle d'un nœud pour les quatre conduites et représente la sortie de la première partie du circuit hydraulique.

La purge du circuit de mesure de la perte de charge linéaire est faite à l'aide des deux vannes de purge d'air (V3).

La deuxième partie du circuit hydraulique, servant à mesurer la perte de charge singulière, est liée à la première par un coude à 90° (14) et comporte :

- Une vanne d'arrêt (10)
- une vanne de régulation (11)
- une jonction en « Y » (12)
- un coude à 90° (13)

- une jonction en « T » à 90° (15)
- un tube de Pitot (16)
- un tube de Venturi (17)
- un diaphragme (18)
- d'un échantillon des conduites (19)
- une vanne de régulation des petits débits (V5)
- une vanne de régulation des grands débits (V6)
- d'un manomètre en U à mercure (20) pouvant mesurer une différence de pression de 1 mètre de mercure.
- d'un manomètre pressurisé à eau (21) pouvant mesurer une différence de pression de 1 mètre de d'eau.

La purge des tubes liant les deux parties du circuit hydraulique aux manomètres à eau et à mercure se fait à l'aide des vannes de purge (28) et (29).



Figure III.1: Photo de l'installation expérimentale: ARMFIELD (C6-00 FLUID FRICTION APPARATUS).

La figure III.2 est une représentation schématique de l'installation expérimentale.

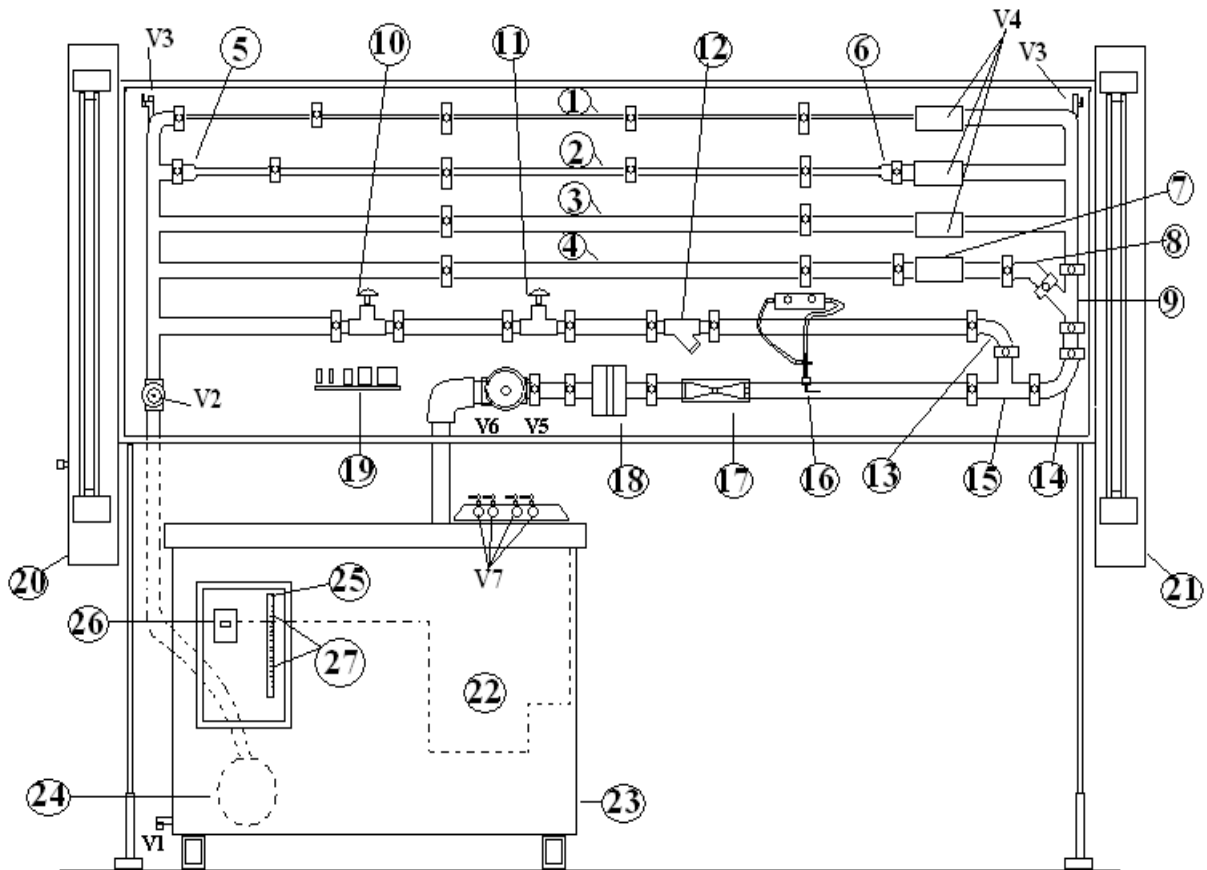


Figure III.2: schéma descriptive de l'installation expérimentale : ARMFIELD (C6-00 FLUID FRICTION APPARATUS)

Pour les expériences menées dans cette partie, nous avons utilisé trois conduites dont deux de même diamètre (une rugueuse et l'autre lisse). Pour la conduite rugueuse, la valeur de la rugosité nous l'avons déterminée expérimentalement.

Pour la perte de charge singulière, plusieurs singularités ont été utilisée (voir Figure III.1).

