Introduction

La plupart des activités humaines connaissent le besoin de déplacer des fluides, aujourd'hui les fluides sont le plus souvent convoyés par des conduites dans lesquelles ils sont mis en mouvement par des pompes. Quelle que soit leur nature, les frottements s'opposent au mouvement du fluide, ils lui coûtent de l'énergie lors du déplacement, ce coût est appelé la perte de charge. Une partie de l'énergie transmise au fluide par la pompe servira à couvrir cette perte de charge, elle ne servira donc pas à donner de la vitesse au fluide...on voit dès lors que ces frottements peuvent avoir un effet gênant sur notre activité.
Les pertes de charge devront donc être prises en compte lors de la conception de l'installation et elles peuvent contraindre le concepteur à changer l'organisation de son circuit, sa géométrie ou ses choix matériels. Les pertes de charge exigent l'utilisation d'énergie additionnelle pour déplacer le fluide, cette énergie a bien sur un coût qu'il convient de limiter.

Notre étude portera dans un premier temps sur l'étude des pertes de charge dans des conduites cylindriques, nous ferons des mesures pour étudier l'influence du débit, du diamètre de la conduite ainsi que de la rugosité sur les conduites droites.

Dans un second temps nous nous intéresserons aux pertes de charges induites par des éléments courants composant les circuits tels que les coudes, changements de section ou encore vannes.

Dans le cadre de l'étude des pertes de charge nous aborderons la mesure du débit avec l'étalonnage d'un débitmètre à flotteur et les régimes d'écoulement. Pour finir nous parlerons de la problématique des pertes de charges dans l'industrie. blablabla à terminer

1 Rappels théoriques

1.1 Généralités

L'écoulement d'un fluide réel dans une conduite cause toujours une perte d'énergie liée à la viscosité, aux frottements contre les parois, à la turbulence, aux courbures des lignes de courants...
On peut, avec l'équation de Bernouilli exprimer le bilan énergétique d'un fluide incompressible en mouvement non rotationnel d'un point A à un point B.

$$P_A + \rho\frac{V_A^2}{2} + \rho g z_A + \dot{W} = P_B + \rho\frac{V_B^2}{2} + \rho g z_B + J_{AB}$$

avec

$$\begin{cases} P_A, P_B : \text{Pression au point A, B.} \\ V_A, V_B : \text{Vitesse au point A, B.} \\ z_A, z_B : \text{Hauteur du point A, B.} \\ \dot{W} : \text{Energie hydraulique apportée par la pompe.} \\ J_{AB} : \text{Perte de charge subie par le fluide en allant de A à B.} \end{cases}$$

La perte de charge est exprimée sous forme d'une pression, on peut également la retrouver sous forme d'une hauteur manométrique, mais en réalité c'est une perte d'énergie. Les pertes de charge sont liées à la vitesse à laquelle les particules de fluide se déplacent, au régime d'écoulement, aux caractéristiques du fluide, ainsi qu'à la géométrie des éléments dans lequel il circule, et cela à plusieurs échelles : de la forme générale de la conduite à la présence d'irrégularités à la surface du matériau (rugosité).

L'addition des valeurs des pertes de charge singulières et régulières d'élements permet de déterminer les pertes de charge occasionnées par le circuit que ces éléments forment quand ils sont en série [1]. On peut distinguer deux types de pertes de charge quand il convient de les évaluer.

1. Quand le circuit comporte des mailles ou des ramifications les principes de conservation de l'énergie mécanique et de la masse pourront permettre de résoudre le problème : des méthodes de calcul plus ou moins compliquées existent, on n'en parlera pas d'avantage ici, mais on pourra utiliser des logiciels tels que WaterCAD, HydrauliCAD, Openfoam, KYPIPE, H2ONET, pipeflow... qui calculeront les pertes de charge pour la configuration du circuit renseignée.

1.2 Calcul des pertes de charge régulières

Les pertes de charge régulières (ou linéaires) sont dues principalement aux forces de frottement des molécules du fluide contre la paroi de la conduite, ainsi qu'aux frottements des couches de fluides entre elles, ces pertes sont liées aux conduites droites.
L'équation de Darcy-Weisbach permet de les calculer, en hauteur manométrique.

$$J = \Delta H = \lambda . \frac{L.V_m^2}{D_h.2g} \tag{1}$$

avec

$$\begin{cases} \lambda : \text{Coefficient de Darcy.} \\ L : \text{Longueur de tube droit.} \\ D_h : \text{Diamètre hydraulique du tube.} \end{cases}$$

Le λ peut être déterminé via différentes corrélations suivant les cas, dans le notre il sera lu sur le diagramme de Moody, il dépend notamment du régime d'écoulement, on calculera pour ça le nombre de Reynolds qui caractérise l'écoulement.

$$Re = \frac{\rho.V_m.D}{\mu} \tag{2}$$

Des valeurs de Reynolds délimitent [2] les différents régimes d'écoulement.

