III.1. Définitions :

Les fluides sont des corps sans forme propre, qui peuvent s'écouler c'est-à-dire subir de grandes variations de forme sous l'action de force d'autant plus faible que ces variations est plus Lentes.

Les liquides sont des fluides, la mécanique des fluides étudiés leur équilibre et leurs mouvements, que l'on appelle écoulement.

Les liquide occupent un volume déterminé et ne peuvent subir de traction .ils sont peu compressible, pour étudié leur mouvements ou leur équilibre, l'hydraulique utilise les résultats de la mécanique des fluide compte tenu de leur propriétés spécifiques.

III.2. Propriétés des liquides :

Dans l'établissement des principes de l'hydraulique, certaines propriétés des fluides jouent un rôle important, d'autres seulement un rôle mineur ou aucun rôle du tout. [11]

- En hydrostatique (fluide au repos) c'est le poids spécifique qui est la propriété la plus importante.
- hydrodynamique (fluide en mouvement), la densité et la viscosité sont des propriétés dominantes.

III.2.1.La masse volumique (ρ) est le rapport [2]

$$\omega = \frac{Masse}{Volume} = \frac{M}{V_{ol}} \left[Kg / m^3\right]$$

Pour les liquides, le volume est pratiquement insensible aux variations de pression.

ρ eau = 1000 kg/m3

ρ mercure = 13546 kg/m3

ρ air sec = 1,205 kg/m3

N.B : Contrairement aux liquides, les gaz sont fortement compressibles. La variation de masse volumique dépend de la température et de la pression : **ρ** = f (P,T).

III.2.2.Densité d'un fluide :

La densité d'une substance est égale à la masse volumique de la substance divisée par la masse volumique du corps de référence à la même température. Elle est notée d et n'a pas d'unité (grandeur physique sans dimension).

$$d = \frac{\rho_{substance}}{\rho_{eau}}$$

III.2.3. Poids spécifique:

Il représente la force de gravité agissant sur la masse par unité de volume [2] :

$$\gamma = g.\rho\left[N/m^3\right] \qquad \gamma_{eau} = 10^4\, N/m^3$$

III.2.4. Viscosité :

La viscosité d'un liquide est sa caractéristique d'être plus ou moins fluide ou, en d'autres termes, d'opposer plus ou moins de résistance au pompage ou au passage au travers d'un orifice ou d'un tuyau. La température exerce une grande influence sur la viscosité.

Nombre de Reynolds est inversement proportionnel à la viscosité cinématique. La viscosité d'un fluide est une caractéristique qui permet de déterminer la résistance au mouvement du fluide. Plus la viscosité cinématique sera élevée et plus il sera difficile de déplacer le fluide dans la canalisation [2].

Plus le liquide est visqueux et plus les frottements sont élevés, donc la perte de charge augmente.

Dépendance de la température avec la viscosité :

- Fluides gazeux = La viscosité croît avec l'accroissement de la température.
- Liquides = La viscosité décroît avec l'accroissement de la température.

La viscosité cinématique (ν) est le rapport de la viscosité dynamique sur la densité du fluide

Viscosité cinématique en m^2/s	Viscosité cinématique en centistokes (mm^2/s)
$\nu = \frac{\mu}{\rho}$	$\nu = \frac{\mu}{\rho} \cdot 10^6$

- $\boldsymbol{\nu}$ = viscosité cinématique en mm^2/s (ou centistokes) - (système légal (S.I) en m^2/s = 1000000 centistokes)
- $\boldsymbol{\mu}$ = viscosité dynamique de l'eau Pa.s ou (kg/m s)
- p = masse volumique de l'eau en kg/m^3

III.2.5. La rugosité :

La rugosité est une caractéristique de l'état de surface d'un matériau solide. Contrairement à une surface lisse, une surface rugueuse implique un état de surface dont les irrégularités ont une action directe sur les forces de frottement [12].

	tube neuf	tube usage	tube encrasse
Fonte	0,15 mm	0,50 mm	3.00 mm
Acier	0,05 mm	0,50 mm	3.00 mm
cuivre	0,01 mm	0,03 mm	0,50 mm
Polyéthylène	0,01 mm	0,03 mm	0,50 mm

Tableau III.1 : de rugosité absolue

III.2.6. Pression de vapeur saturante :

L'ébullition est un phénomène de changement d'état, dans lequel le liquide passe à l'état de vapeur. Tous les liquides ont tendance à s'évaporer, la phase liquide se transforme en phase gazeuse.