III.3 Mesure de perte de charge

L'ensemble des mesures expérimentales sont données en annexe (1).

III.3.1 Mesure de perte de charge linéaire

Dans ce travail, nous avons étudié la perte de charge linéaire

- deux conduites lisse de diamètre $D = 17,5mm$ et $D = 10mm$;
- Conduite rugueuse de diamètre $D = 17,5mm$;

III.3.1.1 Expression de la perte de charge linéaire

L'expression générale est

$$\Delta H_L = \lambda \frac{U^2}{2g} \frac{L}{D} \quad (\text{III.1})$$

III.3.1.2 La perte de charge linéaire dans les conduites lisses

Pour toutes les expériences, nous avons trouvé que la valeur du nombre de Reynolds est comprise entre 2100 et 10^5 . L'expression donc du coefficient de perte de charge linéaire sera donnée par :

$$\lambda = 0,316 \text{Re}^{-\frac{1}{4}} \quad (\text{III.2})$$

Le nombre de Reynolds s'exprime comme :

$$\text{Re} = \frac{UD}{\nu} \quad (\text{III.3})$$

L'expression de la vitesse moyenne en fonction du débit :

$$U = \frac{Q_v}{S} = \frac{Q_v}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{4Q_v}{\pi D^2} \quad (\text{III.4})$$

Des équations (III.1), (III.2), (III.3) et (III.4) on tire:

$$\Delta H_L = 0,316 \frac{\nu^{\frac{1}{4}} U^{\frac{7}{4}}}{D^{\frac{5}{4}} 2g} L = C_u U^{\frac{7}{4}} \quad (\text{III.5})$$

Ou en tenant compte du débit :

$$\Delta H_L = 0,316 \frac{L}{2g} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{\frac{7}{4}} \nu^{\frac{1}{4}} \frac{Q_v^{\frac{7}{4}}}{D^{\frac{19}{4}}} = C_Q Q_v^{\frac{7}{4}} \quad (\text{III.6})$$

La valeur de la constante C_u et C_Q dépendent donc du diamètre et de la longueur de la conduite (tronçon d'essai de longueur $L = 1m$) de la conduite et de la viscosité du fluide. Cette dernière dépend de la température de l'eau.

Les figures (III.3) et (III.4) représentent la variation de la perte de charge linéaire en fonction du débit volumique dans des conduites lisses à une température de l'eau $T = 18^{\circ}\text{C}$ ($\nu_{18^{\circ}\text{C}} = 1,0610^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).

La figure III.3 montre l'évolution de la perte de charge en fonction du débit dans le cas où le liquide manométrique est :

- L'eau (Figure III.3a) , utilisation du manomètre pressurisé (20)
- Le mercure (Figure III.3b), utilisation du tube en U à mercure (21)

On remarque une bonne concordance entre les valeurs expérimentales et théorique de la perte de charge linéaire (équation III.6).

Notons qu'il s'agit de la même perte de charge du point de vue valeur, il suffit simplement de faire la conversion du (mmH₂O) vers le (mmHg) ou l'inverse. Le rapport entre les valeurs de la perte de charge des deux figure est 12,6 qui correspond à la valeur du terme $\left(\frac{\rho_{hg}}{\rho_e} - 1\right)$ lorsqu'on utilise le tube en U à mercure pour la mesure de la différence de pression.

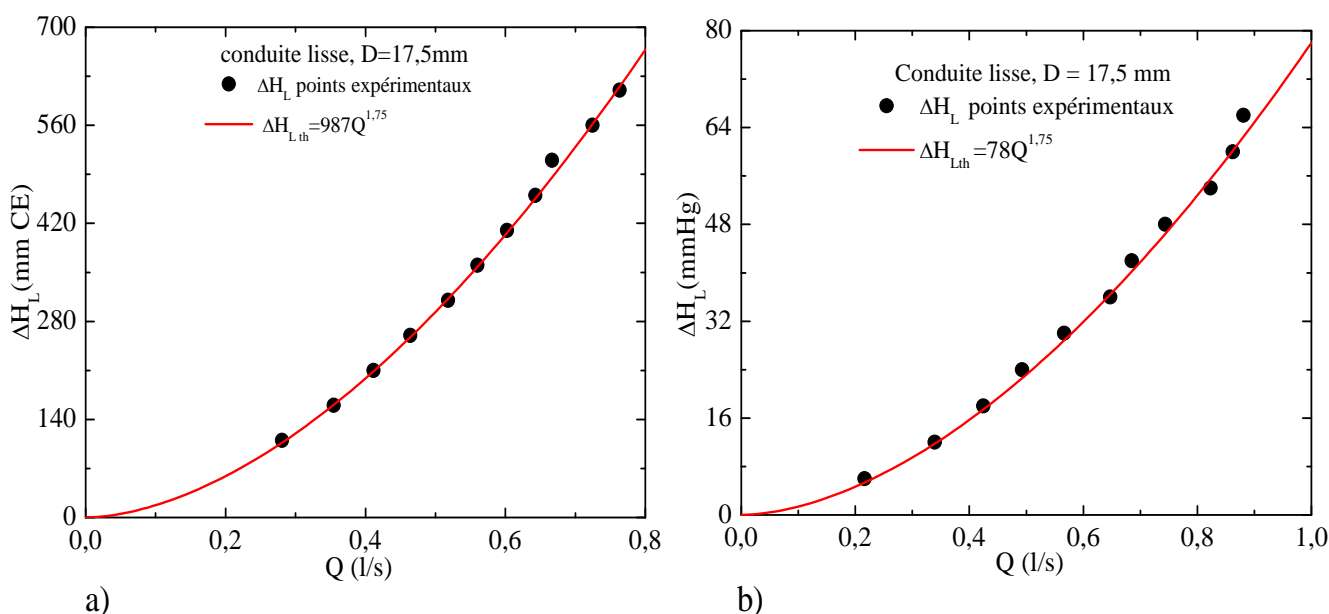


Figure III.3 Variation de la perte de charge linéaire en fonction du débit : a) liquide manométrique l'eau ; b) liquide manométrique le mercure.

