Chapitre 5 Pertes de charges

5.1 Définition

On appelle « perte de charge », la différence de pression de l'eau entre l'entrée et la sortie de l'établissement de tuyaux.

Le symbole de la perte de charge est J

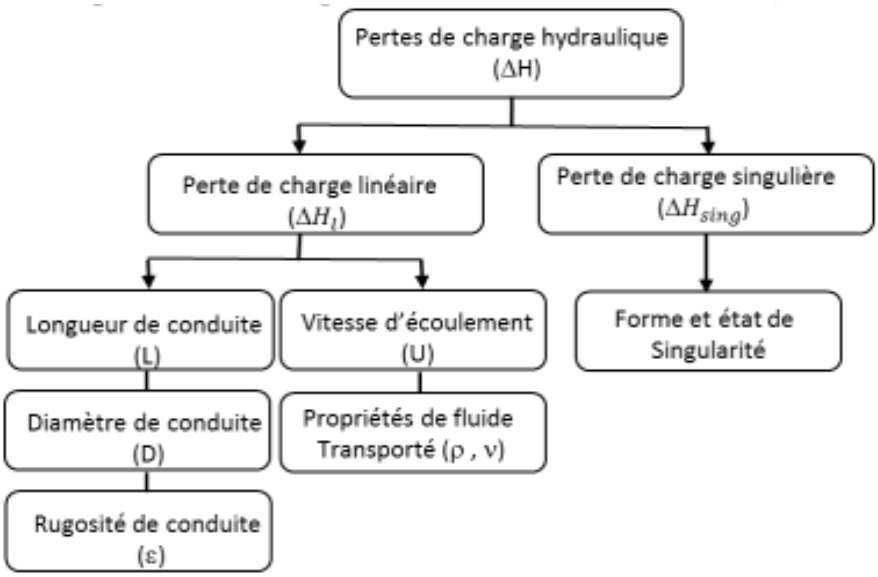
Les pertes de charge par frottement sont produites dans la section transversale par l'interaction entre les volumes élémentaires de fluide en déplacement et les parois internes de son contenant (ex. conduite, accessoire, compteurs …). De façon générale, les pertes d'énergie sont causées par : - Frottement contre les surfaces internes, - Effet de la turbulence, - Action des forces de viscosité moléculaire,

5.2 Les types de perte de charge

On distingue deux types de perte de charge :

- la perte de charge linéaire ou régulière (Δ) représentant l'énergie perdue entre les deux points. Elle est due aux frottements du fluide contre la paroi intérieure d'une conduite rectiligne de longueur L

- la perte de charge singulière ou locale ($\Delta Hsing$) qui intervient lorsque l'écoulement uniforme est localement perturbé. Elle est due aux frottements du fluide dans la singularité (Coude, vanne, variation brusque du diamètre …)



5.3 Perte de charge linéaire

Les 4 lois des pertes de charge

- 1 ère loi : Les pertes de charge sont proportionnelles à la longueur de l'établissement : Si la longueur du tuyau est doublée alors les pertes de charge sont doublées etc.
- 2ème loi : Les pertes de charge sont proportionnelles au carré du débit : pour un même tuyau, si le débit d'eau est doublé alors les pertes de charge sont quadruplée.
- 3ème loi : Les pertes de charge sont inversement proportionnelles au diamètre du tuyau : pour un même débit d'eau, si le diamètre du tuyau est doublé alors les pertes de charge sont divisée par deux et inversement.
- 4ème loi : Les pertes de charge sont fonction de la rugosité du tuyau (toile ou P.I.L (paroi interne lisse)) : Plus le tuyau est lisse, plus les pertes de charges sont faibles.

Pour un écoulement en charge et établi dans une conduite (Profil de vitesse est le même dans toutes les sections transversales). La perte de charge linéaire est proportionnelle aux frottements (contraintes de cisaillement de la paroi).

Pour estimer ce terme, on applique les trois lois de conservation d'énergie (Equation de Bernoulli), de quantité de mouvement (Equation d'Euler) et de masse (Equation de continuité).

