

# Mécanique des Fluides

Auteur : Nouredine AZZAM

Université Frères Mentouri – Constantine 1

Département de Génie des Transports

© 2025 Nouredine AZZAM – Licence CC BY 4.0

v1.0 14 juillet 2025





# Table des matières

<b>I - DYNAMIQUE DES FLUIDES REELS INCOMPRESSIBLES</b>	<b>4</b>
1. Type d'écoulements d'un fluide .....	4
1.1. Écoulements uniforme ou non-uniforme .....	4
1.2. Écoulement rotationnel ou irrotationnel .....	4
1.3. Écoulement uni, bi ou tridimensionnel .....	5
2. Expérience de Reynolds .....	5
2.1. Nombre de Reynolds .....	7
3. Régime d'écoulement .....	7
3.1. L'écoulement laminaire .....	8
3.2. L'écoulement turbulent .....	8
4. Pertes de charges .....	9
4.1. Pertes de charges linéaires .....	9
4.2. Pertes de charges singulières .....	13
5. Théorème de Bernoulli appliqué à un fluide réel .....	15
<b>Mentions légales</b>	<b>16</b>

# I DYNAMIQUE DES FLUIDES REELS INCOMPRESSIBLES

## 1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons traité la dynamique des fluides parfaits incompressibles, sans prendre en considération l'effet de la viscosité et la compressibilité. Ce chapitre comprend l'étude de la dynamique des fluides réels (visqueux) incompressibles. Dans ce cas, les forces dues à la compressibilité sont nulles, mais les forces dues à la viscosité d'un fluide sont considérées. Ces forces de frottement agissant entre les particules de fluide et les parois, ainsi qu'entre les particules de fluide elles-mêmes. La présence de ces forces entraîne une dissipation d'énergie, car d'une partie de l'énergie totale du fluide va se transformer en énergie thermique due au frottement.

## 2. Type d'écoulements d'un fluide

L'écoulement d'un fluide est défini comme le mouvement des fluides. Dans la mécanique des fluides, il existe plusieurs types d'écoulement tels que : Écoulement permanent ou non-permanent, Écoulement laminaire ou turbulent, Écoulement uniforme ou non-uniforme, Écoulement rotationnel ou irrotationnel, et Écoulement uni, bi, ou tridimensionnel.

### 2.1. Écoulements uniforme ou non-uniforme

Dans un écoulement uniforme, toutes les caractéristiques et propriétés (vitesse, pression, la masse volumique, ...) de l'écoulement ne varient pas d'un point à un autre sur une section donnée. C'est-à-dire pas de déformation et pas de rotation d'écoulement. À titre d'exemple, la vitesse,  $U$ , ne dépend pas de la position,  $s$ . Mathématiquement, nous avons :

$$\frac{\partial U}{\partial s} = 0$$

Où :

$\partial U$  : la variation de vitesse,

$\partial s$  : la variation de la distance dans la direction  $s$ .

Par contre, un écoulement non-uniforme toutes les caractéristiques et propriétés (vitesse, pression, la masse volumique, ...) de l'écoulement changent d'un point à un autre sur une section donnée. Par exemple, la vitesse,  $U$ , dépend de la position,  $s$ . Mathématiquement, nous avons :

$$\frac{\partial U}{\partial s} \neq 0$$

### 2.2. Écoulement rotationnel ou irrotationnel

Dans un écoulement rotationnel les particules de fluide s'écoulent le long des lignes de courant et tournent autour de leur propre axe. Par exemple, la vitesse,  $U$ , dans un écoulement rotationnel est donnée par la relation suivante :

$$\vec{Rot} \vec{U} = 0$$

Par contre, un écoulement irrotationnel les particules de fluide s'écoulent le long des lignes de courant, sans rotation. L'écoulement d'un fluide parfait est toujours irrotationnel. À titre d'exemple, la vitesse,  $U$ , dans un écoulement irrotationnel est donnée par la relation suivante :

$$\vec{Rot} \vec{U} \neq 0$$

## 2.3. Écoulement uni, bi ou tridimensionnel

Lorsqu'un écoulement est unidimensionnel toutes les caractéristiques et propriétés (vitesse, pression, la masse volumique, ...) de l'écoulement dépends du temps et une seule direction. Par exemple, la vitesse  $U$  est en fonction du temps,  $t$ , et une seule variable  $x$ .