Pour la conduite lisse de diamètre 10 mm (figure III.4), on remarque que les résultats expérimentaux sont décalés de la courbe théorique, ceci nous a amené à refaire l'expérience plusieurs fois. Le résultat trouvé fut le même.

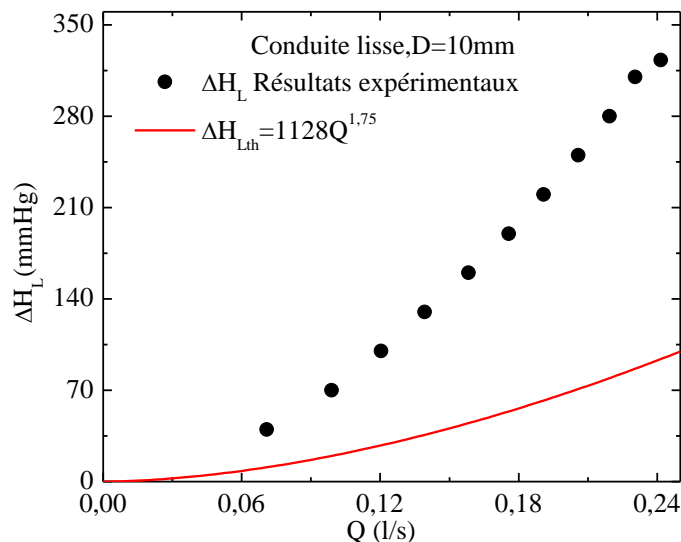


Figure III.4 : variation de la perte de charge linéaire en fonction du débit volumique dans une conduite lisse de $D = 10\text{mm}$; $T_{eau} = 16^\circ\text{C}$, la viscosité cinématique de l'eau $\nu_{eau} = 1,209 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

III.3.1.3 Coefficient de la perte de charge linéaire pour les conduites lisses

La figure III.5 montre la variation du coefficient de la perte de charge linéaire en fonction du nombre de Reynolds en log-log. On remarque que pour les deux diamètres, l'augmentation du nombre de Reynolds entraîne la diminution de λ . Cependant, pour la conduite de diamètre $D=17,5$ mm, les points expérimentaux sont en bon accord avec le modèle de Blasius (Eq.III.6). Par contre pour la conduite de diamètre $D=10$ mm, les points expérimentaux sont en bon accord non pas avec le modèle de Blasius mais avec un multiple de ce dernier. Nous avons donc le même problème que celui de la perte de charge.

Notons que les points expérimentaux et les droites des modèles qui les représentent sont parallèles.

Remarque : Concernant les résultats obtenus à partir de la conduite de diamètre $D=10\text{mm}$, certains doutes persistent. En effet, lors de nos expériences sur cette conduite, certaines irrégularités se sont présentées telle que la chute de pression qui dépassait celle de la conduite de diamètre $17,5$ mm alors que le débit était le même.

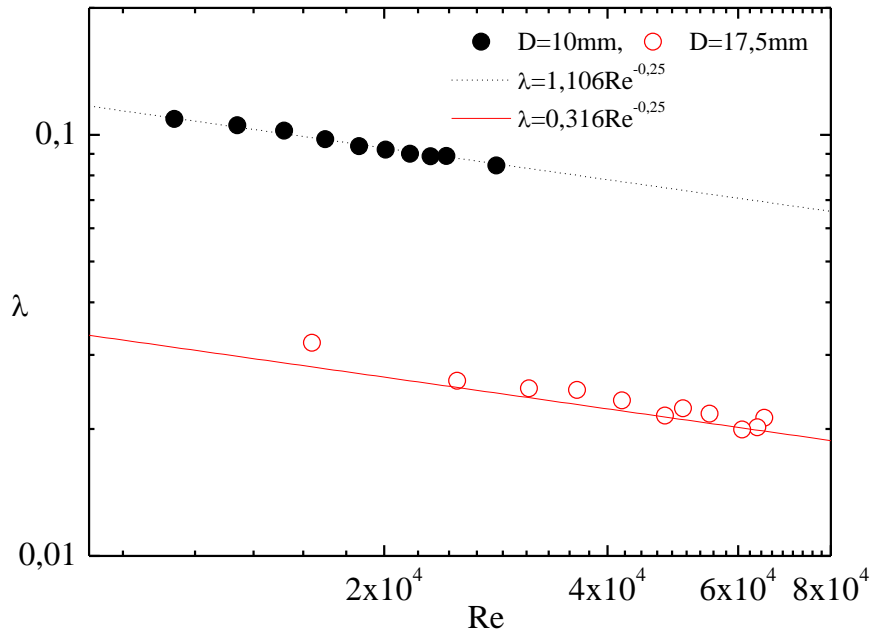


Figure III.5 : Variation du coefficient de la perte de charge linéaire en fonction du nombre de Reynolds pour les deux conduites lisses.