5.3.1 Estimation des pertes de charge linéaire

Plusieurs travaux réalisés dans le cadre de modélisation du terme Δ , on peut citer les formules les plus utilisées :

1. Formule de Darcy-Weisbach
2. Formule Hazan – Williams

5.3.1.1 Formule de Darcy-Weisbach

Formule de Darcy-Weisbach La formule est : $\Delta H_l = \lambda \frac{L}{D} \frac{U^2}{2g}$

Avec : L est la longueur de la conduite [m],

D est le diamètre interne de la conduite [m],

λ est le coefficient de perte de charge linéaire[sans dimension],

U est la vitesse moyenne de l'écoulement [m/s]

et g est l'accélération de la gravité.

Soit : $\lambda = f(Re\ ,\ \epsilon\ D\ )$ avec le nombre de Reynolds ($Re = UD/(\mu/\rho\ )\ )$ et la rugosité relative ε/D de la conduite. Unité :

5.3.1.2 Formule de Hazan-Williams

Cette formule est très utilisée aux États-Unis d'Amérique (USA) et donnée par la formule suivante :

$$J = \frac{\Delta H_l}{L} = \frac{10{,}675\, Q^{1{,}852}}{C_{HW}^{1{,}852} D^{4{,}87}}$$

Avec : C_{HW} est le coefficient de rugosité de Hazan-Williams [sans dimension],

Q est le débit volumique [m3 /s] et

D est le diamètre intérieur de la conduite [m

Tableau 1 : Coefficient de rugosité de Hazan- Williams

Matériau de conduite	C_{HW}
Laiton	130-140
Égout en brique	100
En fonte	
Nouveau, sans doublure	130
10 ans, vieux	107-113
20 ans, vieux	89-100
30 ans	75-90
40 ans	64-83
Béton ou béton doublé	
Formes d'acier	140
Formes en bois	120
Centrifugé	135
Cuivre	130-140
Fer galvanisé	120
Verre	140
Conduire	130 140
Plastique	140-150
Acier	
Nouveau sans doublure	140 150
Rivé	110
Étain	130
Argile vitrifiée (bon état)	110-140
Bois (condition moyenne)	120

5.3.2 Calcul de la perte de charge linéaire

Le calcul de la perte de charge linéaire va donc prendre en compte le nombre de Reynolds et la rugosité de la conduite. Le choix se fait en fonction de la turbulence c'est-à-dire de la valeur du nombre de Reynolds.

Dans un régime d'écoulement laminaire : $Re < 2000$

$$\lambda = \frac{Re}{64} \text{ (Formule de Poiseuille)}$$

Régime turbulent en tuyau lisse: $2000 < Re < 10^5$

$$4000 < Re \text{ et } \frac{\varepsilon.Re.\sqrt{\lambda}}{D} \leq 12$$

Dans cette zone, la turbulence est encore modérée. L'épaisseur de la sous-couche limite est suffisante pour englober toutes les aspérités de la conduite qui se comporte dès lors comme un tuyau lisse.

Régime turbulent en tuyau lisse

Deux expressions empiriques sont souvent utilisées:

Formule de Blasius : $\lambda = (100Re)^{-0.25}$

Formule implicite de Von Karman : $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.\log_{10}\left[\frac{Re\sqrt{\lambda}}{2,51}\right]$

Régime turbulent en tuyau rugueux :

$\frac{\varepsilon.Re.\sqrt{\lambda}}{D} \geq 200$:

La turbulence devient très importante et λ ne dépend plus que de $\frac{k}{D} = \frac{\varepsilon}{D}$

Formule de Nikuradse :

$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.\log_{10}\left[\frac{\varepsilon}{3,72D}\right]$

Dans un régime d'écoulement turbulent rugueux : $Re > 10^5$

$$\lambda = 0.79.\sqrt{\frac{\varepsilon}{d}} \text{ (Formule de Blench)}$$

Régime turbulent en tuyau lisse, rugueux et en zone de transition

Tous les résultats de ces travaux sont résumés dans la formule de Colebrook qui s'est fortement inspiré des résultats de Von Karman et de Nikuradse.

