

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila

Institut des Sciences et de Technologie

Département de sciences et Techniques



**Polycopié de cours «HYDRAULIQUE ET
PNEUMATIQUEE
Partie Hydraulique
2^{ème} Anné Electro-mécanique**

YAHIAOUI KHEMISSI

Maitre de conférence – B - à l'Université de Mila

Chapitre 1: Rappels

1.Introduction

On regroupe sous le terme fluide, les gaz et les liquides. Il est considéré comme composé d'un grand nombre de particules matérielles, très petites et libres de se déplacer les unes par rapport aux autres.

Le système international (S.I) est le système le plus utilisé maintenant. Dans ce système, les dimensions fondamentales sont: la longueur, la masse et le temps. Leurs unités fondamentales correspondantes sont respectivement: le mètre (m), le kilogramme (kg) et le seconde (s). En conséquence, l'unité de volume est le mètre cube (m^3), celle de l'accélération de la pesanteur est le mètre par seconde carré (m/s^2).

Les propriétés des fluides en générale, sont l'ensemble des caractères physiques qui conditionnent leurs comportements (au repos ou en mouvement), dans ce qui suit, on s'intéressera exclusivement aux propriétés des liquides.

Dans ce chapitre on exposera la notion et les principaux propriétés du fluide à savoir la masse volumique, le poids spécifique, la densité, la viscosité, la capillarité et la tension superficielle.

2.Caractéristiques des fluides

On regroupe sous le terme fluide les gaz et les liquides. Un fluide qui est considéré comme composé d'un grand nombre de particules matérielles, très petites et libres de se déplacer les unes par rapport aux autres ; contrairement à un solide, un fluide n'a pas de forme propre : il se répand et épouse la forme du récipient qui le contient. C'est un milieu continu (lorsqu'il est observé à l'échelle macroscopique) et sans rigidité (il peut facilement se déformer, même sous l'action des forces faibles). Un fluide est également un milieu isotrope, c'est à dire, que ses propriétés sont les mêmes dans toutes les directions de l'espace qu'il occupe.

2.1Système d'unités

Les systèmes d'unités fréquemment employés sont les suivants:

- Système anglais de type (FLT), où la force est exprimée en livre (Pound) lb, la longueur en pied (foot) ft ou le pouce (inch) in et le temps par seconde (sec).

- Système métrique de type (FLT), où l'unité de la force (F) est kilogramme force, celle de la longueur (L) est en mètre et enfin l'unité du temps (T) est en seconde ;
- Système CGS de type MLT, dont les unités essentielles sont celles de la masse en gramme, (g), celle de la longueur en centimètre, (cm), le temps en second, (sec) et enfin la force en dyne, (g.s/cm²) ;
- Système international (S.I) de type (MLT) qui est le système le plus utilisé maintenant, où la masse est en kilogramme, la longueur est en mètre et le temps en seconde.
- Le tableau suivant mis en évidence les principaux termes utilisés:

Tableau 1: Système international d'unités (S.I)

Grandeur	Nom d'unité	Symbole	Expression en autres unités	Expression en unités fondamentales
Longueur	Mètre	M	m	m
Masse	Kilogramme	kg	kg	kg
Temps	Seconde	s	s	s
Courant électrique	Ampère	A	A	A
Température	Kelvin	K	K	$K=C^{\circ}+273,5$
Intensité lumineuse	Candela	Cd	Cd	Cd
Force	Newton	N	kgf	kg.m/s ²
Pression	Pascal	Pa	N/m ²	Kg m ⁻¹ s ⁻¹
Energie, travail, quantité de Chaleur	Joule	J	N.m	kg m ² s ⁻²
Puissance	Watt	W	N.m.s ⁻¹	kg m ² s ⁻³
Fréquence	Hertz	Hz	Cycle/sec	s ⁻¹

3. Propriétés des Fluides

Les propriétés des fluides (liquides et gaz) en générale, sont toutes les caractères physiques qui conditionnent leurs comportements que ce soit au repos ou en mouvement. Dans cette partie on s'occupe spécialement des propriétés des liquides.

3.1 Masse volumique (masse spécifique)

La masse spécifique est le rapport de la masse du fluide m à son volume V , elle a les dimensions ML^{-3} . En système S.I, l'unité est en kg/m^3 .

$$\rho = \frac{m}{V} \dots \dots \dots (1)$$

Où :

ρ : Masse volumique en (kg/m^3) ;

m : Masse du fluide en (kg) ;

V : Volume en (m^3).

Il est à noter que la masse volumique de l'eau ordinaire pure ne diffère pratiquement pas de celle de l'eau distillée et elle est prise pour les calculs hydrauliques à $1000Kg/m^3$.

Au chauffage de l'eau jusqu'à $30^\circ c$, la masse volumique (ρ) diminue de $0,47 \%$, c'est pourquoi dans les calculs pratiques, ce paramètre physique (ρ de l'eau) peut être considéré comme constant.

Tableau 2: Masses volumiques de fluides usuels

Fluide	Masse volumique (kg/m³)
Eau douce à température ambiante (0 et 10°C)	1000
Eau de mer	1020—1030
Mercure	13600
Air (à 20°C et à pression atmosphérique)	1,2
Vapeur d'eau (à 100 °C et à pression atmosphérique)	0,6
Ethanol (alcool éthylique)	789
Huile végétale	910 — 940
Huile minérale (lubrifiants)	880 —940
Essence	700 —750
Kérosène	780 — 820
Pétrole	870

Tableau 3: Masse volumiques de l'eau en fonction de la température

Température (°C)	Masse volumique (kg/m ³)
0	1000
10	1000
20	998
30	995
40	992
50	988
60	983
70	978
80	972
90	965
100	958

3.2 Volume massique (Vs)

Le volume massique est défini comme étant le rapport entre le volume du fluide et sa masse

$$\text{Volume massique} = \text{Volume du fluide} / \text{Masse du fluide}$$

$$V_s = 1/m/V = 1/\rho \dots\dots\dots(2)$$

3.2.1 Poids spécifique (poids volumique)

Le poids spécifique représente le rapport entre le poids du fluide est son volume, Son unité est le N/m³.

$$\varpi = \text{Poids du fluide} / \text{Volume du fluide}$$

$$\varpi = \text{Masse du fluide} \times \text{l'accélération de la pesanteur} / \text{Volume du fluide}$$

$$\varpi = \frac{mg}{V} = \rho g \dots\dots\dots(3)$$

Où :

m : Masse du liquide en (kg) ;

g: Accélération de la pesanteur en (m/s²) ;

V: Volume du liquide en (m³).

Le poids volumique de l'eau change peu avec de la température, Parallèlement à la masse spécifique, et dans les calculs on le prend constant.

3.2.2Densité Relative

La densité d représente la masse spécifique d'un fluide exprimé par rapport à celle de l'eau.

Elle est sans unité:

$$d = \frac{\rho_{\text{liq}}}{\rho_{\text{eau}4^{\circ}\text{C}}} = \frac{\varpi_{\text{liq}}}{\varpi_{\text{eau}4^{\circ}\text{C}}} \dots\dots\dots (4)$$

Pour un gaz:

$$d_{\text{gaz}} = \frac{\rho_{\text{gaz}}}{\rho_{\text{air}20^{\circ}\text{C}}} \dots\dots\dots (5)$$

Valeurs Particulières

La densité de l'eau = $\rho_{\text{eau}} / \rho_{\text{eau}} = 1000/1000 = 1$.

La densité du mercure = $\rho_{\text{mercure}} / \rho_{\text{eau}} = 13600/1000 = 13,6$.

3.3 Viscosité

La viscosité traduit la facilité ou la difficulté à l'écoulement. Considérons deux récipients identiques contenant une même quantité de deux liquides différents. On constate que le liquide 1 se vide plus rapidement que le liquide 2. On dit que dans ce cas: la viscosité du liquide 1 est plus faible que celle du liquide 2, ou le liquide 1 est moins visqueux que le liquide 2.

La viscosité est définie comme étant une grandeur caractérisant les frottements internes du fluide, autrement dit la propriété d'un fluide à résister au mouvement d'une couche de fluide au-dessus d'une autre couche de fluide adjacente.

Cela veut dire que les fluides de grande viscosité résistent à l'écoulement, alors que les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement. La viscosité est caractérisée par:

3.3.1 Viscosité dynamique

Soit deux couches de fluide adjacentes distantes de dy . La force de frottement τ qui s'applique à la surface de séparation de ces deux couches) s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit dv , à leur surface et inversement proportionnelle à dy :

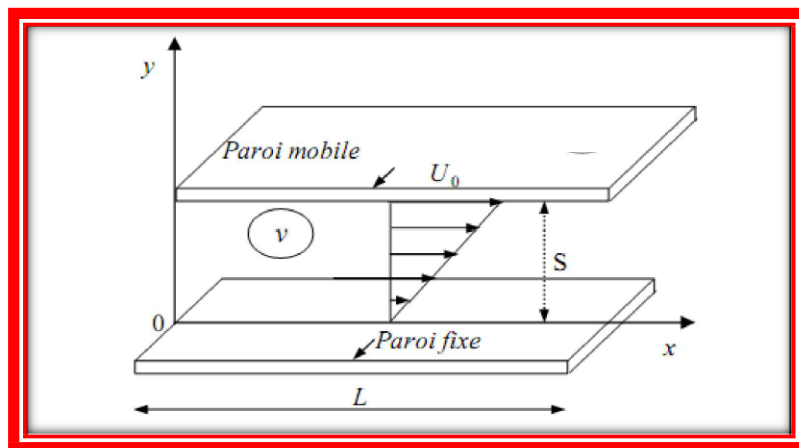


Figure 1: Schéma de l'écoulement de couette plan

Tous les fluides sont visqueux et obéissent à la loi de viscosité établie par Newton :

$$\tau = F / A = \mu \, du / dy = \mu \cdot \theta \dots \dots \dots (6)$$

➔ $\mu = \tau / \theta = \tau \, dy / du \dots \dots \dots (7)$

Avec:

τ : Contrainte de déformation tangentielle en (N) ;

F : Force de frottement interne.