$$U_x = f(x,t), U_y = 0, U_z = 0,$$

Par contre, si l'écoulement bidimensionnel toutes les caractéristiques et propriétés (vitesse, pression, la masse volumique, ...) de l'écoulement dépends du temps et deux directions. Par exemple, la vitesse  $U$  est en fonction du temps,  $t$ , et les deux variables  $x$  et  $y$ .

$$U_x = f_1(x,y,t), U_y = f_2(x,y,t), U_z = 0$$

D'autre part, dans l'écoulement tridimensionnel, toutes les caractéristiques et propriétés (vitesse, pression, la masse volumique, ...) de l'écoulement dépends du temps, et trois directions (dans l'espace). Par exemple, la vitesse  $U$  est en fonction du temps  $t$ , et les trois variables  $x$ ,  $y$  et  $z$ .

$$U_x = f_1(x,y,z,t), U_y = f_2(x,y,z,t), U_z = f_3(x,y,z,t)$$

## 3. Expérience de Reynolds

Osborne Reynolds (1883) a été le premier à démontrer qu'il existe deux types d'écoulements de fluides laminaire et turbulent à travers une expérience simple. L'expérience classique de Reynolds est présentée dans la figure IV.1. L'appareil de Reynolds est composé de trois composantes essentielles :

- Un réservoir rempli de l'eau,
- Un récipient rempli de colorant,
- Un tube transparent mince, avec une vanne à la sortie du tube pour contrôler le débit de l'eau.

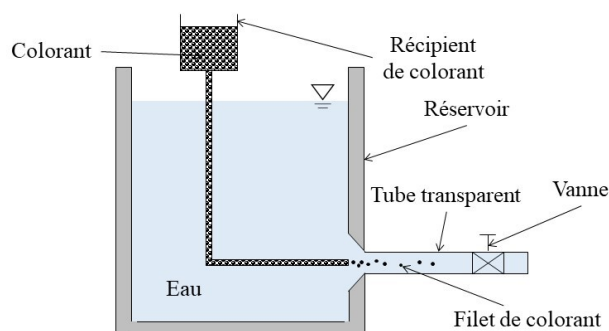


Image 1 Figure IV. 1. Expérience de Reynolds

Lorsque la vanne est ouverte, l'eau dans le réservoir peut circuler dans le tube transparent. La vitesse d'écoulement est modifiée par la vanne. Une très petite quantité de colorant liquide ayant le même poids spécifique que l'eau est injectée dans le tube comme le montre la figure IV.1.

Les observations de Reynolds sont :

1. Lorsque la vitesse d'écoulement est faible, le filet de colorant dans le tube se présente sous la forme d'une ligne droite sans dispersion. Cette ligne droite de filet de colorant est régulier et parallèle à la paroi de tube transparent, dans ce cas, l'écoulement est laminaire voir la figure IV.2(a).
2. Avec l'augmentation de débit (donc la vitesse), le filet de colorant n'est plus une ligne droite, mais il devient ondulé comme le montre la figure IV.2(b).
3. Avec une augmentation supplémentaire du débit, le filet de colorant ondulé s'est mélangé dans toutes les directions et l'eau s'est vu complètement coloré à la fin du tube (Voir la figure IV.2(c)).

Dans ce cas, les particules fluides du colorant se déplacent de manière aléatoire, ce qui montre le cas de l'écoulement turbulent.