Au cours de cette transformation, les molécules de vapeur exercent une pression appelée pression de vapeur saturante.

Pression de vapeur (Ps) croît avec une augmentation de la température (T).

III.2.7. La tension de surface :

Influe sur les conditions statiques et dynamiques dans les conduits très étroits, c'est le phénomène de capillarité.

III.3. Caractéristiques des écoulements :

L'hydraulique est l'étude des écoulements.

On distingue deux types d'écoulements :

• les écoulements en charge, dans lesquels l'eau remplit complètement la canalisation, c'est le cas notamment des réseaux d'eau potable,

• les écoulements à surface libre (interface entre l'eau et l'air), c'est le cas des rivières et des réseaux d'assainissement.

III.3.1.Ecoulements permanents dans les conduites en charge :

Définition d'un écoulement en charge

- Ecoulement en charge : écoulement à section pleine. La section intérieure droite de conduite est entièrement remplie par la veine liquide [6] .

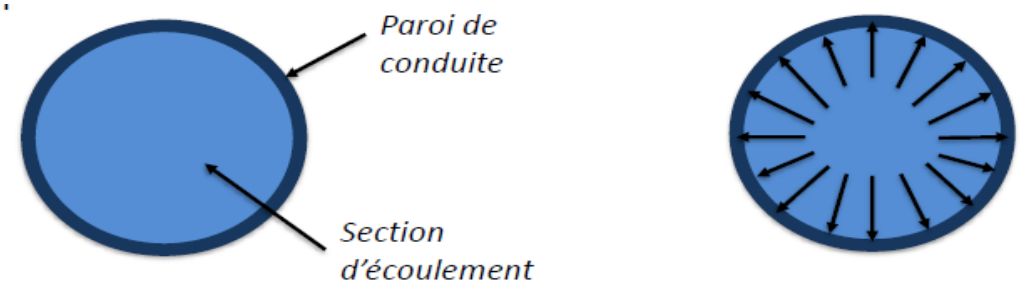


Figure III.1 Définition d'un écoulement en charge

- Formes rencontrées : circulaire, rectangulaire, triangulaire...
- La forme circulaire est optimale et plus répandue : répartition homogène de la pression à l'intérieur du tube**.**

III.4. Régimes d'écoulements :

Le régime d'un écoulement se caractérise par la fluctuation temporelle des vitesses et des pressions au sein de la veine liquide.

- Les figurent suivantes montrent un écoulement laminaire dans une veine liquide et l'évolution de la vitesse en un point (vitesse ponctuelle) en fonction du temps

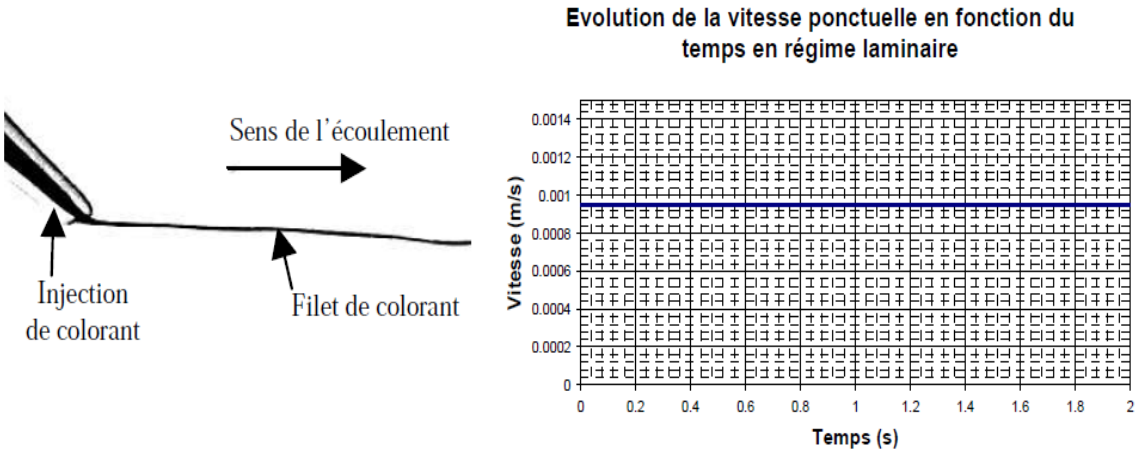


Figure III.2 Ecoulement laminaire

- Quand la vitesse est plus élevée, le filet devient ondulé et très instable. Il se mélange rapidement au fluide ambiant. Des tourbillons de différentes tailles apparaissent. Le régime est dit turbulent**.**