La constante de proportionnalité μ est connue comme étant la viscosité dynamique du liquide exprimée en (kg/m.s) ou en (Pa.s) ou également en Poiseuille (Pl) tel que: 1 Pa.s = 1 Pl = 1 kg/m.s;

du/dy : Gradient de vitesse d'écoulement;

S: Surface de contact entre deux couches en (m²) ;

dV : variation de vitesse entre deux couches en (m/s) ; dy :

Distance séparant les deux couches en (m).

Tableau 4: Viscosité dynamique (μ) de quelques fluides usuels

Fluide	Viscosité dynamique (μ) en Pa.s
Eau (0°C)	$1,788.10^{-3}$
Eau (20°C)	$1,003.10^{-3}$
Eau (100°C)	$0,283.10^{-3}$
Huile d'olive (20°C)	100.10^{-3}
Glycérol (20°C)	1000.10^{-3}
Hydrogéné (20°C)	$0,86.10^{-5}$
Oxygène (20°C)	$1,95.10^{-5}$

3.3.2 Viscosité cinématique ν

Elle est définie comme étant le rapport entre la viscosité dynamique et la masse spécifique d'un fluide. Son unité: m^2/s dimension : L^2T^{-1} .

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \dots\dots\dots(8)$$

La viscosité cinématique de l'eau à la pression atmosphérique peut être calculée à l'aide de la formule empirique de Poiseuille (en stokes) :

$$\nu = \frac{0.0178}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \dots\dots\dots$$

.(9)

Où

t : Température en °C.

$10^4 \text{ St} = 1 \text{ m}^2/\text{s}$.

Le tableau suivant montre quelques valeurs de la viscosité cinématiques de l'eau en fonction de la température :

Tableau 5: Viscosité cinématiques de l'eau douce
en fonction de la température

Température (°C)	Viscosité cinématiques (m ² /s)
0	1,788.10 ⁻⁶
10	1,307.10 ⁻⁶
20	1,005.10 ⁻⁶
30	0,802.10 ⁻⁶
40	0,662.10 ⁻⁶
50	0,555.10 ⁻⁶
60	0,475.10 ⁻⁶
70	0,414.10 ⁻⁶
80	0,365.10 ⁻⁶
90	0,327.10 ⁻⁶
100	0,295.10 ⁻⁶

D'une manière générale, le coefficient de la viscosité dynamique (μ), des liquides est supérieur à celui des gaz. Par contre leur viscosité cinématique, est souvent inférieure à celle des gaz.

Lorsqu'il s'agit des liquides, cette dernière ne dépend guère de la pression, mais elle varie avec la température. La viscosité cinématique de l'eau ainsi décroît lorsque la température augmente, tandis que celle de l'air augmente avec la température.

3.4Capillarité

La tension superficielle provoque une remonté de l'eau au sens inverse de la gravité dans les espaces étroits, ce phénomène est appelé capillarité. Si on plonge un tube étroit dans un liquide, on remarque une surélévation de niveau du liquide dans le tube avec un ménisque concave si le liquide est mouillant (l'eau) et (si $\theta < 90^\circ$), ou un abaissement avec un ménisque convexe si le liquide est non mouillant (mercure) et (si $\theta > 90^\circ$), cela est due à l'action de la tension superficielle.

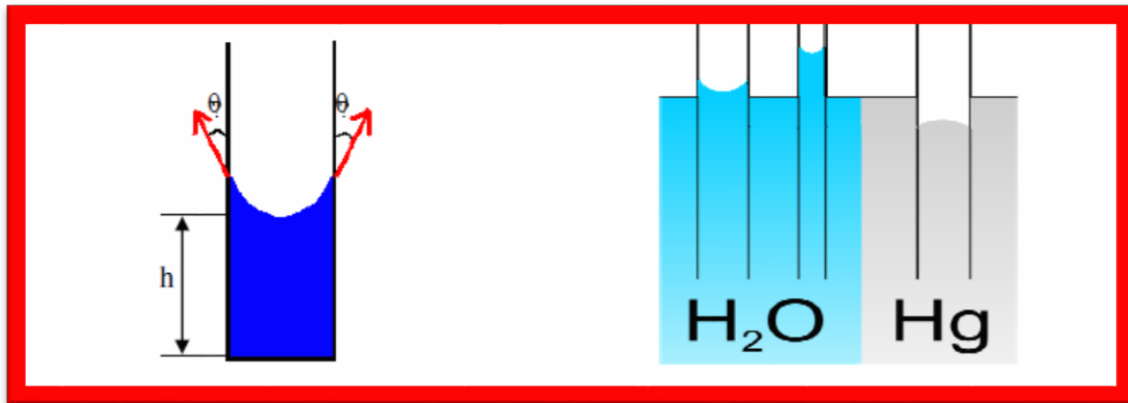


Figure 2: Tubes capillaires

La hauteur du liquide dans les tubes est donnée par la loi de Jurin

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{r \rho g} \dots\dots\dots(10)$$

Où

- r : Rayon intérieur du tube ;
- ρ : Masse volumique du liquide ;
- g : Intensité de la pesanteur ;
- γ : Tension superficielle du liquide ;
- θ : Angle de raccordement liquide/solide.

3.5 Tension superficielle

Nous pouvons définir la tension superficielle comme étant la force de tension qui s'exerce, sur la surface d'un liquide en contact avec un liquide immiscible ou gaz, de telle sorte que la surface de contact apparaît comme une membrane sous tension.

La norme F de la force \vec{F} qui s'oppose aux forces de traction appliquées sur la surface libre d'un liquide pour créer une ouverture en forme de fente de longueur L et de largeur Δx très petites est proportionnelle à cette longueur L:

$$F = \gamma.L \dots\dots\dots(11)$$

Le rapport de cette force par unité de longueur de surface libre est appelée tension superficielle en (N/m) = 0,07289 N/m, pour l'eau):

$$\gamma = F/L \dots\dots\dots(12)$$

4.Loi des gaz parfaits

Envisageons une transformation à température constante d'un gaz d'un état 1 vers un état 2 :

Soient P_1 et V_1 la pression et le volume à l'état 1 ;

Soient P_2 et V_2 la pression et le volume à l'état 2.

D'après Boyle-Mariotte, on a :

$$P_1.V_1 = K = P_2.V_2, \text{ donc } P_1.V_1 = P_2.V_2 \dots\dots\dots(13)$$

Envisageons une transformation à pression constante d'un gaz d'un état 1 vers un état 2 :

Soient T_1 et V_1 la température absolue et le volume à l'état 1 ;

Soient T_2 et V_2 la température absolue et le volume à l'état 2.

D'après Gay-Lussac, on a :

$$\frac{V_1}{T_1} = K' = \frac{V_2}{T_2}, \text{ donc } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \dots\dots\dots(14)$$

5.Classification des fluides

Les fluides peuvent être classés en deux grandes familles: La famille des fluides "newtoniens" (comme l'eau, l'air et la plupart des gaz) qui ont une viscosité constante ou qui ne peut varier qu'en fonction de la température.

Et celle des fluides "non newtoniens" (quasiment tout le reste... le sang, les gels, les boues, les pâtes, les suspensions, les émulsions...). Cette famille a la particularité d'avoir leur viscosité qui varie en fonction de la vitesse et des contraintes qu'ils subissent lorsque ceux-ci s'écoulent. Dans ce cours, on s'intéresse uniquement aux fluides newtoniens qui seront classés comme suit.

5.1Fluides parfaits

Un fluide parfait est un fluide à l'intérieur duquel les forces de cohésion sont nulles. L'eau est plus proche de la définition d'un fluide parfait que l'huile. Dans un fluide parfait, les forces de contact sont perpendiculaires aux éléments de surface sur lesquels elles s'exercent. On considère qu'il n'y a pas de frottements entre les molécules de ce type de fluide; son mouvement s'effectue « d'un bloc », l'énergie est conservée: pas de viscosité.

5.2 Fluides réels

Contrairement à un fluide parfait, dans un fluide réel les forces tangentielles de frottement interne qui s'opposent au glissement relatif des couches fluides sont prises en considération. Ce phénomène de frottement visqueux apparaît lors du mouvement du fluide. Dans le cas d'un fluide réel au repos, on admettra que les forces de contact sont perpendiculaires aux éléments de surface sur lesquels elles s'exercent. La statique des fluides réels se confond avec la statique des fluides parfaits.

5.3 Fluides incompressibles

Un fluide est dit incompressible lorsque le volume occupé par une masse donnée ne varie pas en fonction de la pression extérieure. Les liquides peuvent être considérés comme des fluides incompressibles (eau, huile, etc.).

5.4 Fluides compressibles

Un fluide est dit compressible lorsque le volume occupé par une masse donnée varie en fonction de la pression extérieure. Les gaz sont des fluides compressibles. Par exemple, l'air, l'hydrogène, le méthane sont considérés comme des fluides compressibles.

Chapitre 2: STATIQUE DES FLUIDES (HYDROSTATIQUE)

1. Définition

La statique des fluides a pour objet l'étude des fluides au repos (vitesse nulle).

Il n'y a pas de mouvement relatif entre les particules fluides. Donc, il n'existe pas de force de frottement. Les forces qui agissent sur les surfaces délimitant les particules fluides sont uniquement des forces de pression et s'exercent perpendiculairement à ces surfaces, ce qui constitue globalement le cadre de ce chapitre.