III.3.1.4 La perte de charge dans la conduite rugueuse

Pour comparer les résultats expérimentaux obtenus de la perte de charge dans la conduite rugueuse de D=17,5 mm avec les résultats théoriques (équation III.1). Pour cette équation, nous avons vu utiles de faire une comparaison entre trois modèles permettant de déterminer le coefficient de la perte de charge linéaire λ : modèle de Ghanbari *et al.* [16] , Blasius et Colebrook.

Pour les conduites rugueuses, l’expression du coefficient de la perte de charge linéaire est donnée par les relations suivantes :

- **Ghanbari *et al.*** [16]

$$\lambda = \left(-1.52 \log \left(\left(\frac{\varepsilon / d}{7.21} \right)^{1.042} + \left(\frac{2.731}{Re} \right)^{0.9152} \right) \right)^{-2.169} \tag{III.7}$$

Si on remplace l’équation (III.11) dans (III.1), on trouve :

$$\Delta H_L = \left(-1.52 \log \left(\left(\frac{\varepsilon / d}{7.21} \right)^{1.042} + \left(\frac{2.731}{Re} \right)^{0.9152} \right) \right)^{-2.169} \frac{U^2 L}{2g D} \tag{III.8}$$

Les équations (III.3), (III.4) et (III.12) permettent d’écrire:

$$\Delta H_L = 0.0826 \left(-1.52 \log \left(\left(\frac{\varepsilon / D}{7.21} \right)^{1.042} + \left(\frac{2.145 \nu D}{Q_v} \right)^{0.9152} \right) \right)^{-2.169} Q_v^2 D^{-5} L \quad (\text{III.9})$$

Avec $L = 1 \text{ m}$, la relation (III.9)

$$\Delta H_L = 0.0826 \left(-1.52 \log \left(\left(\frac{\varepsilon / D}{7.21} \right)^{1.042} + \left(\frac{2.145 \nu D}{Q_v} \right)^{0.9152} \right) \right)^{-2.169} Q_v^2 D^{-5} \quad (\text{III.10})$$

Avec : $D = 17,5 \text{ mm}$, $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$, on aura :

$$\Delta H_L = 0,0826 \left(-1,52 \log \left(0,00504 + 6,84 \cdot 10^{-6} Q^{-0.9152} D^{0.9152} \right) \right)^{-2.169} Q_v^2 D^{-5}$$

Pour la conduite de diamètre est $D = 17.5 \text{ mm}$, la relation (III.10) s'écrit :

$$\Delta H_L = 20,30 \cdot 10^6 \left(-\log \left(0,00504 + 1,687 \cdot 10^{-7} Q^{-0.9152} \right) \right)^{-2.169} Q_v^2$$

En comparant cette dernière relation avec la relation générale de la perte de charge linéaire,

$$\Delta H_L = \lambda \frac{U^2}{2g} \frac{L}{D} = \lambda \frac{8Q^2 L}{g \pi^2 D^5} = r Q^2 \quad (\text{III.11})$$

Où r est la résistance hydraulique de la conduite, on remarque que cette dernière (résistance hydraulique dépend du débit élevé à une puissance inférieure à 2.

La valeur de r est déterminée directement à partir de la mesure de ΔH_{th} et de Q , ceci nous permet de calculer λ .

Formule de Colebrook-White

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71 D} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right) \quad (\text{III.12})$$

III.3.1.4.a Détermination de la rugosité relative de la conduite rugueuse

Les équations (III.7) et (III.8) exigent la connaissance de la rugosité absolue ε . Cette dernière est déterminée en reportant les valeurs du coefficient de la perte de charge linéaire λ dans le diagramme de Moody. Rappelons que les valeurs du coefficient de la perte de charge λ sont déterminées à partir des résultats expérimentaux de la perte de charge et du débit réel. Ce dernier est mesuré directement à l'aide de la jauge de niveau et d'un chronomètre.

En reportant les valeurs de λ sur le diagramme de Moody (Figure III.6), on remarque que dans le cas où le liquide manométrique est l'eau, les valeurs de λ sont situés légèrement au dessus de la

courbe $\frac{\varepsilon}{D} = 0,05$. Par contre, dans où le mercure est utilisé comme liquide manométrique, les valeurs de λ sont situés sur la courbe $\frac{\varepsilon}{D} = 0,04$.

Tenant compte de ces deux résultats, nous avons donc choisi la valeur intermédiaire de la courbe de la rugosité relative ($\frac{\varepsilon}{D} = 0,045$) pour appliquer la relation (III.7) qui permet d’avoir λ . Cette équation est comparée à celle de Blasius (relation III.2) et celle de Colebrook-White (relation III.8).