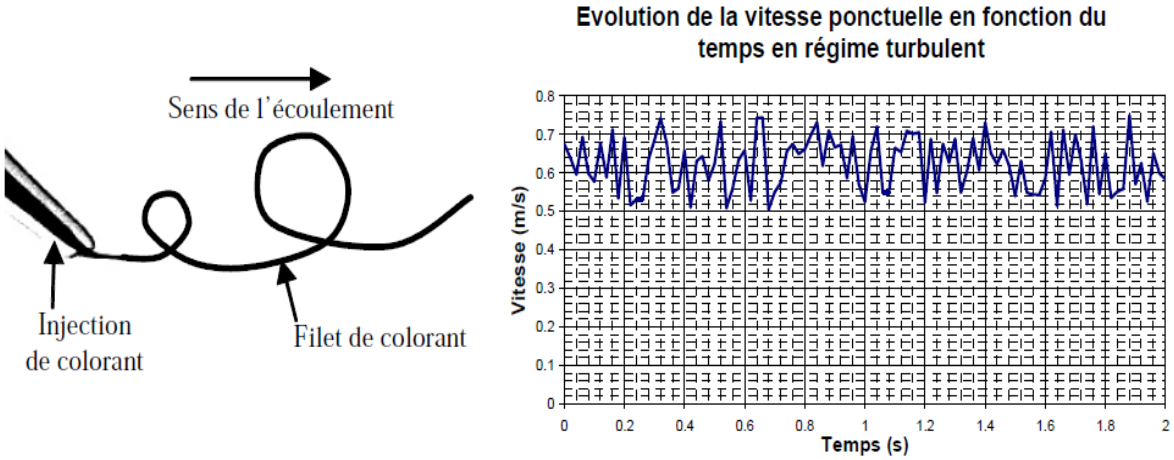


Figure III.3 Ecoulement tourbillons

La turbulence se caractérise donc par la création de tourbillons. ils mélangent les matières dissoutes dans l'eau, comme par exemple le chlore dans un réseau d'eau potable ou le rejet d'une station de traitement des eaux usées dans une rivière.

III.4.1. Les régimes d'écoulement selon nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds.

Les écoulements sont classés en deux régimes principaux, laminaire et turbulent, séparés par une phase transitoire appelée régime critique.

Pour caractériser ces régimes d'écoulement, on introduit un nombre adimensionnel, appelée nombre de Reynolds, noté Re et calculé par la formule:

d'où : $Re = \frac{VD}{\tau} = \frac{\rho VD}{\mu}$

V: vitesse moyenne d'écoulement

D: diamètre de la section d'écoulement

τ : Viscosité cinématique du fluide $\tau = \frac{\rho}{\mu}$

μ : viscosité dynamique du fluide

En introduisant l'expression du débit et de la section d'écoulement (circulaire),

Le nombre de Reynolds s'écrit:

Les limites du nombre de Reynolds définissent les différents régimes d'écoulement

- $R_e \leq 2000$: le régime est laminaire
- $2000 < R_e < 4000$: le régime est critique ou transitoire $R_e = \frac{4Q}{\pi D \tau} = \frac{4\rho Q}{\pi D \mu}$
- $R_e \geq 4000$: le régime est turbulent

III.5.Théorème de Bernoulli :