2. Notion de Pression

Considérons un point M à l'intérieur d'une masse liquide (sans viscosité) et découpons une surface S entourant ce point (figure II.1). En tout point de cette surface les conditions physiques sont identiques. De plus, le liquide étant supposé parfait, les molécules liquides n'exercent aucun frottement; donc, il n'existe aucune composante tangentielle dans le plan de S. Toutes les forces sont normales à S et admettent une résultante F également normale à S. Cette résultante F est appelée « Force pressante » ou « force de pression » sur S. Le rapport F / S est la pression moyenne P par unité de surface.

En résumé, la valeur P de la Pression s'obtient en divisant l'intensité F de la force pressante en Newton par l'aire S de la surface pressée en m²:

$$\text{Pression en pascal} = \frac{F}{S}$$

3. Unité de Pression

Dans le système international d'unités, la pression s'exprime en Pascal (Pa), ou Newton par m² (N/m²), en bar et en m.

Le Pascal représente une pression très faible, aussi utilise-t-on un multiple; le bar :

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ pascal}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ pascal} = 10 \text{ m}$$

- Le bar : Kgf/cm²
- Le pascal : N/m²
- Le barye : dyne/cm²
- L'atmosphère : 1 atm=1,0134 bar
-etc

4. Pression exercée par les Liquides

Considérons les unités suivantes:

La Section : **S** (πr^2 pour un cercle) en **m²**

La Gravité : **g** (**9.8 Newtons**)

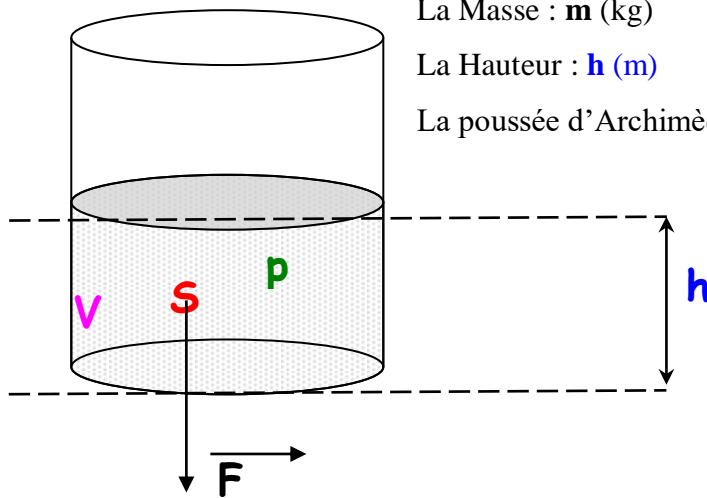
Le Volume : **V** (**m³**)

La Masse Volumique : **p** (kg/m³)

La Masse : **m** (kg)

La Hauteur : **h** (m)

La poussée d'Archimède **F** = **m x g**



Sachant que la pression exercée par le liquide au fond du cylindre est due au poids de ce liquide :

La masse du liquide est : **m = p x V**

Le Volume de liquide est : **V = S x h**

La pression exercée par ce liquide au fond du cylindre est alors:

$$P = \frac{m \times g}{S} = \frac{p \times (S \times h) \times g}{S}$$

D'où:

P = **p x g x h** avec :

P c'est la pression en pascal ou N/m²

p c'est la masse volumique du liquide considéré en kg/m³

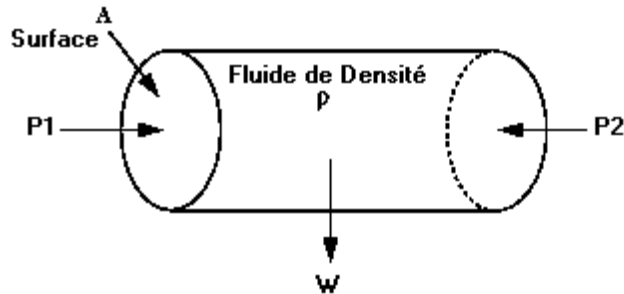
g c'est l'accélération de pesanteur en m/s²

La pression exercée par un liquide est proportionnelle à la masse volumique **p** de ce liquide, à l'accélération

de la pesanteur g et à la profondeur h à laquelle on prend la mesure.

La pression est indépendante de la surface S et est identique en tous points de cette surface

5. Egalité des pressions sur un même plan horizontal



Si l'on considère la direction horizontale, on aura:

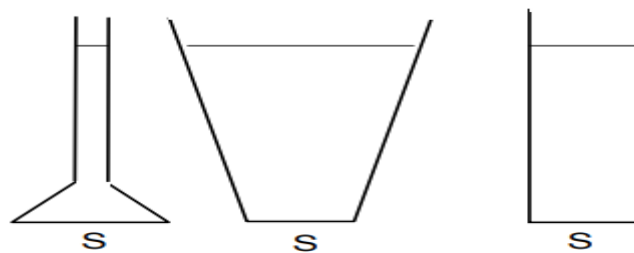
$$P1 A1 - P2 A2 + 0 = 0 \Rightarrow P1 = P2 \text{ (car la composante du poids } W \text{ selon l'horizontale est nulle)}$$

Conclusion : *Sur un même plan horizontal, toutes les pressions sont égales (Pressions Isobares)*

6. Pression sur le fond horizontal des vases

Quelle que soit la forme des vases, s'ils sont remplis du même liquide à la même hauteur h , le fond de même surface S est soumis à la même force de pression, égale au poids d'une colonne verticale de fluide de base S , de hauteur h :

$$F = \sigma ghS$$

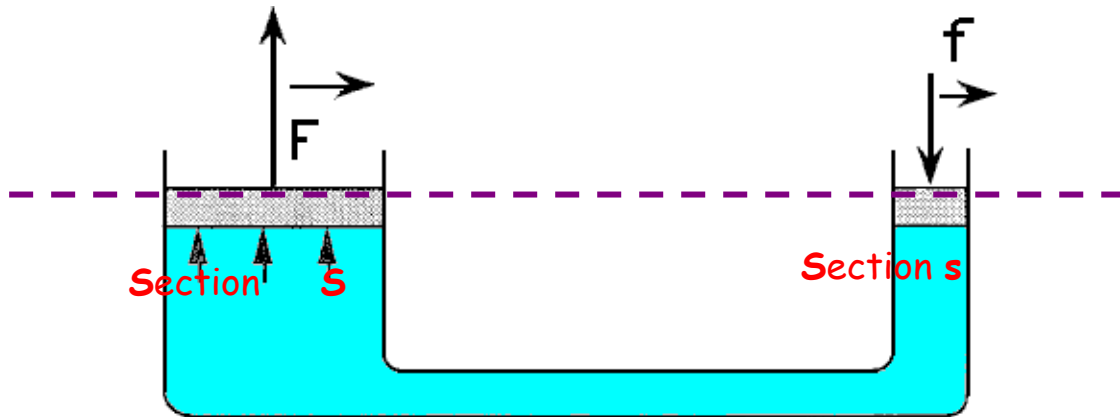


Ce résultat a été appelé le paradoxe hydrostatique: la poussée verticale sur le fond d'un récipient est indépendante de la forme de la paroi à l'intérieur de son contour qui est supposé fixe.

La force de pression sur la surface inférieure est donc la même, bien que les vases contiennent des poids de liquide différents, mais il faut remarquer que si dans le cas du vase cylindrique la paroi inférieure supporte effectivement tout le poids de l'eau qui se trouve dans le vase, il n'en est pas de même dans les deux autres cas ; par exemple, dans le vase tronconique évasé vers le haut les parois latérales supportent des forces de pression qui ont une résultante verticale non nulle et dirigée vers le bas ; par contre, pour le vase resserré vers le haut, les parois latérales inférieures supportent des forces de pression qui ont une résultante non nulle, mais dirigée cette fois-ci vers le haut.

7. Théorème de PASCAL

Un liquide en équilibre transmet en tous points de ce liquide les variations de pressions qu'il subit.



L'augmentation de la pression due à l'application de la force f vaut:

$$P = \frac{f}{s}$$

D'après le théorème de Pascal, cette augmentation se transmet à l'autre extrémité du circuit.

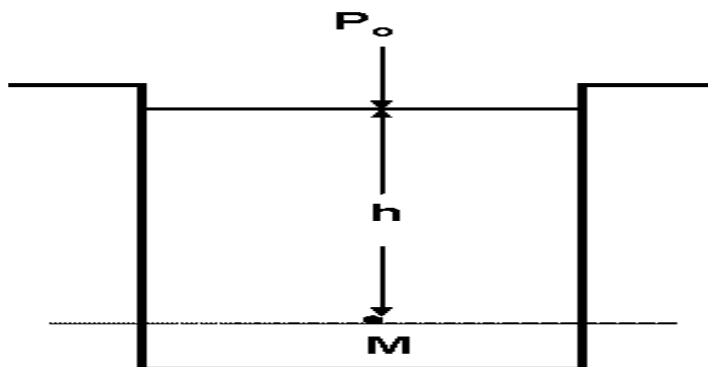
En appliquant le Principe de Pascal, on aura $F / S = f / s$.

D'où:

$$F = f \times \frac{S}{s}$$

Ce phénomène est dû à l'incompressibilité des fluides.

8. Pression effective et Pression absolue:



Au point M , la pression est égale à :

$$P_M = P_0 + \rho gh$$

A la surface libre du fluide, la pression est généralement représentée par la pression atmosphérique $P_{atm} = P_0$.