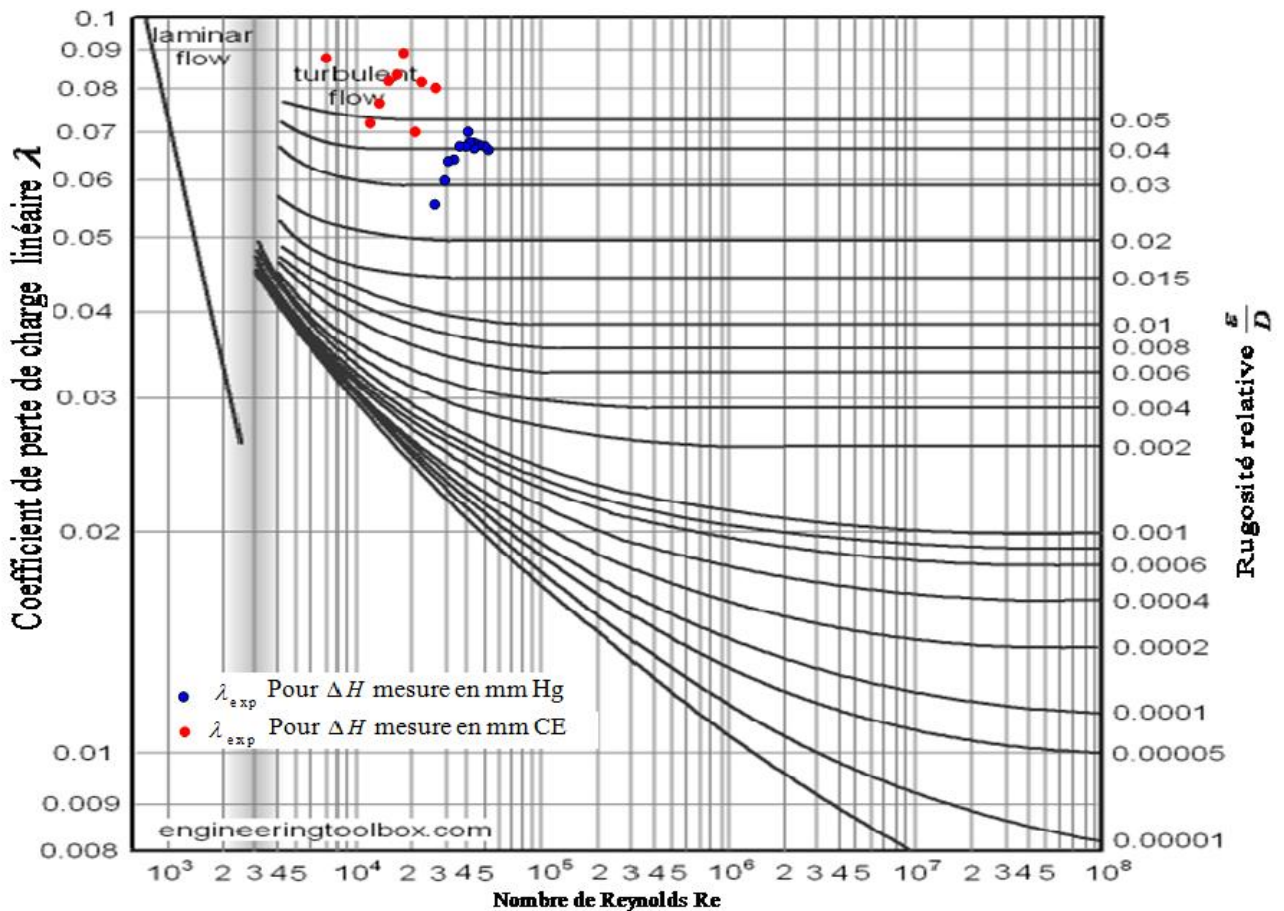


Figure III.6 : Représentation des coefficients de perte de charge linéaire expérimentaux de la conduite rugueuse dans le diagramme de Moody.

La viscosité cinématique de l’eau déterminée à l’aide de l’abaque des propriétés thermophysiques (Annexe 2).

III.3.1.4.b Variation de la perte de charge linéaire en fonction du débit

La figure (III.7) représente la variation de la perte de charge linéaire en fonction du débit volumique dans la conduite rugueuse. On remarque que l’allure des courbes expérimentales est la même lorsqu’on utilise l’eau ou le mercure comme liquide manométrique. Cependant, dans le cas

du mercure, et à cause de sa grande masse volumique et donc de sa stabilité, nous avons pu prendre plusieurs points expérimentaux. Ces derniers sont plus proches de la courbe d'ajustement que ceux déterminés lorsque le liquide manométrique est de l'eau.