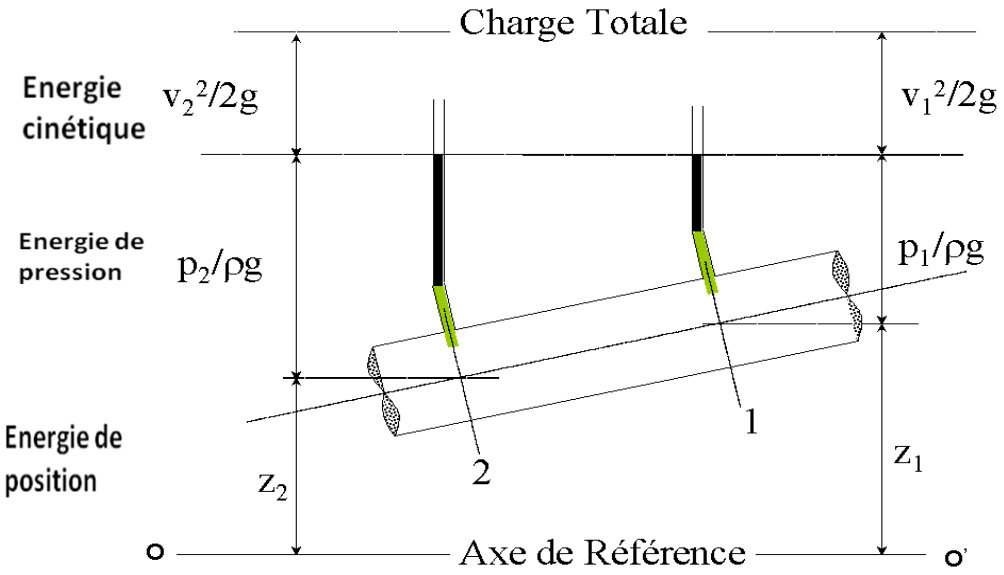


Figure II.4 Théorème de Bernoulli

L'équation de Bernoulli (pour un liquide parfait) exprime que , tout le long d'un filet liquide en mouvement permanent , l'énergie totale par unité de poids du liquide reste constante (dH/dx=0). D'après le schéma , on peut donc écrire que[11] :

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} = H = Cst$$

Cette équation s'écrit donc dans le cas général :

$$Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} = Cst$$ Equation de Bernoulli pour un Fluide Parfait

- V : est la vitesse moyenne de l'eau dans la conduite (= débit / section), en m/s
- P : est la pression moyenne dans la conduite, en Pa
- g : est l'accélération de la pesanteur (= 9,81 m/s^2)
- z : est la cote moyenne de la conduite, en m
- Z: est appelé cote (m)
- : est appelé hauteur due à la vitesse (m)
- est appelé hauteur due à la pression (m)

III.6.Ecoulement d'un fluide réel :

On est loin du comportement idéal du fluide d'écrit par l'équation de Bernoulli.

Un certain nombre de facteurs interviennent pour ralentir le fluide, c'est ce que nous appellerons les pertes de charges

Avec perte de charge

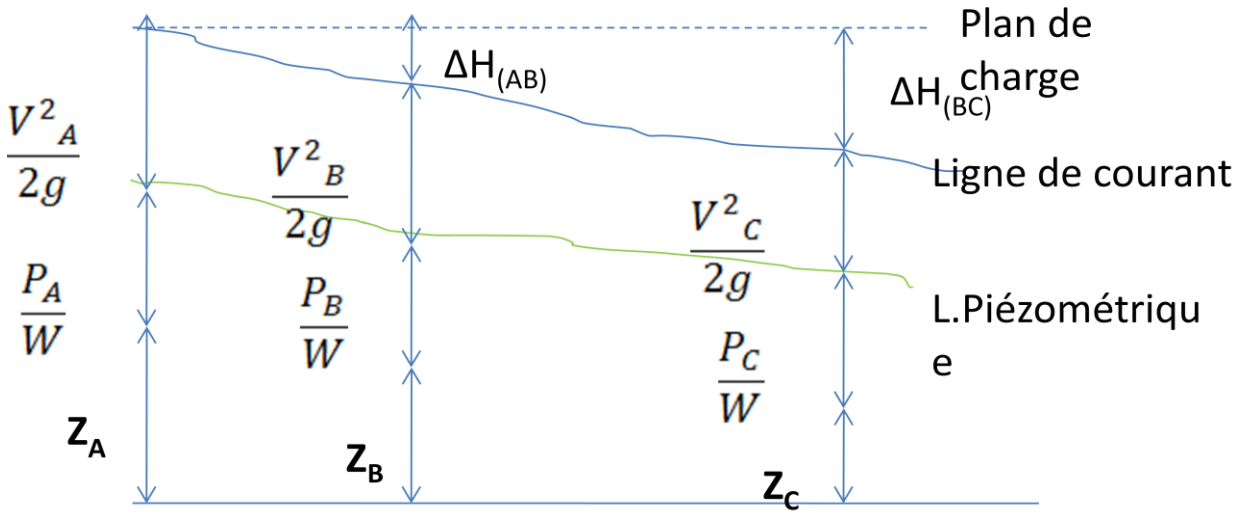


Figure II.5 Plan de charge

Soit H_I la charge hydraulique dans la section S_I et H_2 dans la section S_2, le théorème de Bernoulli, pour un fluide réel, permet d'écrire :

$$H_1 = H_2 + J$$

Où J (noté aussi) représente la perte de charge totale entre la section SI et S2.

Ces pertes de charge sont en réalité de deux types :

- **perte de charge J linéaire** (ou répartie sur toute la longueur de la conduite): due aux frottements visqueux, turbulents entre les particules liquides elles-mêmes et contre les parois des canalisations.
- **pertes de charge singulières** (ou locales): dues aux diverses singularités qui peuvent être placées le long de la canalisation.