- Si Re $<$ 2000, le régime est dit laminaire.
- Si 2000 $<$ Re $<$ 3000, le régime est dit intermédiaire.
- Si Re $>$ 3000, le régime est dit turbulent.

1.3 Calcul des pertes de charge singulières

Les pertes de charge singulières sont liées à une dissipation d'énergie par des turbulences qui affectent l'écoulement quand celui ci est affecté par une singularité hydraulique comme un coude, une vanne, un changement de section, ou n'importe quel objet qui s'y oppose fermement. On peut les déterminer via cette relation, en hauteur manométrique toujours :

$$J = \xi . \frac{V_m^2}{2g} \tag{3}$$

Suivant les cas, la littérature peut nous fournir ξ directement ou bien elle nous fournit une longueur équivalente L_{eq} à du tube droit, c'est à dire la longueur de tube droit de diamètre D qui causerait les mêmes pertes de charge que la singularité à laquelle on s'intéresse. Pour calculer J avec L_{eq} on posera dans la relation 3 :

$$\xi = \lambda . \frac{L_{eq}}{D}$$

2. Ces valeurs sont purement indicatives, on observe en général un changement de régime d'écoulement AUTOUR de ces valeurs.

2 L'installation

2.1 Présentation du matériel

FIGURE 1 – Le montage expérimental

Le montage a été conçu pour étudier les pertes de charge linéaires et régulières induites par différents éléments, un schéma TI figure en annexe.

Le dispositif vise à étudier les pertes de charge sur une portion du circuit que l'on sélectionnera en condamnant les autres à l'aide des vannes pour l'alimenter avec un débit Q_v connu. On pourra mesurer la différence de pression aux bornes de l'élément étudié grâce à des tubes piezométriques, grâce auxquels on peut lire une différence de hauteur manométrique qui correspondra à la perte de charge.

Segment	Rugosité	Diamètre(mm)	Type d'élement
AB	lisse	35.2	Tube droit 1.5m
CD	lisse	27	Tube droit 1.5m
EF	lisse	19.4	Tube droit 1.5m
HG	rugueux	19.4	Tube droit 1.5m
IJ	lisse	19.4 - 27	élargissement brusque
JK	lisse	27 - 19.4	rétrecissement brusque
LM	lisse	19.4	8 coudes à 90 °
MN	lisse	19.4	8 coudes à 135 °

TABLE 1 – Éléments du circuit étudiés

2.2 Utilisation du montage

2.2.1 Le démarrage de l'installation

Pour nos mesures, on doit sélectionner l'unique segment à alimenter grâce aux vannes et vérifier que l'eau retournera bien dans le réservoir. On doit prendre garde à faire circuler l'eau uniquement dans la conduite étudiée pour que le débit mesuré par le rotamètre soit égal à celui qui circule dans la segment étudié.
Sachant que l'on utilise une pompe centrifuge, avant de la démarrer on vérifiera :

- Que l'arrivée d'eau est possible, la vanne d'aspiration doit être ouverte et le réservoir suffisamment rempli car la cavitation endommage les pompes très rapidement.
- Que la vanne à la sortie de la pompe est fermée afin d'éviter les coups de bélier car ils peuvent endommager notre circuit.

Une fois la pompe démarrée on ouvrira doucement la vanne pour atteindre le débit souhaité.

2.2.2 Prendre une mesure

Une fois le régime d'écoulement établi, on peut voir des oscillations absentes ou entretenues au flotteur du débitmètre et aux niveaux des tubes piezométriques suivant le régime, il faut faire avec. Si les tubes piézométriques sont vides ou noyés, on ne pourra pas lire la hauteur manométrique, dans ce cas on utilisera la vanne qui permet de rétablir P_{atm} au dessus des niveaux d'eau, une fois le problème résolu on la refermera pour prendre la mesure.

