

## ChE-203 TP-2 Pertes de charge

*Mode d'emploi, printemps 2025*



Responsable du TP :

Hugh Warkentin  
[hugh.warkentin@epfl.ch](mailto:hugh.warkentin@epfl.ch)

Responsable du cours :

Prof. Raffaella BUONSANTI  
[raffaella.buonsanti@epfl.ch](mailto:raffaella.buonsanti@epfl.ch)

## 1. Déclaration de l'objectif

Les services industriels de Viège (Suisse) fournissent l'entreprise Lonza avec de l'eau industrielle à travers un système de tuyaux d'alimentation. Récemment, ils ont remarqué que la pression nécessaire pour fournir cette eau a augmenté, cela étant peut-être due à une augmentation de la rugosité de l'intérieur des tuyaux (c'est-à-dire à un encrassement des tuyaux). Votre tâche dans ce TP sera de trouver un moyen d'estimer la rugosité de la tuyauterie avec les pertes de charge que vous mesurerez. Pour réaliser cela, vous allez étudier les différences entre écoulements laminaire et turbulent, mais aussi comprendre comment les pertes de charge dépendent d'autres éléments de plomberie standard. Enfin vous allez étalonner un débitmètre basé sur le concept de la perte de charge.

## 2. Base théorique.

L'une des notions fondamentales pour quelqu'un qui étudie ou pratique du génie chimique est l'écoulement d'un fluide entre deux points. Quand un fluide réel (avec une viscosité non nulle) se déplace dans une conduite, des forces de frottement prennent naissance. Celles-ci ne peuvent être évaluées que par des méthodes empiriques (à l'aide de la théorie de base).

### 2.1. Écoulement dans des tuyaux horizontaux

Les forces de frottement engendrent des pertes de pression (ou pertes de charge) le long d'un tuyau. Dans le cas particulier de l'écoulement d'un fluide à travers un tuyau horizontal, on peut relier cette perte de charge avec les propriétés de l'écoulement et le coefficient de frottement.

Le coefficient de frottement selon Fanning est défini comme étant la force de résistance par unité de surface mouillée ( $2\pi rL$  pour un tuyau de longueur  $L$  et de rayon  $r$ ) divisée par le produit de la densité et de la charge dynamique ( $\frac{1}{2}\rho u^2$ ). La force de résistance correspond, elle, à la perte de pression par frottement ( $\Delta P_f$ ) multipliée par la section transversale ( $\pi r^2$  pour un tuyau circulaire de rayon  $r$ ).

Par conséquent, la relation entre la perte de charge et le coefficient de frottement selon Fanning est :

$$f_f = \frac{\frac{\Delta P_f \pi r^2}{2\pi r L}}{\frac{1}{2} \rho u^2}$$

Ou alors :

$$\Delta P_f = 4f_f \rho \frac{L}{D} \frac{u^2}{2}$$

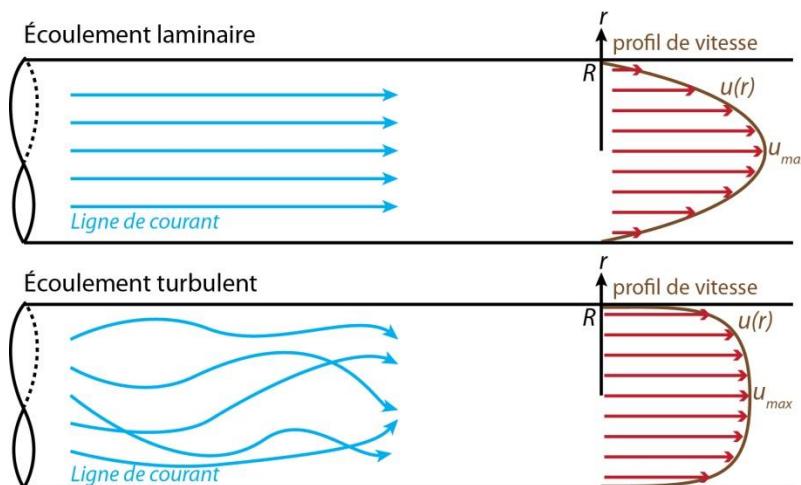
Où  $D$  est le diamètre du tuyau interne [m],  $\rho$  est la masse volumique [kg/m<sup>3</sup>], et  $u$  est la vitesse linéaire moyenne du liquide s'écoulant [m/s].

Il est important de noter ici que le  $\Delta P_f$  donné par cette équation est une quantité positive. Cependant, la pression en un point en aval de la direction de l'écoulement doit être inférieure à la pression en amont (à cause de la perte de charge). C'est-à-dire  $P_2 - P_1 = -\Delta P_f$  pour la situation suivante :



Afin de caractériser les propriétés de l'écoulement, nous allons utiliser les notions qu'Osborne Reynolds a introduit en montrant que deux types de courants peuvent être établis à l'intérieur d'un tuyau. Ces deux types de courants sont :

- 1) **Régime d'écoulement laminaire** où la perte de charge est proportionnelle à la vitesse du courant.
- 2) **Régime d'écoulement turbulent** où la perte de charge est proportionnelle au carré de la vitesse.