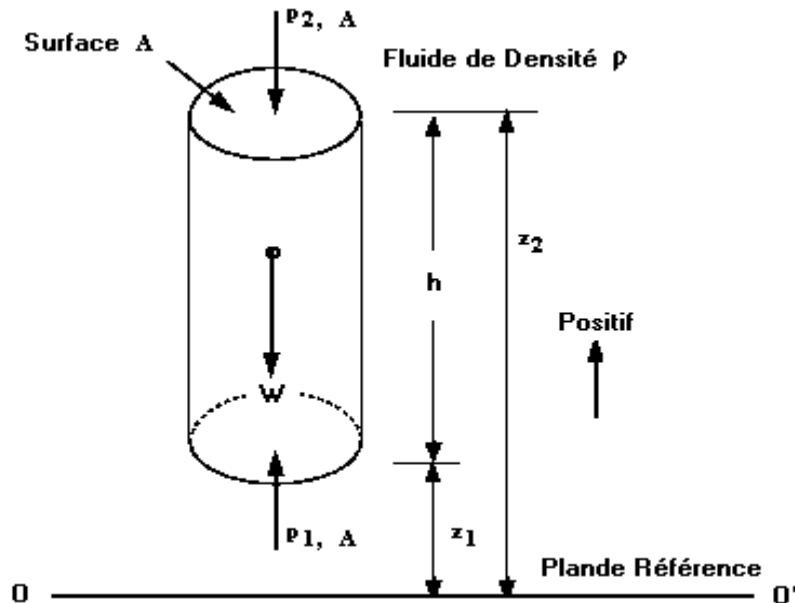
D'où:

$P_M = P_0 + \rho gh$: c'est la **Pression Absolue**

Et si l'on néglige l'influence de la pression atmosphérique ($P_{atm} = 0$) :

$P = \rho gh$: **Pression Effective**

9. Equation Fondamentale de l'Hydrostatique



Soit un élément de fluide de masse spécifique ρ représentant une colonne verticale de section transversale constante A . Considérons 2 sections situées à des distances Z_1 et Z_2 par rapport à un plan de référence OO' .

Soient P_1 et P_2 les pressions dans ces 2 sections.

- Exprimons la variation de pression $P_1 - P_2$:

Le fluide étant en équilibre, la somme des forces dans la direction verticale est donc égale à Zéro :

Force due à P_1 : $F_1 = P_1 \cdot A$

Force due à P_2 : $F_2 = P_2 \cdot A$

Force due au poids de la colonne du liquide : $W = mg = \rho gV = \rho gA (Z_2 - Z_1)$

Avec $V =$ Volume de l'élément considéré.

Si l'on considère le sens positif vers le haut, la condition d'équilibre s'écrit donc :

$$F_1 - F_2 - W = 0 \Rightarrow P_1 A - P_2 A - \rho g \cdot A \cdot (Z_2 - Z_1) = 0$$

$$\text{Et donc } P_1 A - P_2 A = \rho g \cdot A \cdot (Z_2 - Z_1) \Rightarrow P_1 + \rho g \cdot Z_1 = P_2 + \rho g \cdot Z_2$$

$$\Rightarrow \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2$$

Et donc $\frac{P}{\rho g} + Z = C^{ste}$: *C'est la loi de la statique des fluides*

2.- En posant $Z_2 - Z_1 = h$ et $P_2 = P_0$, On aura :

$$P_1 = P_0 + \rho gh$$

Et si $P_0 = 0$ alors $P_1 = \rho gh$

Conclusion

- *La pression augmente donc linéairement en fonction de la profondeur.*
- *Les surfaces d'égalité de pression dans un fluide homogène sont des plans horizontaux (plans isobares). En effet, quand $p = cte$ nous avons $z = cte$. Réciproquement la pression est constante dans un plan horizontal quelconque.*

10- Mesure de la pression :

La mesure de la pression se fait par le manomètre pour la pression relative (manométrique) positives (pression absolue au dessus de la pression atmosphérique), et par le vacuomètre pour les pressions relatives négatives (pressions vacuométriques).

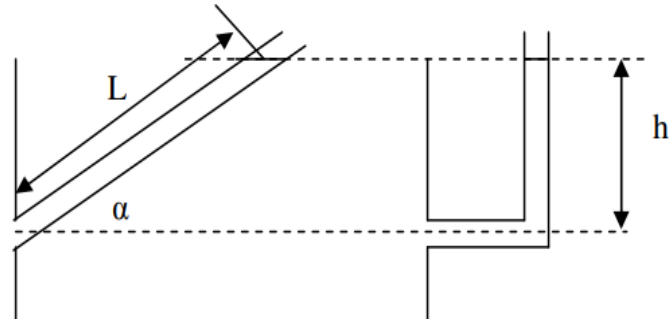


Manomètre type bourdon.

Il y'a entre autre divers types d'instrument de mesures de la pression, dont:

11- Le piézomètre:

Le piézomètre est l'instrument de mesure de la pression le plus simple, c'est un tube raccordé au point ou on veut déterminer la pression, celle-ci n'est autre que la hauteur d'eau qui monte dans ce tube.

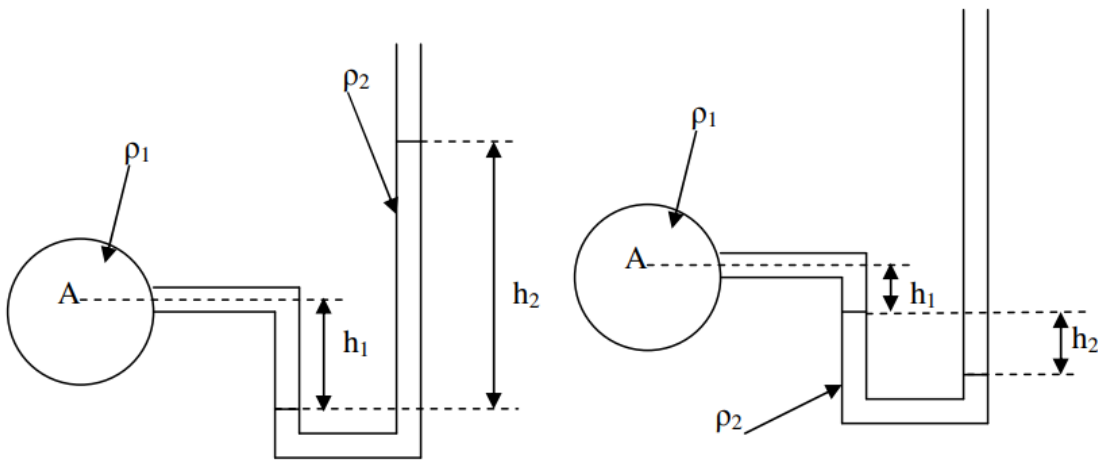


piézomètres verticale et incliné.

Le piézomètre est souvent vertical, la pression en un point est équivalente à : $P = \rho h$ Si le piézomètre est incliné : $P = \rho h = \rho L \sin(\alpha)$ avec ρ est le poids volumique du liquide.

11.1- Piézomètre en U :

Il consiste en un tube en U dont une extrémité est raccordée au point de mesure et l'autre à l'air libre, le tube contient soit du mercure ou autre liquide plus dense que le fluide dont la pression est à mesurer pour la mesure des pression manométriques, ou contient un liquide plus léger (moins dense que le liquide dont on veut mesurer la pression) pour le cas des mesures de la pression vacuométrique.



Pour une pression manométrique (1^{er} cas) : $P_A = \rho_2 g h_2 - \rho_1 g h_1$

Pour une pression vacuométrique (2^{em} cas) : $P_A = -(\rho_2 g h_2 + \rho_1 g h_1)$

N.B : Le plan horizontale, qui passe par un seul liquide continu, est un plan d'égalité de pression (ou isobare, isopiéze...etc).

Chapitre 3: Les écoulements permanents dans les conduites en charge

1.Introduction

Contrairement aux solides, les éléments d'un fluide en mouvement peut se déplacer à des vitesses différentes et à des pressions également différentes. Un fluide peut posséder plusieurs sortes d'énergies telles que l'énergie cinétique, l'énergie de pression et l'énergie potentielle de pesanteur. L'écoulement des fluides réels s'avère plus complexe que celui d'un fluide parfait. Afin de traiter le problème de ce type d'écoulement, on fait appel à des résultats expérimentaux réalisés en 1883 par le chercheur britannique **Osborne Reynolds**. Ces expériences avaient pu montrer essentiellement la présence de deux régimes d'écoulement: laminaire et turbulent qu'on peut les distinguer par un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds. Dans l'écoulement turbulent, la dissipation de l'énergie hydraulique ou perte de charge est due aux frottements sur la conduite, aux phénomènes turbulents ou encore à des phénomènes locaux tels que les contractions ou les élargissements brusques de la veine liquide.

En plus de l'étude de mouvement des fluides réels, nous allons donner également une description sur les principaux instruments de mesure couramment employés dans les installations hydrauliques et pétrochimiques sous pression.

2.Écoulements permanents ou stationnaires

Un régime d'écoulement est dit permanent ou stationnaire si les paramètres qui le caractérisent (à savoir vitesse, température, pression, masse volumique ...), ont une valeur constante au cours du temps.

3.Ecoulement d'un fluide réel

La mécanique des fluides s'occupe à l'écoulement des fluides comme les écoulements des fluides réels. Dans ces derniers le régime permanent est supposé toujours atteint, la longueur des canalisations est infiniment plus grande que leur section et les canalisations où circulent les liquides seront toujours remplies totalement.

3.1 Distribution des vitesses

Sous l'effet des forces d'interaction entre les molécules de fluide visqueux et entre ces dernières et les molécules de la paroi intérieure de la conduite, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. On dit qu'il existe un profil de vitesse.