III.6.1. Les pertes de charge linéaires :

Les pertes de charge linéaires sont aussi appelées «pertes de charge par frottement». Elles correspondent à une perte de pression dans une installation, dû aux frottements des fluides dans les tuyauteries, cuivre, acier, PE. [16]

Plus la longueur de tube est importante plus il y aura de pertes.

Les pertes de charges linéaires dépendent de nombreux paramètres :

- Le type d'écoulement (Laminaire, turbulent, lisse ou rugueux);
- La masse volumique du fluide;
- La viscosité (dépendante elle même de la température);
- La vitesse du fluide;
- Du diamètre intérieur du tube;
- Du coefficient de rugosité de la canalisation.

D'où

$J_L = J.\ L$

J_L: perte de charge linéaire en (m)

J : perte de charge par mètre de canalisation

L : longueur du tronçon en (m)

Formule dite de Darcy-Weisbach

d'où $$j = \lambda . \frac{L}{D} . \frac{V^2}{2g}$$

D : Diamètre de la section d'écoulement (m)

L : Longueur de la conduite (m)

V : Vitesse d'écoulement (m/s)

λ : Coefficient de frottement (sans unité)

Plusieurs formule sont proposées pour le calcul de λ et dépend du régime d'écoulement: Le coefficient λ (coefficient des pertes de charges linéaires) dépend de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent) et de la rugosité des parois de la canalisation (K). [11]

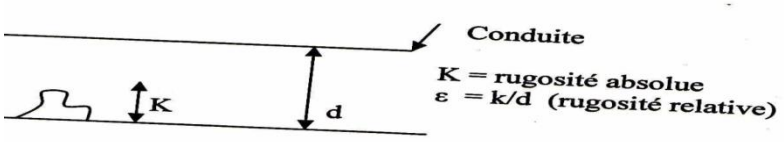


Figure II.6 La rugosité des parois

- **Perte de charge en régime laminaire**: $R_e \leq 2000$

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

- **Perte de charge en régime turbulent**, plusieurs formules de calcul du coefficient **λ** sont proposées par différents auteurs

Formule de Colebrook :

$$Re = \frac{VD}{\tau}$$

K - Paramètre lié à la rugosité de la paroi (Tableau III.2)

τ - Viscosité cinématique (m^2/s).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log_{10}\left(\frac{K}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}}\right)$$

Nature	***K * (en 10^{-2}) mm***
Fonte vieille	20
Fonte neuve sans revêtement	10
Fonte revêtue de ciment	5
Fonte revêtue de ciment centrifugé	2.5
Acier ou béton lisse	1
Fonte revêtue de ciment lisse	0.5
Béton précontraint	0.5
Amiante-ciment	0.25

Tableau III.2 : Valeurs du coefficient *K* de la formule de Colebrook - White

- A ce jour aucune équation ne permet d'évaluer parfaitement les pertes de charges quel que soit le type d'écoulement. il est donc nécessaire de déterminer ce régime pour choisir l'équation qui convient au calcul du cœfficient de pertes de charge dans un conduit [12]:

- Les régimes d'écoulements varient suivant:
  - Les vitesses;
  - La viscosité;
  - La section de conduit
  - La rugosité
  - La masse volumique

Ils sont déterminés par le nombre de Reynolds.

- Si R_e < 2000 le régime est laminaire. On utilisera la formule de Poiseuille en écoulement laminaire pour trouver le coefficient de pertes de charges,
- Si 2000<R_e<4000 le régime est transitoire. (il peut basculer d'un état à l'autre il est bon de faire le calcul dans les deux états pour évaluer le comportement possible du fluide)
- Si R_e> 4000 l'écoulement est turbulent pour trouver le coefficient de pertes de charges , Colebrook est utilisable dans tous les cas d'écoulement turbulent

III.7.Ecoulement turbulent :

L'étude théorique d'un écoulement turbulent est très compliquée, cependant son étude présente un grand intérêt car c'est le régime le plus fréquent en pratique. Historiquement l'étude des écoulements turbulents a été entièrement expérimentale c'est à dire que l'on a accumulé des résultats empirique sans les relier entre eux.