Formule de Colebrook : $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.\log_{10}\left[\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,7D}\right]$

pour $10^8 > Re > 4000$

Cette relation implicite est difficile à exploiter analytiquement et est le plus souvent représentée sur un graphique. La résolution de l'équation nécessite l'application d'une méthode itérative

L'utilisation directe de la formule de Colebrook demanderait, du fait de sa forme implicite, un calcul par approximations:

- postuler une valeur de λ (Nikuradse);
- calculer le terme de droite ;
- en déduire une nouvelle valeur de λ à partir du terme de gauche ;
- l'intégrer dans le terme de droite, et ainsi de suite. Généralement, on obtient convergence après 3 ou 4 boucles.

La meilleure alternative à ce calcul itératif est d'utiliser directement le diagramme de Moody. Il s'agit d'un abaque de calcul direct du coefficient de perte de charge, à partir du nombre de Reynolds et de la rugosité relative de la paroi interne de la conduite.

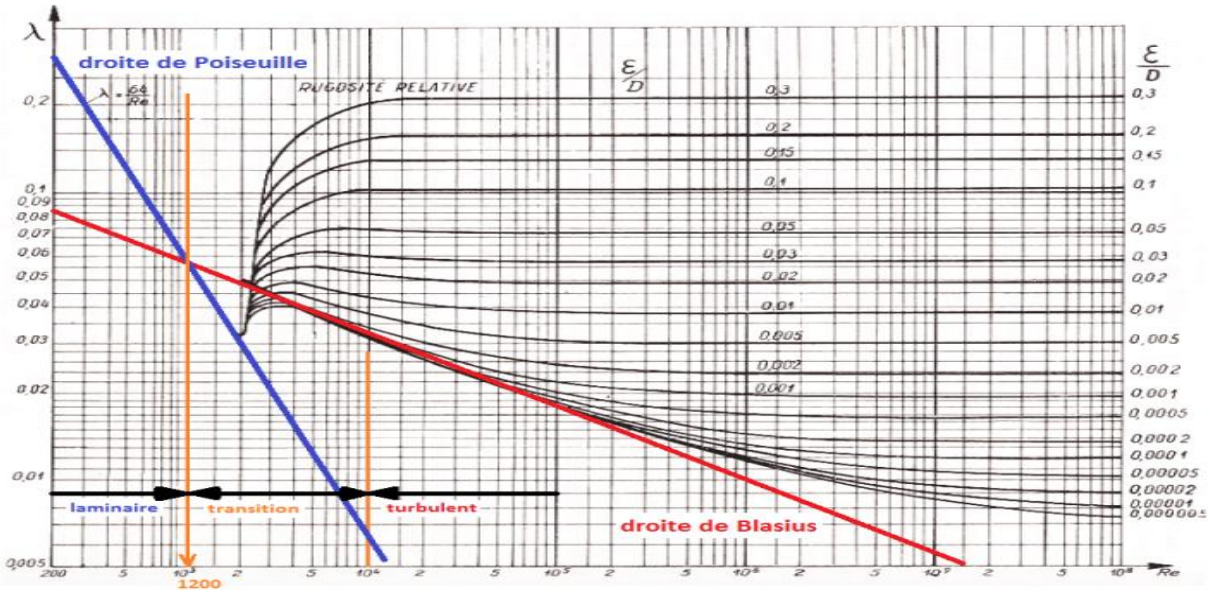
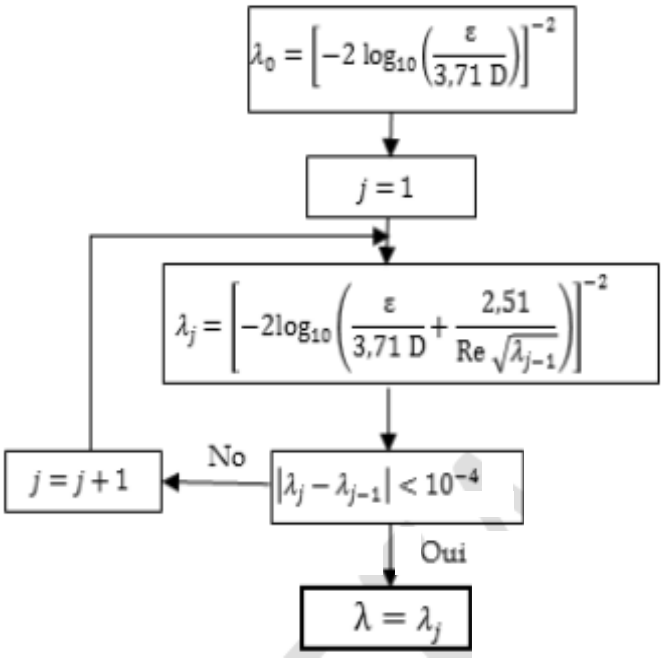