Suivant la section de la canalisation, le profil des vitesses est une parabole pour le régime laminaire et la vitesse est maximum au centre. La vitesse moyenne est égale à $0,5U_{\max}$. Tandis que, dans le cas du régime turbulent, le profil montre un aplatissement au centre de la canalisation et la vitesse moyenne égale à $0,8U_{\max}$

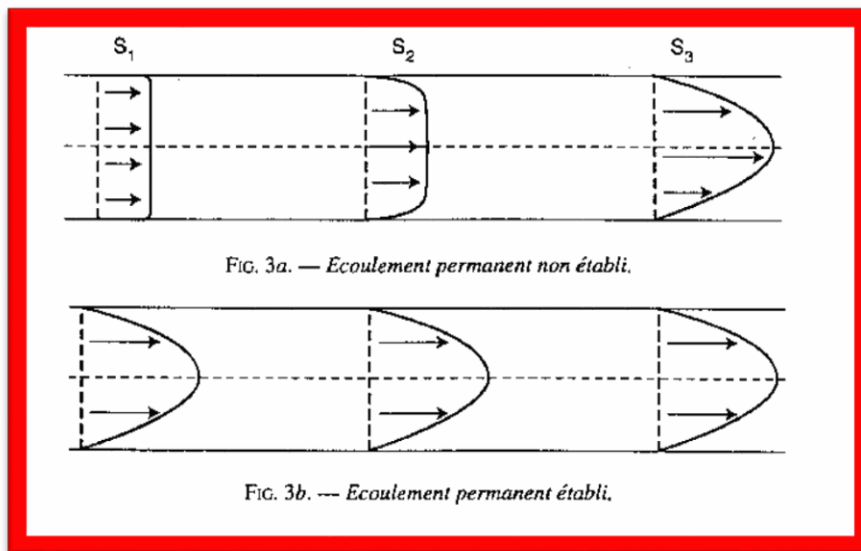


Figure 3: Évolution schématique du profil de vitesse de l'écoulement fluide à l'entrée d'une conduite

3.2 Différentes formes d'énergies d'un fluide

Un fluide pouvait posséder plusieurs sortes d'énergies telles que l'énergie cinétique, l'énergie de pression et l'énergie potentielle de pesanteur. Nous pouvons par la suite définir l'énergie hydraulique totale, notée E , qui sera la somme des trois énergies précédentes.

3.2.1 Énergie cinétique

Ce type d'énergie est donné par la relation suivante:

$$E = \frac{m.U^2}{2} \dots\dots\dots(15)$$

Avec

E : Energie cinétique en joule ;

m : Masse en kg ;

U : Vitesse en m/s.

On peut définir également une énergie cinétique volumique (ec) en fonction de l'énergie cinétique :

$$ec = Ec / V = m.U^2 / 2V = \frac{m}{V} \cdot \frac{U^2}{2} = \rho \frac{U^2}{2} \dots\dots\dots(16)$$

V et ρ sont respectivement le volume en m³ et la masse spécifique du liquide en kg/m³.

Il est important de rappeler que dans les réseaux hydrauliques, les vitesses moyennes sont généralement situées entre 1 et 2 m/s, ce qui donne une énergie cinétique inférieure à 0.2 joule, valeur souvent négligeable devant l'énergie de pression et l'énergie potentielle.

3.2.2Energie de pression

À cause de la présence des mouvements désordonnés des particules du liquide qui le constitue et qui s'entrechoquent et frappent les parois de très nombreuses fois à chaque seconde, le fluide possède une certaine énergie de pression :

$$E_{pr} = P.V \dots\dots\dots(17)$$

Avec

P est la pression de fluide en pascal (Pa) et V le volume du fluide en m³.

L'énergie volumique de pression (e_{pr}) est la pression P elle-même. On aura donc la relation suivante pour un volume V de fluide:

$$e_{pr} = P = E_{pr} / V \dots\dots\dots(18)$$

3.2.3 Énergie potentielle de pesanteur

Cette énergie résulte à la force d'attraction gravitationnelle (tout simplement le poids), elle est appelée énergie potentielle de pesanteur ou également énergie gravifique (E_p).

Cette énergie qui en fonction de la masse m de liquide et de son altitude z est donnée par l'expression suivante:

$$E_p = m \cdot g \cdot z \dots \dots \dots (19)$$

De cette expression, nous pouvons remarquer que lorsque la masse et l'altitude sont importantes, plus l'énergie potentielle de pesanteur est grande.

Parallèlement à l'énergie cinétique et celle de pression, l'énergie volumique de pesanteur:

$$e_p = E_p / V = mgz / V = \rho g z \dots \dots \dots (20)$$

3.2.4 Énergie totale et l'énergie volumique totale

L'énergie totale par unité de volume E est donnée par la relation suivante :

$$E_{\text{hydraulique totale}} (E) = E_{\text{potentielle}} + E_{\text{pression}} + E_{\text{cinétique}} \dots \dots \dots (21)$$

$$\longrightarrow E = \rho g z + pV + \rho V^2 / 2 \dots \dots \dots (22)$$

Cette énergie par unité de volume est aussi appelée la charge.

4 Dissipation d'énergie et Résistance hydraulique (conduites circulaires)

Dans l'écoulement turbulent, la dissipation de l'énergie hydraulique est une perte, par transformation en chaleur, d'une partie de l'énergie mécanique disponible, appelée en hydraulique chute de pression ou encore pertes de charge. Elle est due aux frottements sur la conduite, aux phénomènes turbulents ou encore à des phénomènes locaux tels que les contractions ou les élargissements brusques de la veine liquide. La dissipation de l'énergie hydraulique dépend de la vitesse d'écoulement et de la viscosité du liquide, de la forme, des dimensions et de la rugosité de la canalisation, mais non de la valeur absolue de la pression qui règne dans le liquide.

La perte de charge due aux frottements internes et à la paroi est appelée perte de charge linéaire. Elle est donnée par la relation suivante:

$$\Delta H_L = \frac{\lambda U^2}{2gD} L \dots\dots\dots (23)$$

$$Q = US \text{ et } S = \frac{\pi D^2}{4} \longrightarrow \Delta H_L = \frac{8 \lambda L}{\pi^2 g D^5} Q^2 = R \cdot Q^2 \dots\dots\dots (24)$$

Avec:

Q : Débit d'écoulement en m³/s, U : Vitesse moyenne d'écoulement en m/s, λ : Coefficient de la perte de charge sans unité ou adimensionnel, D et L : sont respectivement le diamètre et la longueur de conduite en mètre, g : Accélération gravitationnelle en m/s² et R : Résistance hydraulique de la conduite

La différence de pression entre deux sections (1) et (2) d'un circuit hydraulique résulte de:

- Frottements du fluide sur la paroi interne de la tuyauterie; on les appelle pertes de charge linéaires ou systématiques.

La résistance à l'écoulement engendrée par les accidents de parcours (robinets, Té, clapet, filtre, débitmètre, échangeur, coudes, élargissements ou rétrécissement de la section, organes de réglage, etc.) ; Ces accidents provoquent également des pertes d'énergie sous forme de frottements à cause des tourbillons créés par ces obstacles. On les nomme pertes de charge locales ou singulières.

5.Fluide en développement et couches limites à l'entrée des conduites

Dans le cas d'un régime turbulent, Prandtl a montré en 1904 que l'épure des vitesses est composée de deux zones:

Une première zone comprenant le corps de l'écoulement, dont les vitesses sont égales, et les forces de viscosité sont négligeables par rapport aux forces d'inertie et de turbulence.

Une seconde zone située au voisinage des parois, d'une épaisseur δ (Fig.4) et d'une vitesse qui varie très rapidement d'une valeur nul (au contact avec la paroi) jusqu'à une valeur finie. Dans cette couche, les forces de viscosité ne sont plus négligeables par rapport aux forces d'inertie et de turbulence. Elle s'appelle la couche limite. L'écoulement dans cette dernière peut être laminaire ou turbulent.

La figure 4 représente le développement de la couche limite dans le cas d'un régime laminaire et turbulent.

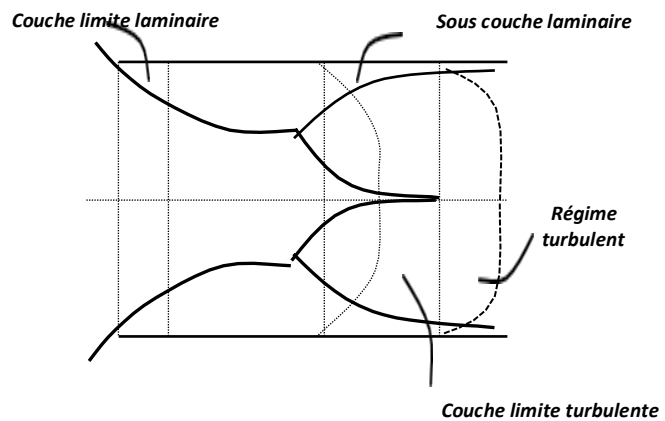
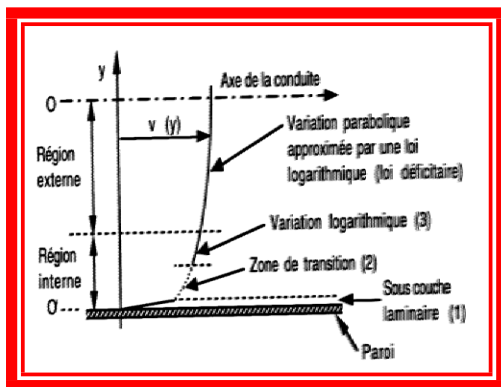


Figure 4: Développement de la couche limite

6.Ecoulement unidirectionnel

6.1 Définitions

6.1.1Trajectoire

La trajectoire est l'ensemble des positions occupées au cours du temps par un même élément de fluide.

6.1.2Ligne de courant

En régime stationnaire, la ligne de courant est une ligne tangente en chacun de ses points au vecteur vitesse $\vec{U}(x, t)$ du fluide en ce point. Elle représente également la courbe suivant laquelle se déplace un élément de fluide.

6.1.3Tube de courant

Un tube de courant est défini comme étant une surface engendrée par les lignes de courant s'appuyant sur une courbe fermée (figure 5).