Ensuite la notion de rugosité a été introduite ce qui a conduit a séparé les écoulements turbulent en deux catégories :

- Ecoulements turbulents lisses
- Ecoulements turbulents rugueux

III.7.1.Régime turbulent lisse :

Si la hauteur des aspérités est inférieure à l'épaisseur du film laminaire, toutes les irrégularités sont immergées dans le film laminaire et le liquide s'écoule d'une façon laminaire, Dans ce cas la rugosité des parois n'a aucune influence sur le caractère l'écoulement. Ces parois sont appelées hydrauliquement lisse [8] .

- Le coefficient λ est fonction du nombre de Reynolds R_e, et il est déterminé par

La formule de Von **Karman** : $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\frac{2.51}{R_e\sqrt{\lambda}}$

Pour des tuyaux lisses le nombre de Reynolds est varie entre $2500 < Re < 10^5$

III.7.2. Régime turbulent rugueux :

Si la hauteur des aspérités dépasse l'épaisseur du film laminaire, les irrégularités des parois pénètrent dans le noyau turbulent et le courant s'écoule autour des aspérités avec décrochage suivi d'un échange intense des particules. Ces conduites s'appellent hydrauliquement rugueuses.

Pour des tuyaux rugueux le nombre de Reynolds $Re > 10^5$

III.8.Différentes formules de perte de charge :

En régime permanent, une multitude de formules peut être utilisée pour le calcul des pertes de charge linéaires, telles que celle de Colebrook White, Hazen Williams, Darcy, Strickler, Scobey et Calmon et Lechapt,…etc[6] .

III.8.1.Formule de HAZEN-WILLIAMS (1905-1920) :

La formule de pertes de charge établie par les physiciens américains HAZEN et WILLIAMS a pour expression [8] :

$$J = 10.675 \frac{Q^{1.852}}{C_{hw}^{1.852} D^{4.87}}$$

J :Pertes de charge unitaire en mètre par mètre CE

*Q ;*Débit m3 par seconde

D : Diamètre en mètre du tronçon

C_{hw} : Coefficient de Hazen-Williams dépendant de la rugosité

III.8.2.Formule de Darcy et Weisbach :

$$J = \frac{\lambda V^2}{D2g} \quad \dots \quad V = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

III.8.3.Formule de Chézy :

$$J = \frac{V^2}{C^2 R_h} \quad \dots \quad V = C\sqrt{R_h J}$$

III.8.4.Formule Manning-Strickler :

Très employée l'étude des écoulements à surface libre.

Réécriture du coefficient de Chézy

-redécouverte par Manning (1885) : $C = \frac{1}{n} R_h^{1/6}$

-puis par Strickler : $C = K_s R_h^{1/6}$

*On en déduit, pour une conduite en charge :

$$J = \frac{4^{\frac{10}{4}} Q^2}{\pi^2 K_s^2 D^{16/3}} = \frac{10.29\, Q^2}{K_s^2 D^{5.33}}$$

III.8.5.Formule de Nikuradse :

Le régime d'écoulement est turbulent, mais les effets de la rugosité de la conduite sont prédominants

λ est exprimé par la formule de Nikuradse $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log_{10}(\frac{K}{3.71D})$

$\varepsilon = \frac{K}{D}$ Rugosité relative

k : Rugosité absolue

III.8.6.Formule de Colebrook –White[15] :

Elle est définie par : $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log_{10}(\frac{K}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}})$

- Cette formule est implicite et ne peut donc se résoudre qu'à l'aide d'approximations successives.

III.9.Diagramme de Moody :

- Le diagramme de Moody permet d'évaluer graphiquement le facteur de frottement λ en fonction de la vitesse d'écoulement moyenne V, du diamètre D et de la rugosité ε de la conduite et de la viscosité du fluide [16]
- On détermine le régime d'écoulement :

  - Si le régime est laminaire alors: $\lambda = \frac{64}{R_e}$

- Pour un domaine où : , nous pouvons utiliser la formule de Blasius comme formule approchée : $4000 < R_e < 100\,000$

Formule de blasius : $\lambda = 0.316 R_e^{-0.25}$

- Si le régime est turbulent, on choisit le point d'intersection de la courbe correspondant au $\frac{\varepsilon}{D}$ de la conduite et au nombre de Reynolds. On projete ensuite ce point sur l'ordonnée de gauche de diagramme pour estimer **λ**