En général, on peut différencier ces deux types de flux par la façon dont le fluide se déplace à travers la conduite. L'écoulement laminaire d'un fluide visqueux dans une conduite rectiligne s'effectue de telle façon que les lignes de courant glissent les unes sur les autres tout en restant parallèles. La contrainte de cisaillement visqueux agissant le long de la surface interne de la conduite définit le profil de vitesse  $u(r)$  qui se trouve être une fonction parabolique de la distance radiale à partir du centre du tube. On peut montrer que :

$$u(r) = u_{max} \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right)$$

**Question :** comment la vitesse moyenne  $u$  pour un écoulement laminaire peut être calculée avec l'équation ci-dessus ?

En revanche, l'écoulement turbulent est un régime caractérisé par des changements de propriété chaotiques. Par exemple, la variation rapide de la pression et de la vitesse dans l'espace et le temps. Décrire précisément l'écoulement turbulent est un problème difficile. On peut cependant utiliser de nombreux profils de vitesse empiriques qui existent pour les cas d'écoulement turbulent. Parmi ceux-ci, le plus simple, le plus connu et le meilleur est celui de la vitesse en loi de puissance. Ce profil est exprimé comme suit :

$$u(r) = u_{max} \left( 1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Où l'exposant  $n$  est une constante dont la valeur dépend de la vitesse d'écoulement. La valeur

de  $n$  augmente avec le taux croissant. La valeur de  $n$  est comprise entre 5-7 et se rapproche généralement de nombreux flux dans la pratique, en donnant naissance au terme d'un septième profil de vitesse en loi de puissance.

On peut caractériser les différents courants indépendamment de la taille et du type de tuyau, par un paramètre sans dimensions, le nombre de Reynolds :

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

Où  $\rho$  est la masse volumique du fluide [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $u$  est la vitesse moyenne du fluide [ $\text{m}/\text{s}$ ],  $\mu$  est la viscosité dynamique [ $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ] et  $D$  est le diamètre du tuyau [m].

Le nombre de Reynolds peut aussi être exprimé avec la viscosité cinématique,  $\nu = \mu/\rho$ .

$$Re = \frac{uD}{\nu}$$

Le nombre de Reynolds varie ainsi en fonction de la vitesse du fluide et du diamètre interne du tuyau et est inversement proportionnel à la viscosité cinématique. Il représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses.

Le tableau suivant indique des valeurs de la viscosité cinématique de l'eau en fonction de la température :

Température ( $^{\circ}\text{C}$ )	Viscosité cinématique ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). $10^{-6}$
10	1.308
20	1.007
30	0.804
40	0.661
50	0.556

Le débit dans deux tuyaux géométriquement identiques obéit aux mêmes lois si les nombres de Reynolds sont égaux. Par exemple, un écoulement laminaire est caractérisé par un  $Re < 2000$  et un écoulement turbulent domine à partir de  $Re > 3500$ . La similitude s'étend à la rugosité interne du tuyau, qui joue un rôle important.

Dans le cas d'un écoulement laminaire, le coefficient de frottement selon Fanning est inversement proportionnel au nombre de Reynolds, selon la relation suivante :

$$f_f = \frac{16}{Re}$$

Cette relation ne dépend pas de la rugosité interne du tube. Cependant, en régime turbulent, la situation se complique. Dans ce cas, la relation entre le coefficient de frottement selon Fanning et le nombre de Reynolds est décrite par l'équation de Colebrook :

$$\frac{1}{\sqrt{f_f}} = -4 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{1.255}{Re\sqrt{f_f}} \right), \text{ pour } Re > 4000$$

Où  $\varepsilon$  est la profondeur de rugosité [m]. A noter que beaucoup d'autres relations plus complexes ont été développées avec différents niveaux de précision.

## 2.2 Les pertes dans les éléments de tuyauterie divers

En plus de la perte de charge due aux frottements, il y a d'autres types de pertes qui surviennent à des points singuliers (par exemple les vannes, coudes et élargissements brusques) et sont dues au phénomène de turbulence. La perte de charge totale correspond alors à la somme de ces pertes de charges accidentnelles (ou localisées) et des pertes de charges dues aux frottements.

Sauf dans des cas exceptionnels, les pertes de charges localisées peuvent être déterminées de manière expérimentale. Dû au fait qu'elles sont générées par la dissipation d'énergie en raison de turbulences, elles peuvent être exprimées au moyen d'un coefficient ( $K$ ) :

$$\Delta P_f = K_i \frac{\rho u^2}{2}$$

$K$  est le coefficient empirique (sans dimension) et  $u$  est la vitesse de l'écoulement [m/s]. Si de nombreux éléments de perturbation sont inclus dans le tube, la perte de charge totale peut être trouvée avec :

$$\Delta P_{f,total} = 4f_f \rho \frac{L_{total}}{D} \frac{u^2}{2} + \sum_i K_i \frac{\rho u^2}{2}$$