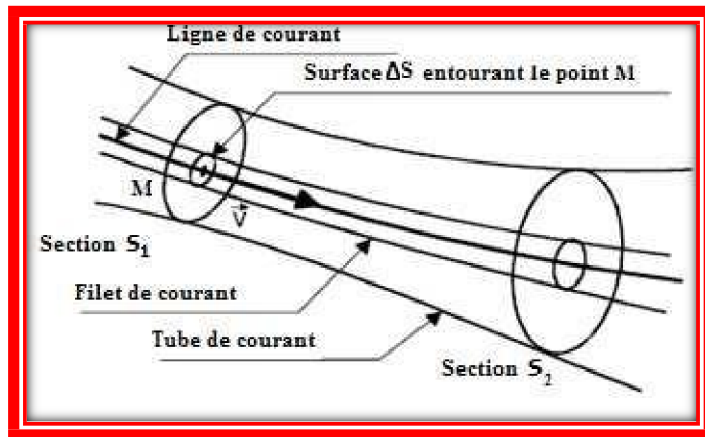


Figure 5: Ligne et tube de courant

6.1.4 Débit massique

Si Δm est la masse de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt , par définition le débit massique en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ est:

$$q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \dots\dots\dots(25)$$

6.1.5 Débit volumique

Si ΔV est le volume de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt , par définition le débit volumique en m^3/s est donnée par la formule suivante:

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \dots\dots\dots(26)$$

6.1.6 Relation entre débit massique et débit volumique

La masse volumique ρ est donnée par la relation :

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}, \text{ d'où } q_m = \rho q_v \dots\dots\dots(27)$$

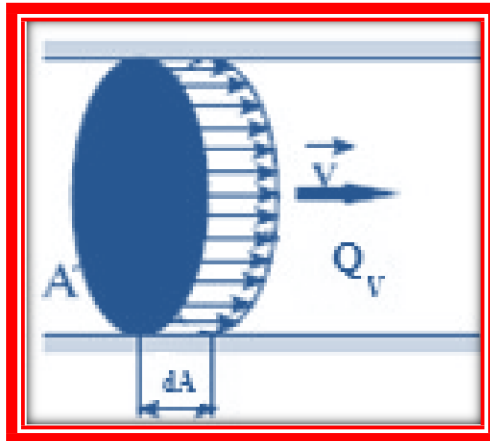


Figure 6: Débit

6.2 Equations fondamentales

6.2.1 Equation de continuité

La conservation de la matière impose que le débit d'un fluide dans un tuyau (ou du sang dans les veines) est constant. Le débit, noté Q est donné comme suit:

$$Q = A \cdot S \text{ en m}^3/\text{s} \dots\dots\dots(28)$$

L'équation de continuité s'écrit:

$$Q = Q_1 = Q_2 \quad \longrightarrow \quad S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2 \dots\dots\dots(29)$$

Ce qui signifie que le fluide circule plus vite dans les parties où le tube est plus étroit.
Exemple: aspirateur, sèche-cheveux, etc.

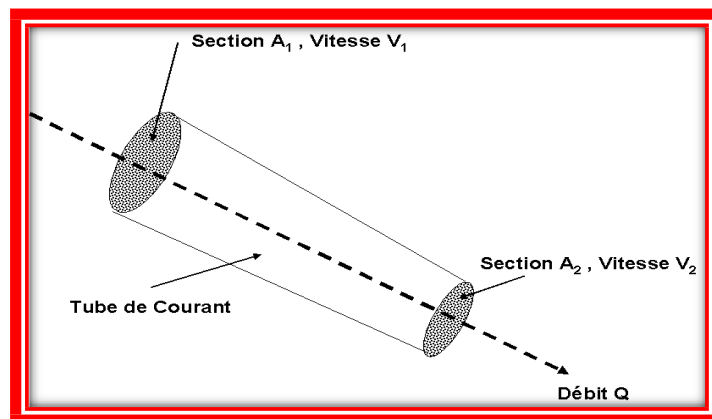


Figure 7: Egalité de débit à l'entrée et à la sortie d'une conduite

6.2.2 Equation de Bernoulli pour un fluide réel

Contrairement au fluide parfait non visqueux, la charge H pour un fluide réel visqueux diminue dans la direction de l'écoulement ($dH/dx < 0$). Ceci résulte de la nature visqueuse du fluide qui dissipe une partie de l'énergie: cette perte d'énergie est appelée dissipation de l'énergie ou perte de charge.

La figure suivante montre la diminution de la charge hydraulique (H) dans la direction de l'écoulement (liquide réel) :

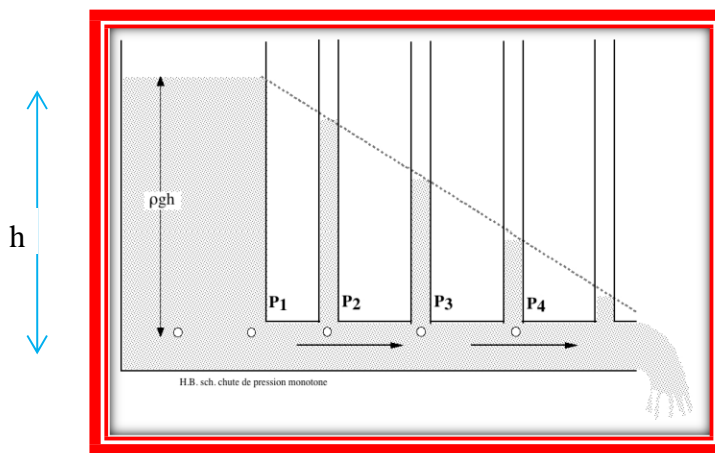


Figure 8: Diminution de la charge hydraulique dans la direction de l'écoulement (liquide réel)

La représentation graphique de l'équation de Bernoulli en cas de fluide réel est donc montrée par le schéma suivant :

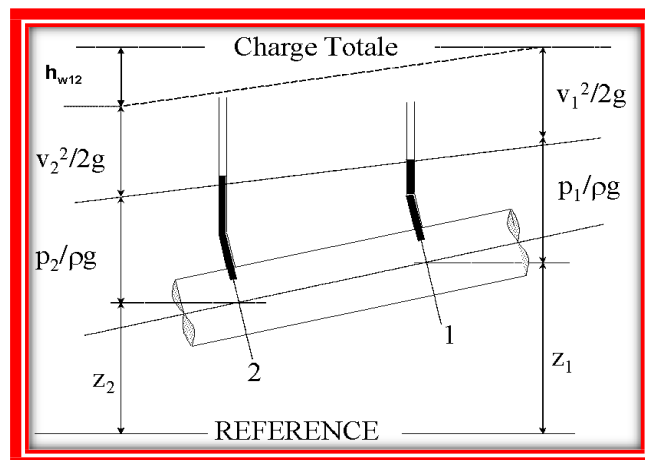


Figure 9: Représentation graphique de l'équation de Bernoulli (fluide réel)

L'équation de **Bernoulli**, pour un liquide réel, devient donc:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + \Delta H_{1-2} \dots \dots \dots (30)$$

Avec ΔH_{1-2} : perte de charge totale entre les sections 1 et 2 (linéaires + singulières).

Z : altitude en m.

P : pression en un point en Pa ou N/m² ;

g : accélération de la pesanteur en N/kg ou m/s² ;

U : vitesse du fluide en un point en m/s ;

6.3 Problèmes élémentaires de conduites simples

Le problème du calcul des pertes de charge met en présence les principales grandeurs suivantes :

Le fluide caractérisé par :

- sa masse volumique ρ ;
- sa viscosité cinématique ν .

Le tuyau caractérisé par :

- Sa section (forme et dimension) en général circulaire (diamètre D) ;
- Sa longueur (L) ;
- Sa rugosité (hauteur moyenne des aspérités de la paroi).

Tous ces éléments sont liés par des grandeurs hydrauliques comme la vitesse moyenne d'écoulement V ou le débit Q ainsi que le nombre de Reynolds (Re) qui joue un rôle primordial dans le calcul des pertes de charge.

6.4 Notion de Rugosité des Conduites

Contrairement à une surface lisse, une surface rugueuse implique un état de surface dont les irrégularités ont une action directe sur les forces de frottements.

Une surface rugueuse peut être considérée comme étant constituée par une série de protubérances élémentaires caractérisées par une hauteur, notée ε ou k, et appelée « rugosité ».

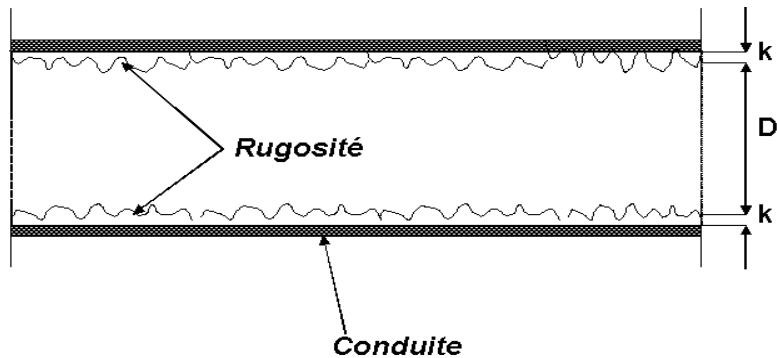


Figure 10: Rugosité de Conduite

La rugosité correspond à la notion habituelle de présence plus ou moins importante d'aspérités sur une surface. On constate ici que lorsque la rugosité d'une canalisation augmente les frottements seront plus nombreux, donc la perte de charge qui est fonction du matériau de la canalisation augmentera.

Afin de comparer la rugosité par rapport au diamètre de la conduite, on introduit le rapport ε/D (Rugosité Relative) qui est le facteur déterminant pour le calcul des pertes de charge. La rugosité absolue ε correspond à la hauteur géométrique moyenne des aspérités d'une canalisation. On donne les valeurs indicatives suivantes de rugosité absolue en mm:

Acier: 0,045 fonte: 0,26 fer galvanisé: 0,15 béton: 0,3 à 3, Verre, plastique, cuivre, inox: 0,0015.