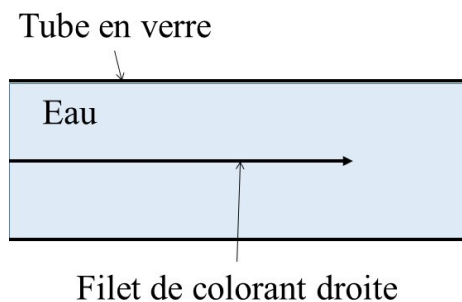


Image 2 Figure IV. 2. Types d'écoulements dans une conduite, (a) Laminaire

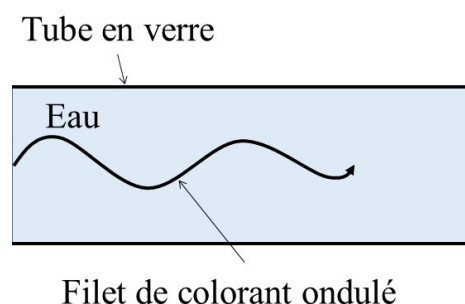


Image 3 Figure IV. 2. Types d'écoulements dans une conduite, (b) Transitoire

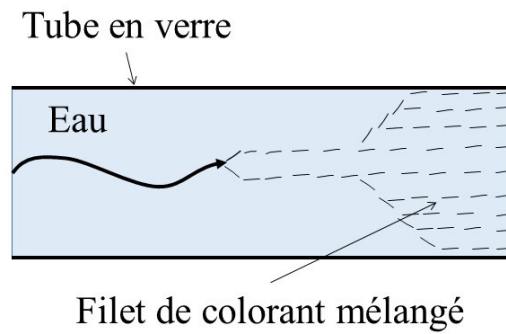


Image 4 Figure IV. 2. Types d'écoulements dans une conduite, (c) Turbulent

### 3.1. Nombre de Reynolds

Après l'expérience de Reynolds, d'autres études ont montré que le régime d'écoulement dans les conduites circulaire ne dépend pas uniquement de la vitesse de fluide, mais aussi de la viscosité, de la masse volumique du fluide et du diamètre inférieur de la conduite. Ces variables ont été regroupées pour former une quantité appelée nombre de Reynolds. Le nombre de Reynolds est une quantité sans dimension (pas d'unité), noté  $Re$ . Il est défini dans le cas d'une conduite circulaire par la relation suivante :

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} = \frac{U \cdot D}{\nu}$$

Formule 1

Où :

$\rho$  : la masse volumique de fluide en  $\text{kg/m}^3$ ,

$U$  : la vitesse moyenne de l'écoulement à travers la section en  $\text{m/s}$ ,

$D$  : le diamètre de la conduite en  $\text{m}$ ,

$\mu$  : la viscosité dynamique de fluide en  $\text{kg/m.s}$ ,

$\nu$  : la viscosité cinématique de fluide en  $\text{m}^2/\text{s}$ .

## 4. Régime d'écoulement

Le régime d'écoulement d'un fluide est divisé en deux types d'écoulements en fonction du nombre de Reynolds  $Re$ , tel que :

- Si le nombre de  $Re$  est faible  $< 2000$  : l'écoulement est appelé laminaire,
- Si le nombre de  $Re$  entre 2000 et 4000 : l'écoulement transitoire peut être laminaire ou turbulent,
- Si le nombre de  $Re$  est grand  $> 4000$ , on parle d'écoulement turbulent.

## 4.1. L'écoulement laminaire

### **Q** Définition :

L'écoulement laminaire est défini comme le type d'écoulement dans lequel les particules de fluide se déplacent à travers des lignes de courant droites et parallèles. Ainsi, les couches de fluide s'écoulent en parallèle les unes aux autres sans se mélanger. D'autre part, les échanges d'énergie entre les couches de fluides sont réduits. L'écoulement laminaire peut être obtenu en cas de faibles vitesses et aussi lorsque le fluide est très visqueux.

Dans une conduite circulaire de diamètre constant, le mouvement des particules fluide est ordonné suivant des lignes droites parallèles aux parois de la conduite voir la figure IV.3. Ainsi, le profil de la distribution des vitesses est de forme parabolique.

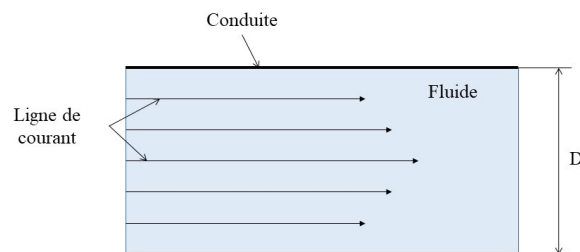


Image 2 Figure IV. 3. Écoulement laminaire dans une conduite circulaire

## 4.2. L'écoulement turbulent

### **Q** Définition :

L'écoulement turbulent est ce type d'écoulement dans lequel les particules de fluide se déplacent d'une manière aléatoire (irrégulière) (Voir figure IV.4). En raison du mouvement aléatoire des particules de fluide, il se produit des tourbillons qui sont responsables d'une perte d'énergie cinétique importante.

Dans le cas, d'une conduite circulaire de diamètre constant, le mouvement des particules fluide est aléatoire dans la conduite voir la figure IV.4. Ainsi, dans ce type d'écoulement, le profil de la distribution des vitesses est quasi uniforme.