Pour un segment IJ à un débit donné on consignera les valeurs de Z_I et Z_J correspondantes au débit, pour un segment on veillera à prendre plusieurs mesures de façon à pouvoir observer les pertes de charge pour plusieurs régimes d'écoulement et pour garantir qu'une valeur aberrante sera repérée, on pourra calculer les valeurs de débit à atteindre à l'aide de la relation 2.

D conduite (mm)	Q_v pour R=2000 (l/h)	Q_v pour Re=3000 (l/h)
35.2	199.4	299.2
27	152.9	229.5
19.4	102.9	164.8

Table 2 – Débits pour les changements de régime d'écoulement en fonction du diamètre de la conduite

2.2.3 Calibration du rotamètre

Nous pouvons contrôler le débit du fluide grâce à la vanne boisseau située à la sortie de la pompe, la lecture du débit peut se faire grâce à des rotamètres à flotteurs dont l'utilisation dépendra de la gamme de débits utilisée pour réaliser la mesure. Nous disposons d'un débitmètre à effet coriolis qui servira de référence en terme de mesure de débit : il nous donne un débit massique Q_{mREF} que l'on peut convertir en débit volumique Q_{vREF} en connaissant la température ambiante T, qui nous donne $\rho(T)$ via des tables. Du fait des très faibles varia-

tions observées, on supposera T constante pendant l'expérience, d'où $\rho(T) = \rho = 998kg.m^{-3}$.

$$Q_{vREF} = \frac{Q_{mREF}}{\rho}$$

Le débitmètre à effet Coriolis nous servira à étalonner le débitmètre à flotteur puis nous arrêterons de l'utiliser (il n'est pas branché en série avec les éléments que nous étudierons), en effet un débitmètre à flotteur est étalonné pour un fluide dans des conditions de pression et de température fixe (la pression n'aura ici pas d'impact ici, cela concerne les gaz) qui ne sont pas nécessairement celles qui règnent pendant les mesures. L'utilisation du débitmètre à flotteur impose de connaître une relation entre le débit Q'_v lu sur ce dernier et le débit de référence donné par le débitmètre à effet Coriolis. On va déterminer cette relation f telle que $Q_{vREF} \simeq f(Q'_v)$ en faisant des mesures expérimentales couvrant la gamme de débits utilisables pour les mesures.

On utilisera une règle de conversion pour chacun des deux débitmètre que l'on établira avec une régression linéaire. Le plus grand rotamètre est gradué tous les 100l/h mais pour de fortes valeurs de débit on a une oscillation du flotteur due à des turbulences, ce qui réduit d'avantage notre precision, on s'efforcera de prendre une valeur "moyenne" située entre les valeurs extrêmes des oscillations.

$$Q_v = A.Q'_v + B \tag{4}$$

avec, d'après la régression linéaire [3] sur les données expérimentales

$$\begin{cases} A = 1,1327 \\ B = -8,412.10^{-6} \end{cases}$$

Nous utiliserons toujours par la suite des débits corrigés par la relation 4. On peut calculer une erreur relative E_r pour se rendre compte de l'importance de la correction. Pour une mesure de $Q'_v = 1000l/h = 2,78.10^{-4}m^3.s^{-1}$, on a $Q_v = 3,06.10^{-4}m^3.s^{-1}$ par la relation 4.
D'où

$$E_r = \frac{|Q_v - Q'_v|}{Q_v} = 9,2\%$$

ce qui n'est pas négligeable. Il existe une l'incertitude à la lecture sur le débitmètre, qui est difficile à quantifier à cause de l'amplitude des oscillations variant avec le débit, une fois le régime turbulent atteint le phénomène est flagrant, on se basera sur un arrondi à la centaine de l/h pour Q'_v.

3. Le coefficient de corrélation R=0.99 nous assure une fiabilité de la régression, on peut valider notre modélisation de la dérive sur cette gamme de débits.