Figure1: Diagramme de Moody



Formule de Swamee-Jain (1976)

Pour ε /D < 10^{-2} et Re > 5 103

Cette formule explicite donne une solution directe et propose une bonne approximation de la valeur de λ.

$$\lambda = \frac{0{,}25}{\left[\log_{10}\left[\frac{\varepsilon}{3{,}71D} + \frac{5{,}74}{Re^{0{,}9}}\right]\right]^2}$$

5.4 Les pertes de charge singulière

La perte de charge singulière, localisée dans une section de la conduite, est provoquée par un changement de direction et d'intensité de la vitesse (voir premier chapitre).

L'écoulement uniforme est perturbé et devient localement un écoulement non uniforme.

La turbulence joue un rôle considérable, alors que les forces de viscosité sont négligeables. La perte de charge n'a donc lieu qu'en régime turbulent. Une telle non-uniformité de la vitesse peut être provoquée par :

- un branchement de section de la conduite,
- un changement de direction (coude),
- un branchement ou raccordement,
- un dispositif de mesure et contrôle de débit...

Comme pour les pertes de charge linéaire, les pertes de charges singulières se traduisent par la relation :

$$\Delta H = K \frac{V^2}{2g}$$

K est fonction des caractéristiques géométriques et du nombre de Reynolds.