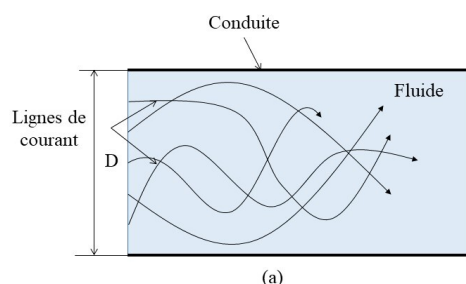


Image 3 Figure IV. 4. Écoulement turbulent dans une conduite circulaire



## 5. Pertes de charges

Lorsqu'un fluide réel s'écoule dans une conduite, un canal ou d'autre voie, le fluide subit une certaine résistance qui crée une perte de partie d'énergie du fluide. Cette perte d'énergie (ou de charge)  $\Delta H_T$  peut être classée en deux types :

- Les pertes de charges linéaires  $\Delta H_L$ ,
- Les pertes de charges singulières  $\Delta H_s$ .

$$\Delta H_T = \sum \Delta H_L + \Delta H_s$$

Formule 2

### 5.1. Pertes de charges linéaires

La perte de charge (ou d'énergie) linéaire  $\Delta H_L$  (régulière) qui est observée sur toute la longueur, est proportionnelle à la longueur de la conduite. Elle est engendrée par les forces de frottement entre les molécules et la paroi de la conduite et entre les molécules elles-mêmes voir la figure IV.5. Cette perte de charge est importante dans les conduites longues par rapport à la perte de charge singulière.

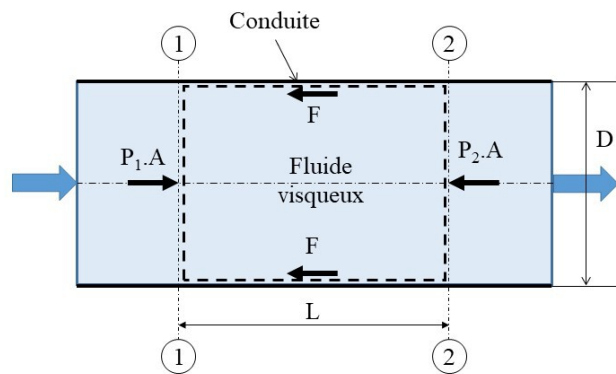


Figure IV. 5. Conduite circulaire horizontale uniforme

Considérons un fluide réel incompressible s'écoule à travers une conduite circulaire droite. Soit 1-1 et 2-2 deux sections droites dans la conduite comme indiqué sur la figure IV.5. L'équation de Bernoulli, entre les deux sections d'une même ligne de courant pour un régime d'écoulement permanent est donnée comme suite :

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{U_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{U_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + \Delta H_L$$

Formule 3

Où :

$\Delta H_L$  : les pertes de charges linéaires dans la conduite.

**Conseil :**

Comme la conduite est horizontale et uniforme (section constante), on a  $z_1 = z_2$ , et  $A_1 = A_2 = A$ . Ainsi, le débit est constant dans la conduite, on a  $U_1 = U_2 = U$ . l'équation (IV-3) devient :

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \Delta H_L \Rightarrow \Delta H_L = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g}$$

Formule 4

**+ Complément :**

D'autre part, les forces agissant sur le fluide dans la conduite entre les deux sections 1-1 et 2-2 sont :

1. Force de pression de fluide dans le sens de l'écoulement à la section 1-1 est  $P_1 \cdot A_1 = P_1 \cdot A$ ,
2. Force de pression de fluide opposée à la direction de l'écoulement à la section 2-2 est  $P_2 \cdot A_2 = P_2 \cdot A$ ,
3. Force de frottement entre le fluide et la paroi de la conduite :  $F = f' \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot U^2$ .