3 Mesures et interprétations

3.1 Les pertes de charge régulières

3.1.1 L'effet du débit

les pertes de charge singulières correspondent aux segments AB, BC, EF, GH comme on peut le voir sur le tableau 1 (p.4) On va pour chaque conduite déterminer $V_m = \frac{Q_v}{S}$ qui nous servira à déterminer le nombre de Reynolds grâce à la relation 2 (p.3)

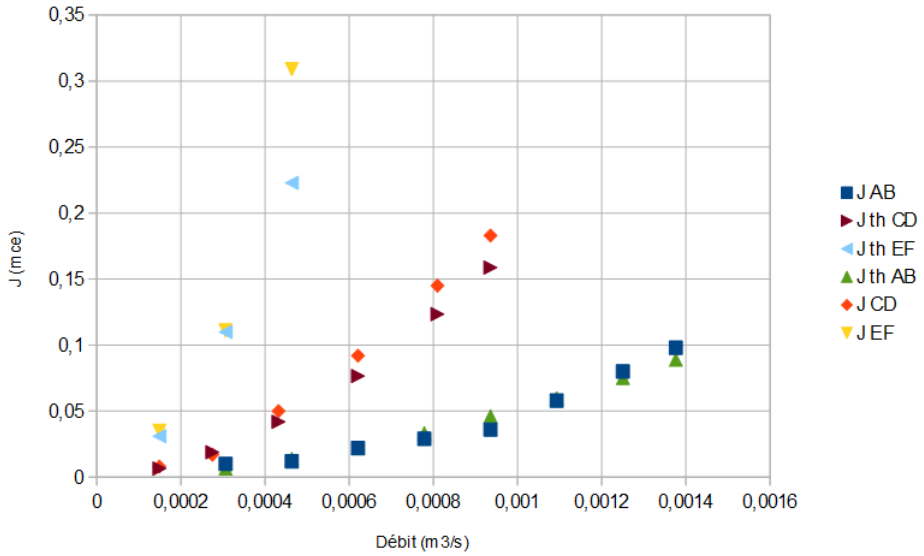

FIGURE 2 – Influence du débit sur les pertes de charge pour des tubes de diamètres différents expérimentalement vs théoriquement

Ces données ont été calculées grâce à des mesures de J en faisant varier le débit, les données brutes sont consignées en annexe, les valeurs théoriques ont été obtenues grâce à la relation 1(p.3) les λ ont été obtenus en recalculant des Re et en suivant la courbe des tuyaux lisses du diagramme de Moody.
Toutes les courbes sont croissantes, l'augmentation du débit provoque une augmentation des pertes de charge. Pour un même débit et des sections plus petites, on observe que les pertes de charge augmentent. Ces deux observations sont liées au fait que $Q_v = V_m.S$, si l'on garde Q_v constant, une diminution de S augmente V_m, si on garde S constant, une augmentation de Q_v augmente V_m. Une augmentation de V_m se traduira par une augmentation de J de part la relation 1, ces résultats sont en accord avec la théorie.

On peut néanmoins se demander pourquoi on observe un tel écart avec la théorie pour chaque valeur de J_{CD}, l'incertitude sur le débit et sur J est la même que pour J_{AB}, le segment CD est supposé être lisse hors les pertes de charge sont toujours plus élevées, on peut se demander si le tuyau n'est pas en réalité un peu rugueux.

On va calculer d'autres valeurs de pertes de charge théoriques en prenant une rugosité relative "non lisse" sur le diagramme de Moody, nous utiliserons une feuille de calcul pour éviter les imprécisions liées à la lecture graphique. Nous regarderons comment ces valeurs

corrèlent avec nos mesures pour essayer d'encadrer la rugosité de notre conduite.

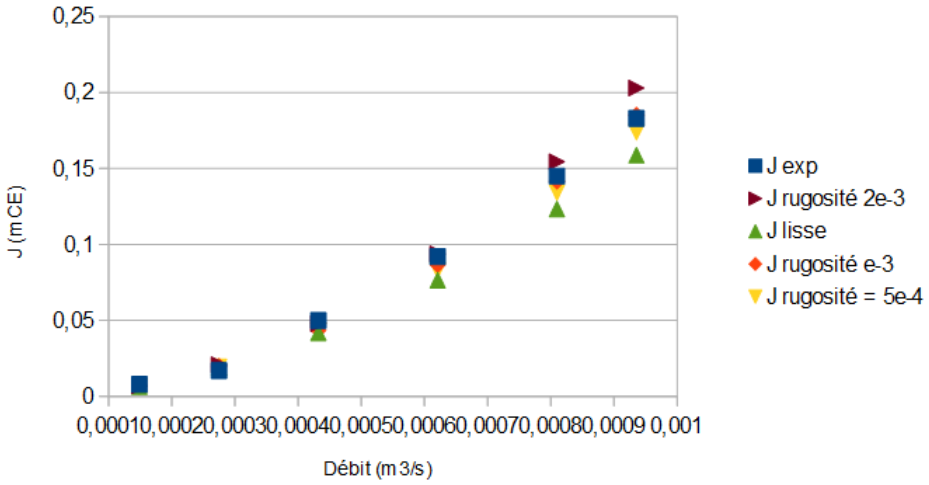

FIGURE 3 – Comparaison des valeurs expérimentales de J_{CD} avec des valeurs théoriques pour différentes rugosités relative du tube calculée via la relation 1.