La valeur de K est donnée pour les différents cas les plus classiques

Tableau 2 : Valeur de K pour les différents cas

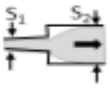
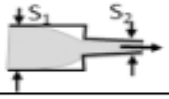
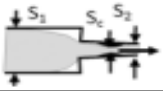
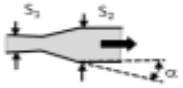
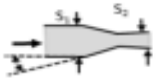
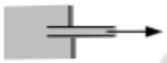
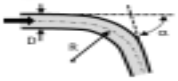
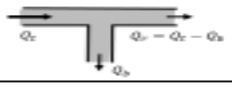
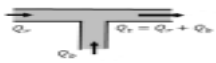
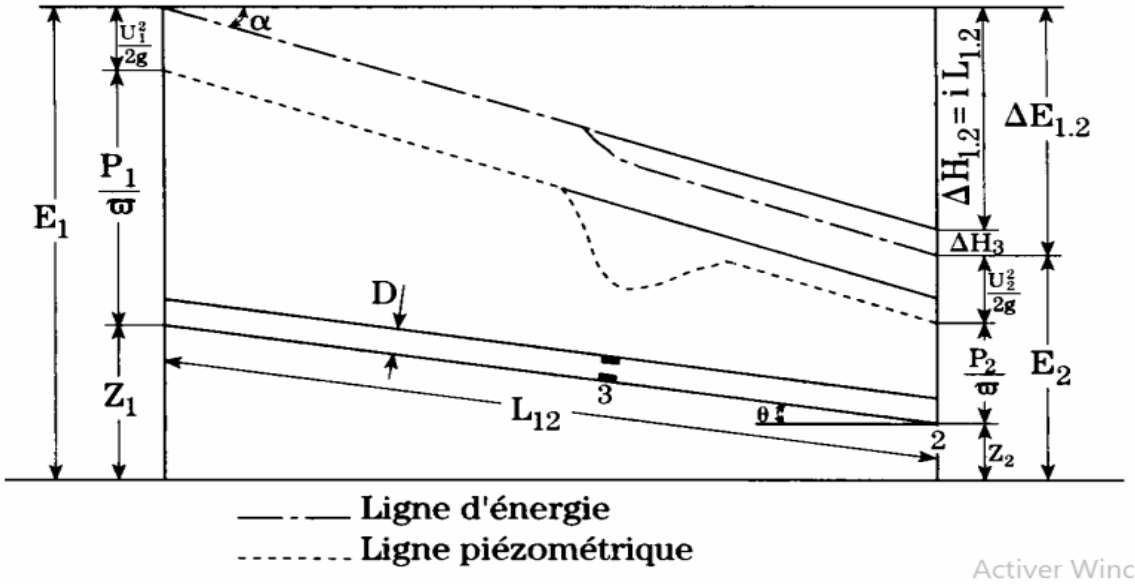
Forme	Nomination	Coefficient K_{sing}	Perte de charge singulière
	Elargissement brusque	$(\frac{S_2}{S_1} - 1)^2$	$\Delta H_{sing} = k_{sing} \frac{U_2^2}{2g}$
	Rétrécissement brusque	$0{,}5(1 - \frac{S_2}{S_1})$	$\Delta H_{sing} = k_{sing} \frac{U_2^2}{2g}$
	Rétrécissement brusque	$(\frac{S_2}{S_c} - 1)^2$	$\Delta H_{sing} = k_{sing} \frac{U_2^2}{2g}$
	Divergence	$(1 - \frac{S_1}{S_2})^2 \sin(\alpha)$	$\Delta H_{sing} = k_{sing} \frac{U_2^2}{2g}$
	Convergent	$(\frac{S_1}{S_2} - 1)^2 \sin(\alpha)$	$\Delta H_{sing} = k_{sing} \frac{U_1^2}{2g}$
	Entrée brusque	0,5	$\Delta H_{sing} = k_{sing} \frac{U_2^2}{2g}$
	Entrée brusque inclinée	$0{,}5 + 0{,}3cos(\alpha) + 0{,}2cos^2(\alpha)$	$\Delta H_{sing} = k_{sing} \frac{U_2^2}{2g}$

Tableau 2 (suite): Valeur de K pour les différents cas

Forme	Nomination	Coefficient K_{sing}	Perte de charge singulière
	Entrée brusque allongée	0,8	$\Delta H_{sing} = k_{sing} \frac{U_2^2}{2g}$
	Entrée progressive	0,04	$\Delta H_{sing} = k_{sing} \frac{U_2^2}{2g}$
	Sortie à l'air libre	1,0	$\Delta H_{sing} = k_{sing} \frac{U_2^2}{2g}$
	Arrivée vers un réservoir	1,0	$\Delta H_{sing} = k_{sing} \frac{U_1^2}{2g}$
	Coude arrondi	$\frac{\alpha}{\pi}[0{,}131 + 1{,}847 (\frac{D}{R})^{7/2}]$	$\Delta H_{sing} = k_{sing} \frac{U^2}{2g}$
	Coude brusque	$\sin^2(\alpha) + 2\ \sin^4(\frac{\alpha}{2})$	$\Delta H_{sing} = k_{sing} \frac{U^2}{2g}$
	Tés branchement de prise	K_r , K_b Voir l'annexe	$\Delta H_r = K_r \frac{U_t^2}{2g}$ $\Delta H_b = K_b \frac{U_t^2}{2g}$
	Tés branchement de dérivation	K_r , K_b Voir l'annexe	$\Delta H_r = K_r \frac{U_t^2}{2g}$ $\Delta H_b = K_b \frac{U_t^2}{2g}$

5.5 Exemple de tracé de perte de charge

Considérons une conduite de longueur $L_{1\text{-}2}$. On dispose en 3 d'un rétrécissement brusque.



Activer Winc

Figure 2 : Tracé de perte de charge