Le bilan des forces entre les deux sections 1-1 et 2-2 suivant l'axe de la conduite est :

$$P_1 \cdot A - P_2 \cdot A - F = 0$$

$$(P_1 - P_2) \cdot A = F = f' \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot U^2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{f' \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot U^2}{A}$$

En remplaçant l'équation précédente dans l'équation (IV-4), on obtient :

$$\Delta H_L = \frac{f' \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot U^2}{\rho \cdot g \cdot A}$$

Ainsi, en remplaçant la section de la conduite par  $A = \pi D^2/4$ , on trouve :

$$\Delta H_L = \frac{4 \cdot f' \cdot L \cdot U^2}{\rho \cdot g \cdot D}$$

Formule 5

En mettant  $(f'/\rho) = (f/2)$ , où  $f$  est le coefficient de frottement, l'équation (IV-5), devient :

$$\Delta H_L = \frac{4 \cdot f \cdot L \cdot U^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

L'équation (IV-6) est appelée équation de Darcy<sup>1</sup>-Weisbach<sup>2</sup>. Cette équation est couramment utilisée pour calculer la perte de charge linéaire liée au frottement dans les conduites circulaires droites. En mettant  $\lambda = 4 \cdot f$  l'équation (IV-6), devient :

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

Formule 6

Où :

$L$  : la longueur de conduite en m,

$\lambda$  : le coefficient de perte de charge linéaire ou coefficient de Darcy-Weisbach sans unité.

1. file:///E:/Cours%20GT/MDF/Cours/Polycopi%C3%A9%20MDF%20%C3%A9tudiant%20chapitre%204.docx#\_ftn1  
 2. file:///E:/Cours%20GT/MDF/Cours/Polycopi%C3%A9%20MDF%20%C3%A9tudiant%20chapitre%204.docx#\_ftn2

### a) Coefficient de perte de charge linéaire

Le coefficient de perte de charge linéaire dépend du régime d'écoulement et en particulier du nombre de Reynolds  $Re$  :

- Si l'écoulement d'un fluide est laminaire la solution théorique (ou exacte) de coefficient de perte de charge linéaire  $\lambda$ , est définie par la relation de Poiseuille suivante :

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

Formule 7

- Si l'écoulement d'un fluide est turbulent, il n'existe pas une relation exacte entre le coefficient de perte de charge linéaire  $\lambda$ , et le nombre de Reynolds  $Re$ . D'autre part, les formules expérimentales le plus utilisées pour trouve le coefficient  $\lambda$ , sont :

1. Formule proposée par Von Karman<sup>3</sup> (parois lisses voir la figure IV.6) :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2. \log\left(\frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}}\right)$$

Formule 8

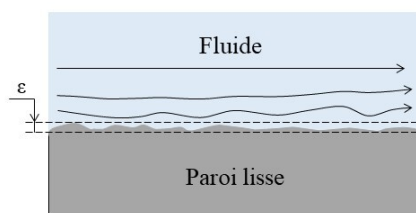


Image 4 Figure IV. 6. Écoulement dans une paroi lisse

2. Formule proposée par Nikuradse<sup>4</sup>(parois rugueuses voir la figure IV.7) :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2. \log\left(\frac{\varepsilon}{3.7.D}\right)$$

Formule 9

Où :

$\varepsilon$  : la rugosité absolue équivalente de la paroi en mm,

$D$  : le diamètre de la conduite en mm.

<sup>3</sup>. file:///E:/Cours%20GT/MDF/Cours/Polycopi%C3%A9%20MDF%20%C3%A9tudiant%20chapitre%204.docx#\_ftn1

<sup>4</sup>. file:///E:/Cours%20GT/MDF/Cours/Polycopi%C3%A9%20MDF%20%C3%A9tudiant%20chapitre%204.docx#\_ftn1

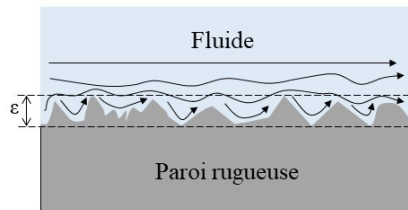


Image 2 Figure IV. 7. Écoulement dans une paroi rugueuse

3. Formule proposée par Colebrook<sup>5</sup> (parois lisses et rugueuses) :

$$\frac{1}{\sqrt{(\lambda)}} = -2. \log\left(\frac{\varepsilon}{3,7.D} + \frac{2,51}{Re.\sqrt{(\lambda)}}\right)$$

Formule 10

Où :

$\varepsilon$  : la rugosité absolue équivalente de la paroi en mm,

D : le diamètre de la conduite en mm.