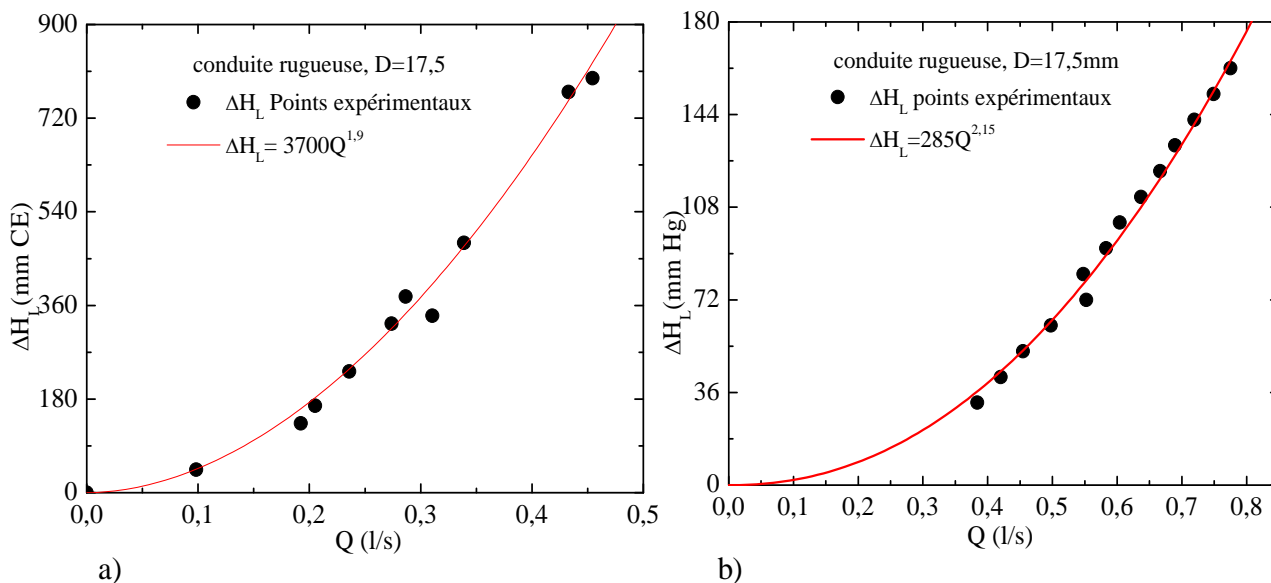


Figure III.7 Variation de la perte de charge linéaire en fonction du débit volumique dans une conduite rugueuse, de $D=17.5$ mm : a) liquide manométrique « eau » ; b) liquide manométrique « mercure ».

La figure II.8, présente une comparaison entre les valeurs de λ déterminées expérimentalement à celles déterminées à l'aide des modèles de Blasius, Colbrook et Ghanbari. On remarque (figure III.8a) que le modèle Colbrook et de Ghanbari sont presque confondus et proches des valeurs expérimentales. Une différence remarquable existe entre les valeurs de λ déterminées expérimentalement et à l'aide du modèle de Blasius lorsque le débit (Reynolds) augmente. Pour les petites valeurs de débit (premier point), il y a une superposition parfaite des valeurs de expérimentales et celle déterminées par les trois modèles.

Lorsque le liquide manométrique est du mercure, les valeurs expérimentales de λ sont presque confondues avec celles déterminées par les modèles de Colbrook et Ghanbari, et surtout pour les grandes valeurs du nombre de Reynolds. Pour le modèle de Blasius, nous avons la même remarque que celle faite dans le cas où le liquide manométrique est de l'eau.

On voit donc que le modèle de Colbrook et celui de Ghanbari, sont des modèles universels qui tiennent compte d'un nombre important de paramètres que celui de Blasius.

Rappelons que la détermination du coefficient de perte de charge linéaire dans le cas de la relation de Colbrook exige des itérations, ce qui a été fait.

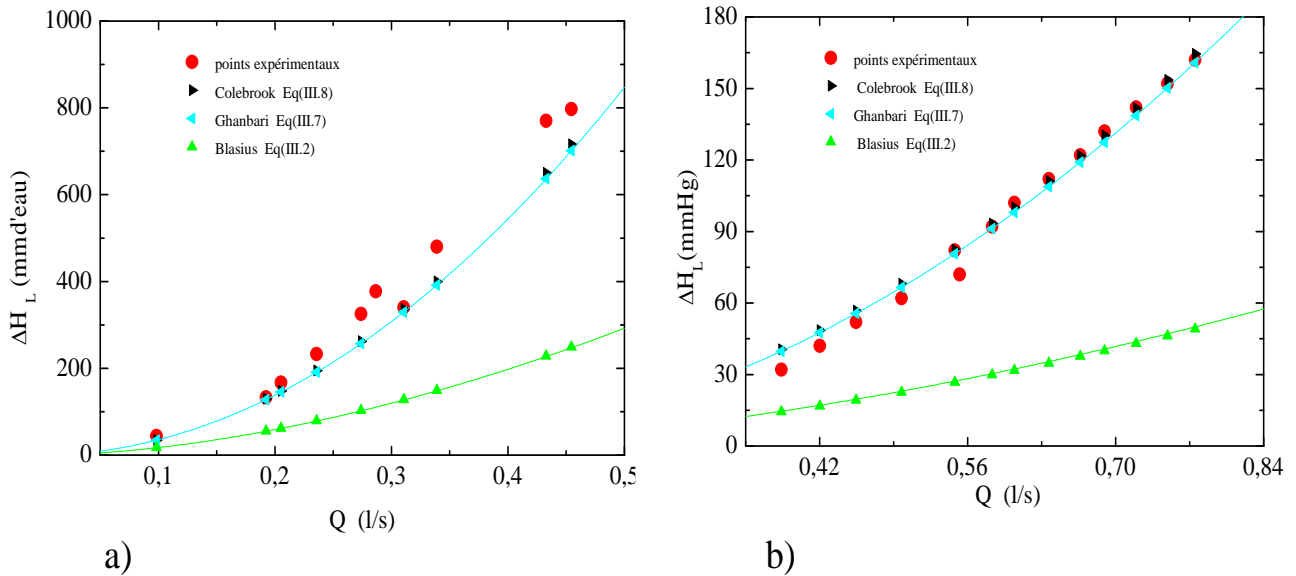


Figure III.8 : Variation de la perte de charge linéaire : comparaison des modèles de détermination du coefficient de la perte de charge linéaire λ aux valeurs expérimentales, conduite rugueuse, de $D=17.5\text{mm}$, a) Liquide manométrique « eau » ; b) liquide manométrique « mercure ».