Dans le cas où  $u$  est constant, on a alors :

$$\Delta P_{f,total} = \left( 4f_f \frac{L_{total}}{D} + \sum_i K_i \right) \frac{\rho u^2}{2}$$

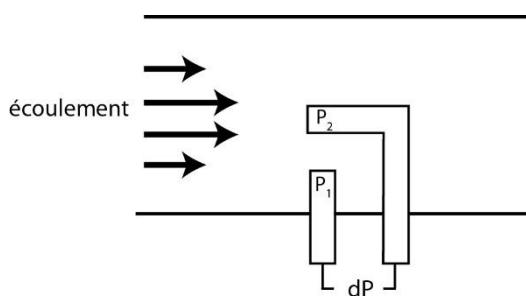
La différence de pression entre les deux extrémités d'un système de fluide est alors donnée par :

$$P_2 - P_1 = -\Delta P_{f,total} - \rho g (h_2 - h_1)$$

Où  $h_i$  est la hauteur au point  $i$ .

## 2.3 Mesurer le débit avec perte de charge

La diminution de la pression due à la friction est certes une perte pour le système, mais elle peut aussi être utilisée pour réellement mesurer le débit. En fait, le débitmètre utilisé dans ce TP fonctionne en utilisant un transducteur mécanique qui convertit une différence de pression en un signal électrique. Le signal électrique est calibré pour l'écoulement de l'eau et le débit d'écoulement est alors calculé par un programme informatique. Il existe de nombreuses méthodes pour mesurer le flux, l'une d'entre elles est le tube de Pitot (peut-être que vous en avez déjà entendu parler lors d'une tragédie aérienne plus ou moins récente).



Un tube de Pitot-statique est constitué de deux tubes. Le tube extérieur s'ouvre perpendiculairement à l'écoulement du fluide. La pression dans ce tube ( $P_1$ ) est donc égale à la pression ambiante (ou pression statique). Le tube intérieur est parallèle à l'écoulement du fluide et est ouvert en son bout, face au flux. Le flux du fluide entre dans l'ouverture au point 2, la pression monte, puis reste stationnaire à un point appelé point de stagnation. La différence entre la pression de stagnation en ce point 2 (ou pression dynamique) et la pression statique représente l'augmentation de la pression associée à la décélération du fluide. Un manomètre mesure cette hausse légère de pression. Si le fluide est incompressible, on peut écrire l'équation de Bernoulli entre le point 1 (où la vitesse  $u_1$  n'est pas perturbé, juste avant que le fluide décélère), et le point 2 (où la vitesse  $u_2$  du fluide est égale à zéro).

$$\frac{u_1^2}{2} - \frac{u_2^2}{2} + \frac{P_2 - P_1}{\rho} = 0$$

On définit  $u_2 = 0$  et résoudre pour  $u_1$ .

$$u = C_p \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho}}$$

Où  $C_p$  est un coefficient adimensionnel qui prend en compte les écarts de l'équation de Bernoulli et varie généralement entre 0,98 et 1,00. Pour une utilisation précise, le coefficient doit être déterminé par étalonnage du tube de Pitot.

### 3. Exercices Pratiques de Laboratoire

#### 3.1 Objectifs

*Déterminer l'évolution du coefficient de friction selon Fanning en fonction du nombre de Reynolds sur les longs tuyaux (à montrer par un graphique). Déterminer dans quelles conditions l'écoulement est laminaire ou turbulent.*

*Estimer la rugosité des tuyaux rugueux en utilisant la relation empirique donnée ci-dessus.*

*Déterminer le coefficient  $K_i$  pour un joint-coude de 90 ° et un élément de plus (donné par l'instructeur). Comparer la valeur de  $K_i$  avec le joint-coude de 90 °.*

*Déterminer le coefficient  $C_p$  pour le tube de Pitot.*

### **3.2 Montage expérimental**



La mise en place est constituée de l'ensemble des tubes, des vannes et des joints ci-dessus.

**BONUS :** Exécuter un ensemble d'expériences sur l'équipement de visualisation de flux « Reynolds » pour voir la différence entre flux laminaire et turbulent (demandez à l'assistant pour une démonstration)

### **3.3 Rapport et les autres questions à examiner**

Votre rapport doit inclure des données et des graphiques pour satisfaire les objectifs énumérés ci-dessus (voir 3.1). En outre, s'il vous plaît discuter des points suivants.

*Les services industriels de Viège trouvent que leur chute de pression avec leur eau industrielle à 10 ° C est 6.39 Pa par mètre de tuyau droit ( $D = 0,1 \text{ m}$ ) lorsque le nombre de Reynolds  $Re = 10000$ . Estimer la rugosité du tube.*

*Quel est le changement dans la perte de charge lorsque l'eau est chauffée à 50 ° C ?*

*BONUS : À quelle valeur de le Re (approximativement) trouvez-vous que le flux passer de laminaire à turbulent?*

**Attention !** : Il faut préparer le TP avant d'arriver ! C'est-à-dire qu'il faut bien comprendre les concepts scientifiques et pratiques, avoir un plan pour votre rapport, et les équations déjà comprises.