### Exemple :

Le tableau IV.1 montre les valeurs de rugosités équivalentes pour quelques types de conduites couramment utilisées :

Matériaux des conduites	Valeurs de la rugosité absolue équivalente $\varepsilon$ en (mm)
Verre, Plastique (lisse)	0,0
Béton	0,3 à 3,0
Cuivre	0,0015
Fonte	0,26
Acier inoxydable	0,002
Acier commercial standard	0,045

Tableau 1 Tableau IV. 1. Valeurs de rugosité équivalentes de quelques types de conduites

Les équations (IV-9) et (IV-11) sont des équations non-linéaires qui peuvent être résolues numériquement par des méthodes itératives comme le point fixe :

$$\frac{1}{\sqrt{(\lambda_{i+1})}} = -2. \log\left(\frac{\varepsilon}{3,7.D} + \frac{2,51}{Re.\sqrt{(\lambda_i)}}\right)$$

On arrête les calculs dès que les valeurs des  $\lambda_i$  et  $\lambda_{i+1}$  sont très proches.

## b) Diagramme de Moody-Stanton

Le diagramme de Moody[1]<sup>6</sup>-Stanton représente le coefficient de perte de charge linéaire de Darcy-Weisbach,  $\lambda$ , des conduites en fonction du nombre de Reynolds et la rugosité relative ( $\epsilon/D$ ) (voir la figure IV.8). Il permet de calculer le coefficient de perte de charge linéaire dans une conduite circulaire. Le diagramme de Moody montre que :

1. Si l'écoulement est laminaire :
  - a) Le coefficient  $\lambda$ , est indépendant de  $\epsilon/D$  de la paroi voir l'équation (IV-8)
  - b) Le coefficient  $\lambda$ , est diminué avec l'augmentation du nombre de Reynolds.
2. Si l'écoulement est turbulent et la paroi est lisse :
  - a) La rugosité relative de la paroi est zéro ( $\epsilon/D = 0$ ),
  - b) Le coefficient  $\lambda$ , est faible, mais n'est pas nul (il existe toujours des pertes de charge).
3. Si le nombre de Reynolds est très grand :
  - a) Le coefficient  $\lambda$ , est indépendant du nombre de Reynolds voir l'équation (IV-10).
  - b) Le régime est appelé écoulement complètement turbulent.

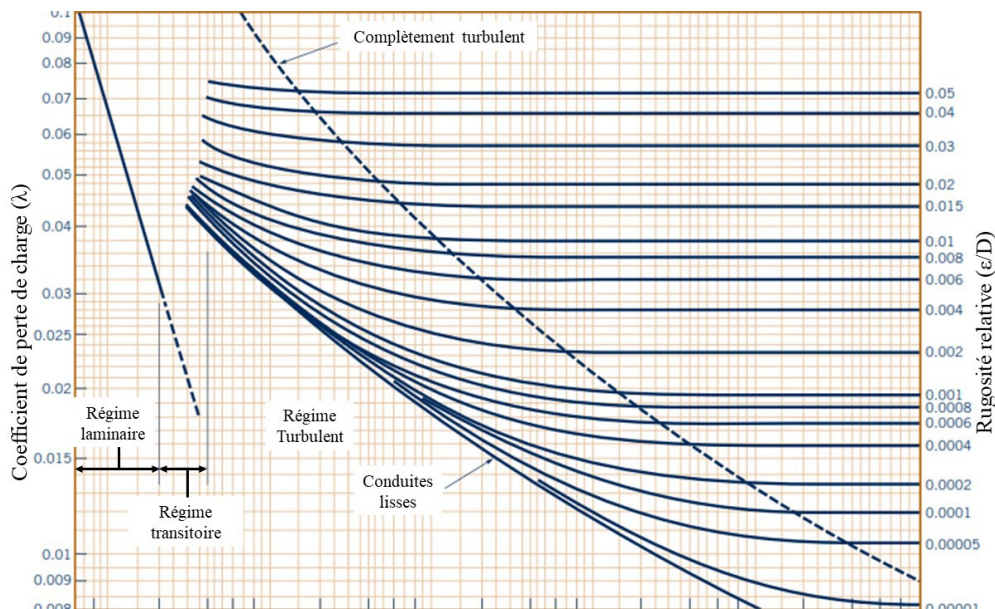


Image 5 Figure IV. 8. Diagramme de Moody-Stanton

## 5.2. Pertes de charges singulières

La perte de charge (ou l'énergie) singulière  $\Delta H_s$  qui est due aux différents éléments de construction et aux obstacles locaux dans les conduites. Elle est engendrée par le changement de la direction ou de la valeur de vitesse du fluide et lorsque des dispositifs (codes, vannes, ...) sont disposés sur la trajectoire d'écoulement. Cette perte de charge comprend plusieurs cas tels que : Élargissement ou rétrécissement brusque de conduite, Entrée ou sortie dans un réservoir, Coude, Branchement, dérivation, Diffuseur ou confuseur conique, Robinet, Vanne, Crépine, ...