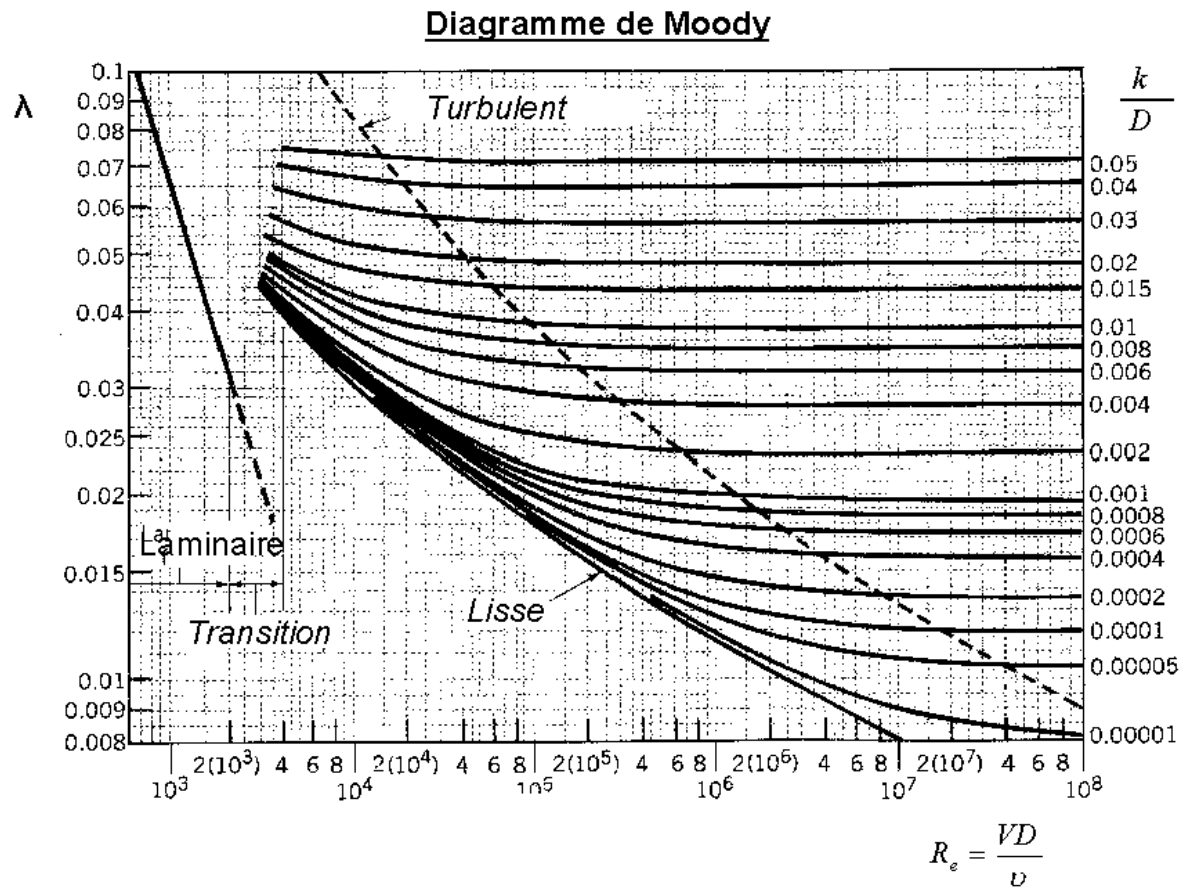


Figure III.7 Diagramme de Moody

1.- Zone à Ecoulement Laminaire : Re < 2000 □ λ = f(Re)

2.- Zone de transition : 2000 < Re < 4000

3.- Zone de Turbulence Lisse : λ = f(Re)

4.- Zone de Turbulence Transitoire : λ = f(Re ;k/D)

5.- Zone de Turbulence Rugueuse : λ = f(k/D)

III.10.Coefficient de perte de charge singulière :

En plus des pertes de charges linéaires dues à l'écoulement continu du fluide, chaque obstacle, discontinuité, ou perturbation de l'écoulement est susceptible d'engendrer localement une dissipation d'énergie. :(changements de sections ou de direction (exemple : des coudes, des vannes, des robinets, des rétrécissements, des élargissements [1].

- On appelle ces dissipations les pertes de charge singulières. Elles se calculent toujours à partir de la formule suivante

$$H_{\sin g} = \xi . \frac{V^2}{2g}$$

ξ : est un Coefficient de perte de charge singulière qui dépend du type, de la forme et des dimensions de la singularité.