III.3.2 Mesure de perte de charge singulière

Dans ce travail, nous avons étudié la perte de charge de certaines singularités :

- Coude à angle vif (45° , 90°) et à angle arrondi (90°)
- Jonction en T (90°), et en Y (45°).

III.3.2.1 Comparaison entre les coudes 90° arrondi et à angle vif

La figure III.9 présente une comparaison entre les pertes de charge déterminées dans un coude à angle arrondi et à angle vif. La comparaison, comme le montre la figure ne peut se faire que sur une petite gamme de débit. Sur cette dernière on remarque que pour un même débit, la perte de charge dans le cas d'un coude à angle vif est assez grande que celle dans un coude à angle arrondi.

La courbe théorique de la perte de charge singulière est

$$\Delta H_s = K \frac{U^2}{2g} = K \frac{1}{2g} \left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2 = \frac{16}{2\pi^2 g D^4} K Q^2 = C^{st} K Q^2 \quad (\text{III.13})$$

Avec $C^{st} = \frac{16}{2\pi^2 g D^4}$ qui pour le diamètre $D = 17,5\text{mm}$ s'écrit $C^{st} = 881 \text{ l}^{-2} \text{ s}^2 \text{ mmCE}$

- pour le coude 90° à angle arrondi la valeur de K est tirée du tableau (Annexe 4), $K = 0.58$. Cette valeur est comparée à celle donnée par la relation II. 51 ($K = 0,1692$) et celle donnée par le

tableau II.4 ($K = 0,17$), ces deux dernières valeurs sont presque égales. Pour notre installation le rayon de courbure du coude à angle arrondi est $R_c = 26.5mm$.

La courbe théorique de la perte de charge singulière pour le coude à angle arrondi est:

$$\Delta H_s = 510Q^2 \text{ avec } K = 0,58 \quad (\text{III.14})$$

$$\Delta H_s = 149,7Q^2 \text{ avec } K = 0,17 \quad (\text{III.15})$$

On remarque que la courbe théorique qui correspond à $K = 0,58$ est plus proche des points expérimentaux que celle qui correspond à $K = 0,17$. Nous avons un rapport de 2 entre les deux valeurs du coefficient de perte de charge singulière. On peut donc conclure que la valeur de K tirée de l'annexe (4) ($K = 0,58$), s'applique parfaitement dans notre cas. Ce résultat, et en absence de toute information sur l'état de surface interne du coude, on pense que ce dernier est rugueux avec et de rugosité $\varepsilon = 0,005D = 0,005 * 17,5 = 0,0875mm$ tirée de l'annexe (4)

- Pour le coude 90° à angle vif le coefficient de perte de charge singulière $K = 1.13$ tirée à partie du tableau II.5. Cette valeur est comparée à celle donnée par la relation II. 52 et qui est de $K = 1,17$. Il ya donc une différence de 4% entre les deux valeurs de K .

- Pour le coude à angle vif, la courbe théorique a pour équation :

$$\Delta H_s = 955,5Q^2 \quad K = 1,13 \quad (\text{III.16})$$

$$\Delta H_s = 1030Q^2 \quad K = 1,17 \quad (\text{III.17})$$

Les courbes théoriques obtenues pour les deux valeurs de K sont proches des points expérimentaux. On peut donc conclure que l'utilisation de la relation (II.53) ou du tableau (II.5) pour la détermination de la valeur du coefficient de la perte de charge singulière mène au même résultat.

Les points expérimentaux du coude à angle vif sont en bonne concordance avec la courbe théorique du coude à angle vif. Par contre, pour le coude à angle arrondi, on remarque une légère différence entre les résultats expérimentaux et la courbe théorique.