Les pertes de charges singulières sont calculées par la relation suivante :

$$\Delta H_s = k \cdot \frac{U^2}{2g}$$

Formule 11

<sup>6</sup> file:///E:/Cours%20GT/MDF/Cours/Polycopi%C3%A9%20MDF%20%C3%A9tudiant%20chapitre%204.docx#\_ftn1

Où :

$k$  : le coefficient de perte de charge singulière, sa valeur de  $k$  est variable en fonction du type de singularité.

### a) Exemple d'élargissement brusque

On considère un fluide s'écoule à travers une conduite qui a un élargissement brusque. Deux sections dans la conduite (1-1) et (2-2) situées avant et après l'élargissement respectivement comme le montre la figure IV.9.

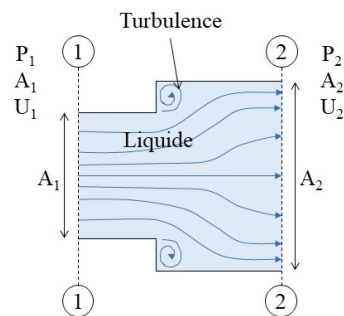


Image 6 Figure IV. 9. Élargissement brusque dans une conduite circulaire

Selon [ (1)] le coefficient de perte de charge singulière d'un élargissement brusque dans une conduite circulaire est calculé par :

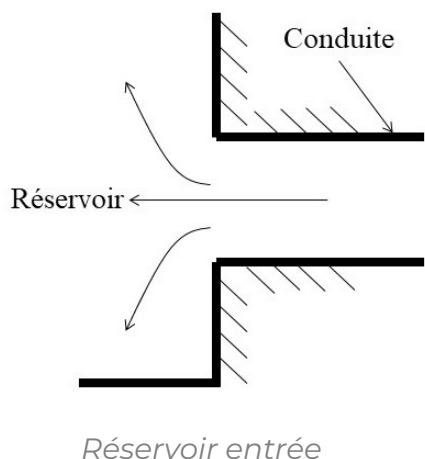
$$\Delta H_s = \frac{(U_1^2 - U_2^2)}{2g} = \frac{U_1^2}{2g} \cdot \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 = k \cdot \frac{U_1^2}{2g}$$

$$k = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$$

### b) Quelques valeurs de coefficient de pertes de charges singulières

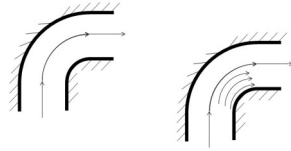
#### Exemple :

Le tableau IV.2 présente quelques valeurs de coefficient de perte de charge singulière,  $k$  pour des dispositifs et des géométries couramment utilisés.



Entrée brusque dans une conduite qui relié à un grand réservoir :

$$k = 0.5$$



Code arrondi

$$k = 0.75$$

code

## 6. Théorème de Bernoulli appliqué à un fluide réel

Dans le cas d'un fluide réel dans une conduite circulaire, il y a donc toujours des pertes d'énergie importantes qui sont liées aux frottements. En supposant que la conduite est équipée de machine hydraulique (pompe hydraulique et/ou turbine hydraulique). L'équation de Bernoulli généralisée pour les fluides réels incompressibles en régime permanent, avec/ou sans échange de travail, entre deux points (1) et (2) d'une même ligne de courant est donnée par la relation suivante :

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{U_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + h_p = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{U_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + h_T + \Delta H_T$$

Formule 12

Où :

$\Delta H_T$  : les pertes de charges totales entre les deux points (1) et (2).

# Mentions légales

Ce module est publié sous licence **Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)**

Vous êtes autorisé à copier, distribuer, modifier et utiliser ce contenu à condition d'en attribuer la paternité à l'auteur : **Noureddine AZZAM – Université Frères Mentouri Constantine 1.**