6.5 Régimes d'écoulement et perte de charge

6.5.1 Différents régimes d'écoulement

Les expériences effectuées par Reynolds (1883) au cours de l'écoulement d'un fluide dans une conduite cylindrique rectiligne dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont mis en évidence principalement la présence de deux régimes d'écoulement: laminaire et turbulent.

En utilisant des fluides divers de viscosités différentes et en faisant varier le diamètre et le débit de la conduite, Reynolds a pu montrer que le paramètre qui permettait de déterminer la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent) est un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds et donné par les deux relations suivantes:

$$Re = \rho \bar{U} D / \mu \dots\dots\dots(31)$$

Et

$$Re = U_{moy} D / \nu \dots\dots\dots(32)$$

Avec :

ρ : masse volumique du fluide en kg/m^3 , U_{moy} : vitesse moyenne d'écoulement en m/s , D : diamètre de la conduite en m , μ : la viscosité dynamique du fluide en $Pa.s$ et ν : la viscosité cinématique en m^2/s .

6.5.1.1 Régime laminaire

On dit qu'un écoulement d'un fluide réel est laminaire s'il se déplace en formant des lames ou couches sans brassage ($Re \leq 2300$). Ce régime est caractérisé par un débit et une vitesse très faibles.

6.5.1.2 Ecoulement turbulent

On dit qu'un écoulement d'un fluide réel est turbulent s'il est désordonné et se déplace en formant des tourbillons de tailles différentes accompagnés d'un mélange ou brassage intensif des particules fluides (Re supérieur à 2300).

Le régime turbulent est favorisé par un débit et une vitesse élevés et un faible diamètre de canalisation.

6.5.2 Pertes de charges

6.5.2.1 Pertes de charges dues aux frottements

Ce genre de perte de charge, il se rencontre dans les tuyaux lisses aussi bien que dans les tuyaux rugueux.

Entre deux points séparés par une longueur L (en m), dans un tuyau de section circulaire, de diamètre D (en m) et avec une vitesse moyenne d'écoulement v (en m/s), apparaît une perte de pression :

$$(\Delta p = P_2 - P_1) \dots\dots\dots(33)$$

Cette dernière peut s'exprimer sous la forme suivante:

$$\lambda \rho U^2 L / 2D \text{ (en Pa)} \dots\dots\dots(34)$$

Ou également via la formule de **Darcy – Weisbach** (1857) qui est sous comme suit:

$$\Delta h_L = \lambda \overline{U^2} L / 2 gD \dots\dots\dots(35)$$

Avec Δh_L est la perte de charge exprimée en mètres de colonne de fluide (mCF) λ est un coefficient sans dimension appelé **coefficient de perte de charge linéaire**. Il se détermine par différentes lois empiriques suivant le régime d'écoulement:

Si $Re \leq 2300$ le régime est laminaire. Dans ce cas, le coefficient λ dépend seulement du nombre de Reynolds Re ; l'état de la surface n'intervient pas et donc λ ne dépend pas ni de la rugosité ε (noté aussi k), ni de la nature de la tuyauterie.

$$\lambda = 64 / Re \quad \text{(Formule de Poiseuille)} \dots\dots\dots(36)$$

Si $2300 \leq Re \leq 100000$ le régime est turbulent lisse λ ne dépend que de Re

$$\lambda = 0,316 \cdot Re^{-0,25} \quad \text{(Relation de Blasius)} \dots\dots\dots(37)$$

Si $Re > 100000$ le régime est hydrauliquement turbulent rugueux λ ne dépend que de la rugosité relative (ε/D)

$$\lambda = 0,79 \sqrt{\frac{\varepsilon}{D}} \quad \text{(Formule de Blench)} \dots\dots\dots(38)$$

La formule de **Colebrook** est actuellement considérée comme celle qui traduit le mieux les phénomènes d'écoulement en régime turbulent. Elle est présentée sous la forme suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon}{3,7D} \right] \dots\dots\dots(39)$$

La mise en œuvre directe de cette formule demanderait, du fait de sa forme implicite, un calcul par approximations successives. En pratique, on utilise également des représentations graphiques (abaques).

Il est aussi possible d'obtenir les pertes de charges sans les calculer à l'aide du diagramme de Moody. Ce diagramme permet d'estimer graphiquement la valeur de λ en fonction de Re et de la rugosité relative de la conduite (ϵ/D).

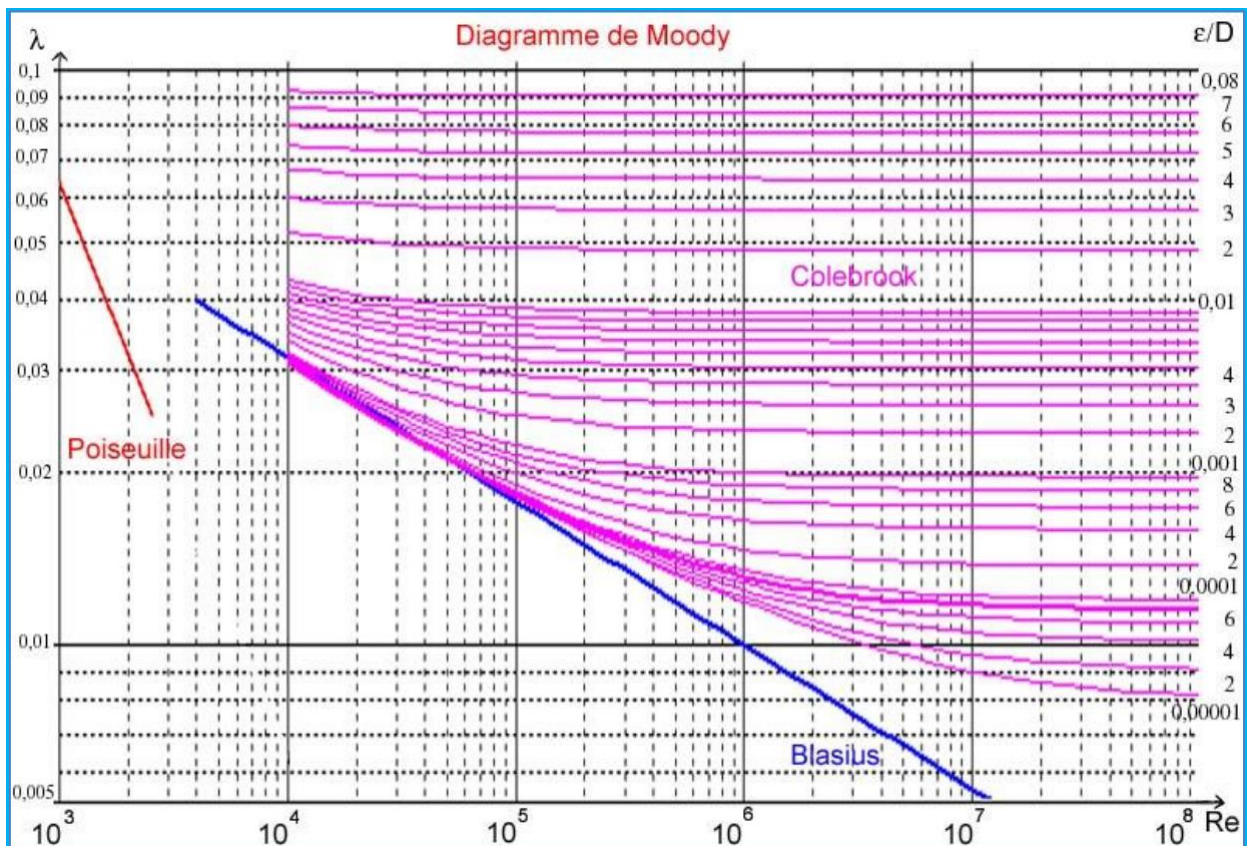


Figure 11: Diagramme de Moody

6.5.2.2 Pertes de charge singulières

La perte de charge singulière dans les conduites de liquides à section circulaire résulte du passage du liquide au point singulier, elle est donnée par la formule suivante :

$$\Delta H_s = K \cdot \frac{\bar{U}^2}{2g} \dots\dots\dots(40)$$

Dans laquelle ΔH_s est la perte de charge singulière en mètres, \bar{U} : la vitesse moyenne du liquide dans la section considérée, en mètres par seconde, g l'accélération de la pesanteur en mètres carré par seconde et k un coefficient de pertes de charge singulières sans dimension

dépendant de la nature du point singulier dont il s'agit.

Parallèlement aux pertes de charge linéaires, ce type de pertes par accidents dépend du débit, du diamètre et de la vitesse d'écoulement.

- Une augmentation de débit provoque une augmentation des pertes de charge singulières ;

- Une augmentation de diamètre des pièces spéciales employées (Té, coude, orifice de vanne) entraîne une diminution des pertes de charge. Le coefficient K est donné ci-après pour les divers cas les plus courants.