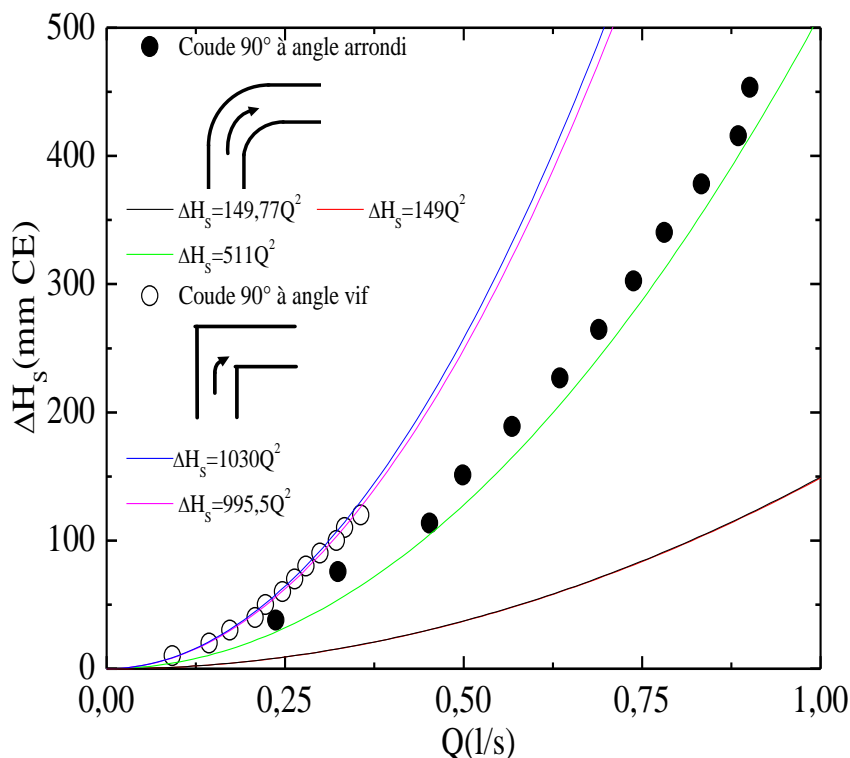


Figure III.9: Comparaison de la perte singulière dans un coude à angle vif et à angle arrondi, $D=17,5$ mm.

II.3.2.2 Comparaison entre le coude 45° et les jonctions en « T » et en « Y »

La figure III.10, donne une comparaison entre les pertes de charge dans trois singularités différentes. On remarque que pour le même débit et le même sens d'écoulement, la jonction en « T » à 90° crée la plus grande perte de charge, viens ensuite la jonction en « Y » à 45° puis le coude à 45°.

Il faut noter qu'expérimentalement, nous n'avons pas pu trouver une grande gamme de débits commune aux trois singularités.

Pour la détermination des valeurs du coefficient de la perte de charge singulière, nous avons utilisé les tableaux et les annexes. Pour le coude 45° à angle vif $K = 0.24$ (Tableau II.5), pour les deux jonctions K varie avec le rapport des débits et des surfaces d'entrée et de sortie. Pour la jonction « T » à 90°, $K = 0.87$ (Annexe 5) et $K = 1,2$ (Tableau II.8), pour la jonction « Y » à 45°, $K = 0.38$ (Annexe 6), $K = 0.59$ (Tableau II.10).

La différence entre les valeurs de K pour les deux jonctions provient uniquement de la conception des angles vifs (Figures II.13-II.14), ou arrondis (Annexes 5 et 6).

On remarque que pour la jonction « Y » à 45°, les points expérimentaux sont situés entre deux courbes théoriques correspondant à $K = 0.38$ et $K = 0.59$. Pour la jonction en « T » à 90°, les points expérimentaux sont en bonne concordance avec la courbe théorique qui correspond à $K = 0.87$. Ceci montre que la jonction en « T » à 90° de notre installation possède un rayon de courbure. Il en est de même pour la jonction en « Y » à 45°.

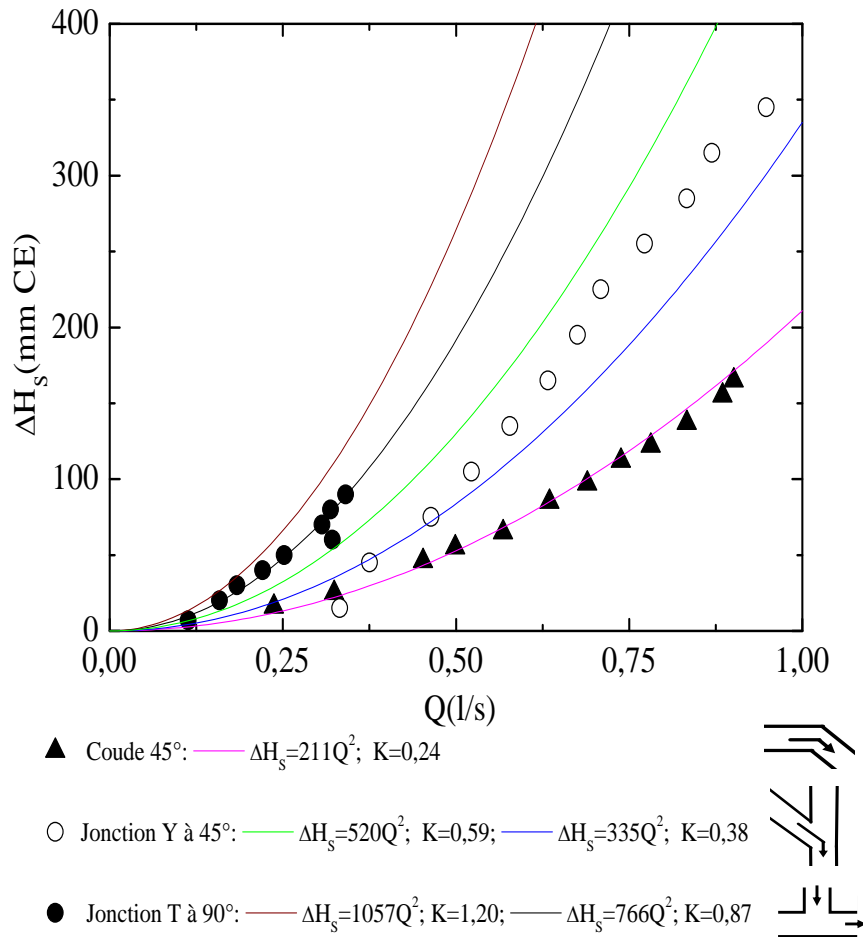


Figure III.10 : Comparaison de la perte singulière dans un coude à 45°, jonction en « Y » à 45° et jonction en « T », $D = 17,5$ mm.