On compare les valeurs expérimentales de J_{CD} à des valeurs théoriques en faisant varier la rugosité, ce qu'on peut en dire de la figure 3 est que le segment CD occasionne plus de pertes de charge qu'un tube lisse et que sa rugosité relative est comprise entre 5.10^{-4} et 2.10^{-3}, mais il ne faut pas oublier que l'on suppose la rugosité relative constante sur toute la longueur, ce n'est pas forcément le cas dans la pratique, il se peut également que le tube soit lisse mais qu'il existe une ou des irrégularité quelque part, nous ne pouvons pas savoir, il faudrait faire d'autres expériences. Pour avoir un ordre d'idée, une rugosité relative de 5.10^{-4} sur un tube de diamètre 27mm correspond à des rugosités de $1,35.10^{-5}$m, donc un rien peut jouer, inutile d'aller plus loin étant donnée la précision de nos mesures. Les conclusions quant à la réalité de la rugosité du tube sont à prendre avec des pincettes, c'est ce que nous conclurons de cette parenthèse.

3.1.2 L'effet de la rugosité

Voyons maintenant l'influence de la rugosité sur les pertes de charge, nous allons comparer les segments EF et GH qui ont le même diamètre, les λ obtenus grâce aux points des mesures précédentes ont tous été reportés sur un diagramme de Moody en annexe. On peut voir sur la figure 4 (p.9) que les résultats vont dans le sens de la théorie, la rugosité augmente les frottements, on peut chercher à déterminer la rugosité relative du tube GH en reportant couples $(Re; \lambda)$ sur le diagramme de Moody qui figure en annexe, on a hélas trop peu de mesures sur le segment EF (seulement 3) pour essayer de calculer la rugosité de la conduite.

On peut également, comme toujours, douter de la précision de nos mesures mais le fait que nos points soient proches les uns des autres est plutôt bon signe. Le problème est qu'ils se trouvent plus haut que les droites du diagramme de Moody dont nous disposons et pour lequel $(\frac{\varepsilon}{D})_{MAX} = 0.05$. Nous n'avons pas trouvé de diagramme allant plus haut, donc nous ne pouvons pas déterminer la rugosité relative de cette façon.

Il faudrait réaliser d'autres expériences avec un tuyau présentant la même rugosité mais d'un diamètre supérieur pour voir, l'expérience nous aura quand même permis de constater l'effet de la rugosité sur les pertes de charge.

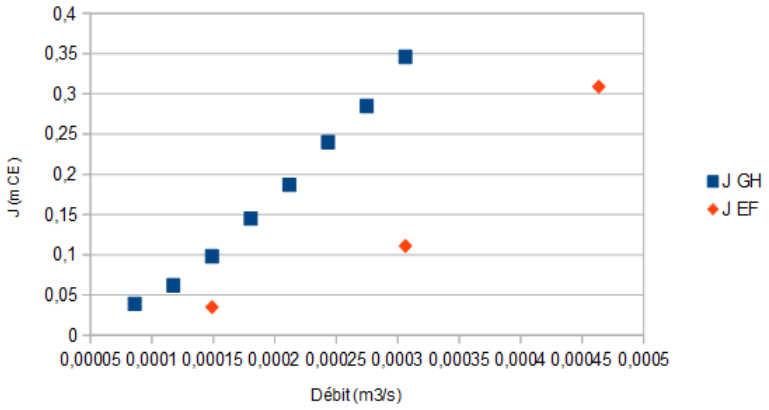

FIGURE 4 – Comparaison des valeurs expérimentales des pertes de charge en fonction du débit pour deux conduites de rugosité différente (seule la rugosité varie).

3.2 Les pertes de charge singulières

3.2.1 Changements brusque de section

Un changement brutal de section perturbe l'écoulement et occasionne d'importantes pertes de charge, nous allons dans un premier temps prendre des mesures de pertes de charge en fonction du débit pour un élargissement brusque, qui correspond au segment IJ.