V : La vitesse moyenne

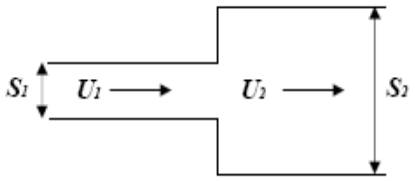
- La constante dépend bien sûr du type d'obstacle rencontré par le fluide.
- Cette formule montre par ailleurs qu'une perte de charge singulière consiste à retirer un pourcentage fixe (égal à) de l'énergie cinétique du fluide au passage de l'obstacle.
- On aura donc toujours :

  $0 \leq \zeta \leq 1$
- En pratique, les valeurs de ζ ont été obtenues soit expérimentalement, soit par des développements théoriques ou des simulations numériques (souvent les trois).

III.10.1. Cas des Vannes :

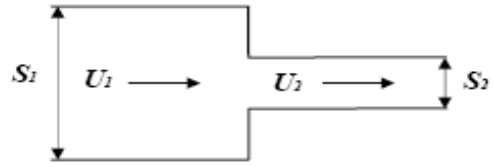
Pour une vanne ouverte**[1]** $\xi = 0.05$ à 0.4

III.10.2. cas d'un Elargissement brusque :



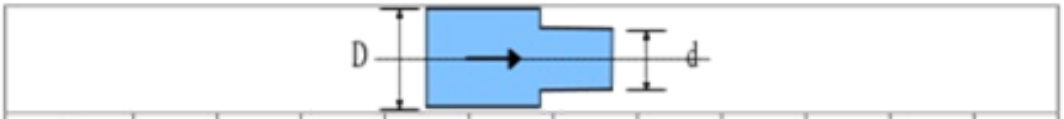
$$H_{\sin g} = \frac{V_2^2}{2.g}\left(1-\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right)^2$$

III.10.3 .Cas d'un Rétrécissement brusque :



$$H_{\sin g} = 0.5 \times \frac{V_2^2}{2.g}$$

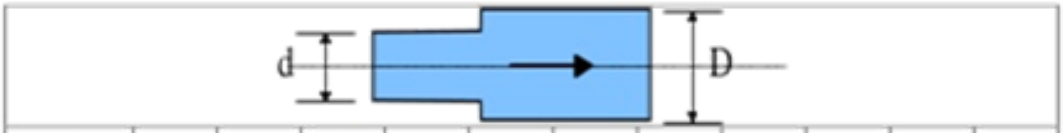
- Rétrécissement brusque :



$\frac{d}{D}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Valeurs de ζ	0,50	0,48	0,45	0,43	0,40	0,36	0,31	0,24	0,17	0,09	0,00

Dans le cas d'un réservoir se déversant dans une canalisation, prenez ζ=0,50.

- Elargissement brusque :



$\frac{d}{D}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Valeurs de ζ	1,00	0,98	0,92	0,83	0,71	0,56	0,41	0,26	0,13	0,04	0,00

Dans le cas d'une canalisation se déversant dans un réservoir, prenez ζ=1.

Tableau III.3 : Valeurs du coefficient ξ d'un Rétrécissement

III.10.4. Cas d'un Coude[1]:

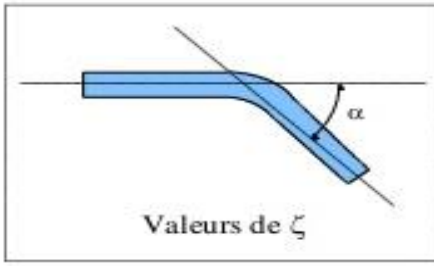
- Coudes brusque à : angle droit

$$\rightarrow \xi = 1, \grave{a} : angle.\alpha \rightarrow \xi = \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2\sin^4 \frac{\alpha}{2}$$

III.10.5 .Coudes convenablement arrondis :

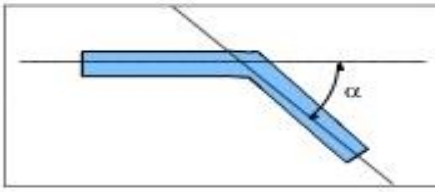
$$\rightarrow \xi = \frac{\alpha}{\pi}\left[0.131 + 1.847\left(\frac{D}{2.r}\right)^{7/2}\right]$$

1 - Coude arrondi :



α	$\frac{r}{D} = \frac{\text{rayonde courbure}}{\text{diamètre intérieur}}$				
	1	2	3	4	5
22,5	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
30	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05
45	0,14	0,10	0,09	0,08	0,08
60	0,19	0,12	0,11	0,10	0,09
90	0,21	0,14	0,12	0,11	0,09

2 - Coude brusque :



α	22,5	30	45	60	90
Valeurs de ζ	0,07	0,11	0,24	0,47	1,13

Tableau III.4 : Valeurs du coefficient ξ d'un Rétrécissement