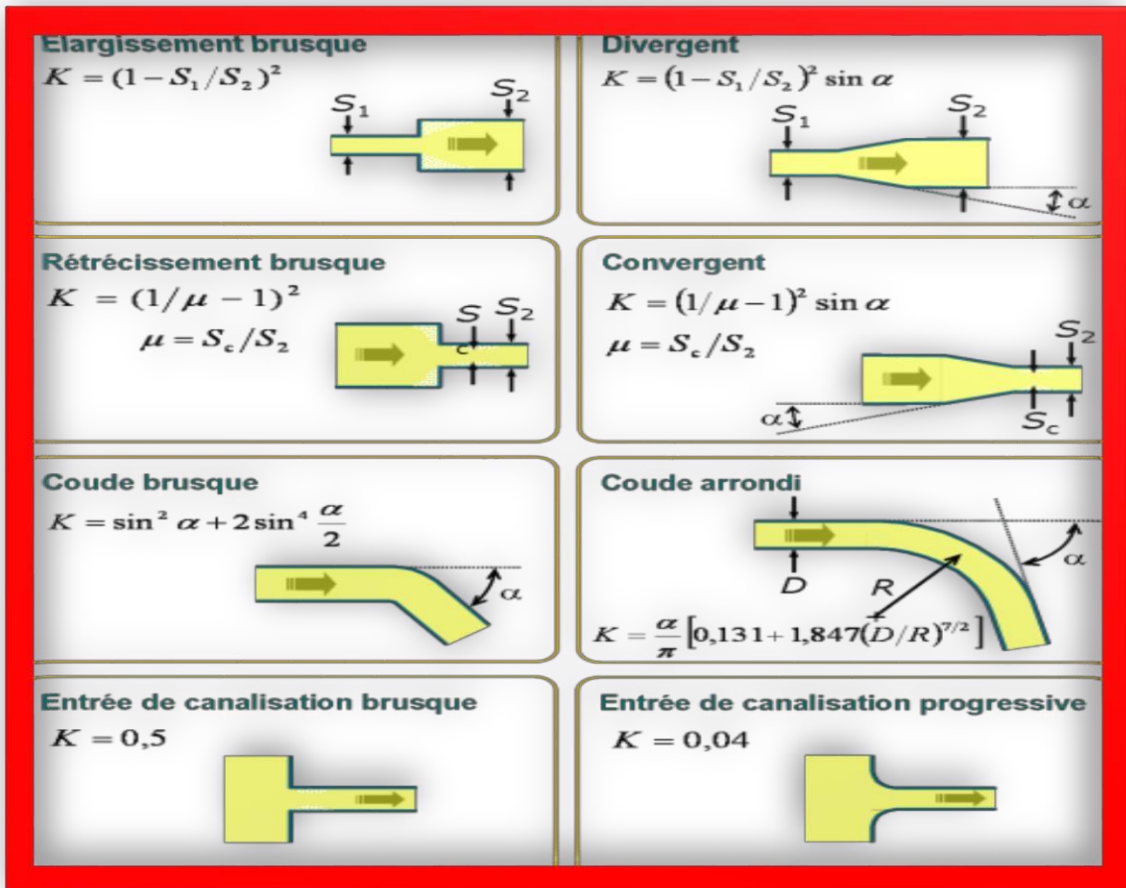


Figure 12: Valeurs de coefficient K pour les divers cas les plus courants.

6.6 Conduites non-cylindriques et diamètre hydraulique

Les équations 31 et 32 définissent le nombre de Reynolds pour un écoulement dans une conduite cylindrique. Il arrive souvent que les conduites ne le soient pas comme par exemple les conduites rectangulaires, dans ces cas-là, il est tout de même fondamental de pouvoir calculer Re. Pour cela, pour une conduite de forme quelconque, on définira un «pseudo-diamètre» appelé diamètre hydraulique et noté D_h . On peut ainsi calculer ce diamètre via l'expression suivante:

$$R_h = S / P \dots\dots\dots(41)$$

Où

S est la surface de la section de passage du fluide et P le périmètre mouillé de cette section.

Pour une section quelconque:

$$R_h = \frac{\pi D^2}{4\pi D} = \frac{D}{4} \rightarrow D = 4R_h \dots\dots\dots(42)$$

En introduisant D dans formule de Darcy – Weisbach, on obtient une expression applicable à une conduite de section quelconque:

$$\Delta h_L = \frac{\lambda L \bar{U}^2}{4R_h 2g} = \frac{\lambda L}{8R_h g} \bar{U}^2 = \frac{\lambda L}{128\pi^2 g R_h^5} Q^2 \dots\dots\dots(43)$$

6.7 Conduites en série et en parallèles

6.7.1 Conduites en série

Les conduites en série sont traversées par le même débit. La perte de charge totale étant la somme des pertes de charge linéaires et singulières:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_i = Q_n = Q \dots\dots\dots(44)$$

$$\Sigma \Delta h = \Sigma \Delta h_1 + \Sigma \Delta h_2 + \Sigma \Delta h_i + \Sigma \Delta h_n \dots\dots\dots(45)$$

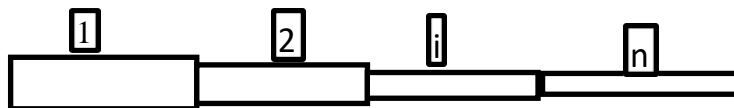


Figure 13: Conduites en série

$$\Sigma \Delta h = \Sigma \Delta h_1 + \Sigma \Delta h_2 + \Sigma \Delta h_i + \dots \Sigma \Delta h_n = \underbrace{(R_1 + R_2 + R_i + \dots R_n)}_{\Sigma R_i} Q^2 \dots\dots(46)$$

$\frac{R_1 Q^2}{2} \quad \frac{R_2 Q^2}{2} \quad \frac{R_i Q^2}{2} \quad \frac{R_n Q^2}{2}$

6.7.2 Conduites en parallèles

Les conduites en parallèles ont la même perte de charge. Le débit total traversant toutes les conduites est la somme des débits:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q \dots\dots\dots(47)$$

$$\Sigma \Delta h = \Sigma \Delta h = \Sigma \Delta h = \frac{P_M - P_N}{\rho g} \dots\dots\dots(48)$$

$\frac{1}{1} \quad \frac{2}{2} \quad \frac{3}{3}$

$$\Sigma \Delta h_1 = R_1 Q_1^2 \quad ; \quad \Sigma \Delta h_2 = R_2 Q_2^2 \quad ; \quad \Sigma \Delta h_3 = R_3 Q_3^2 \dots\dots\dots(49)$$

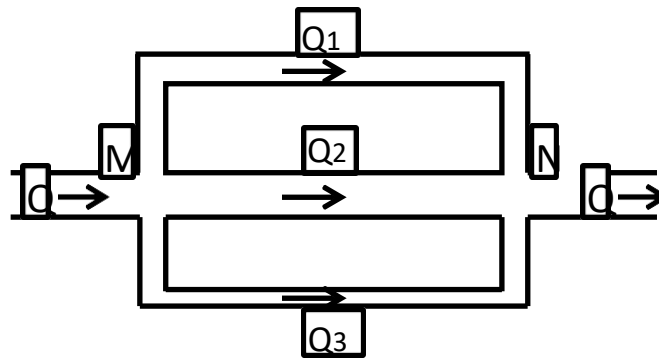


Figure 14: Conduites en parallèles

6.8 Conduites équivalentes

6.8.1 Notion de longueur droite équivalente

Il existe une façon plus simple de calculer la perte de charge engendrée par une singularité. C'est la méthode des longueurs droites équivalentes. Soit une singularité sur le réseau. Celle-ci cause une perte de charge singulière (ΔH_s). La longueur droite équivalente est une longueur que devrait avoir une conduite fictive (de même diamètre D que la conduite qui porte la singularité) pour entraîner la même perte de charge singulière. Les constructeurs fournissent très souvent la valeur (Le) des éléments de canalisation (coudes, vannes, Té, robinet, . .) qu'ils construisent. C'est pour cela que la méthode des longueurs droites équivalentes est très employée. Le tableau 6 met en exergue les valeurs du rapport Le/D pour certaines singularités. Afin de déterminer la perte de charge du réseau, il suffira donc d'ajouter les longueurs droites de conduites aux longueurs droites équivalentes des singularités.

Tableau 6: Longueur droite équivalente pour quelques singularités

Singularité	Le/D
Robinet à soupape normal	400
Robinet à soupape d'équerre	200
Vanne à passage direct (à boule)	9
Coude à 180° à brides	18
Coude à 90° à brides	13
Coude à 90° taraudé	40
Singularité Le/D	18

6.9 Système de distribution en eau potable

Le système d'AEP est composé de plusieurs éléments principaux :

- Ressource en eau : eau souterraine (puits, source, forage) ou eau de surface (barrage, rivière, mer) ;
- Station de pompage
- Station de potabilisation ;
- Conduite d'adduction ou conduite de transfert ;
- Ouvrage d'accumulation comme les réservoirs d'eau ;
- Réseau de distribution d'eau potable.

Un réseau de distribution est composé de tronçons délimités par des nœuds (points particuliers: réservoir, croisement de conduites, prélèvements importants, changement de diamètre, extrémité du réseau, vanne,...).

6.9.1Réseau ramifié

Le réseau ramifié est caractérisé par la circulation de l'eau, dans toute la canalisation, dans un seul sens (des conduites principales vers les conduites secondaires, vers les conduites tertiaires,...). De ce fait, chaque point du réseau n'est alimenté en eau que d'un seul côté.

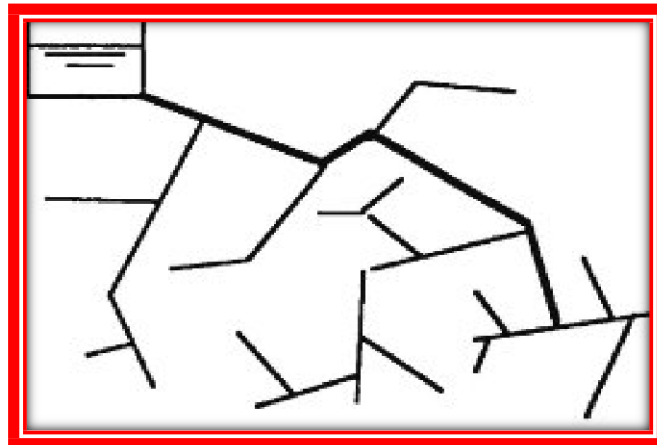


Figure 15: Réseau ramifié

Chaque tronçon de la canalisation d'AEP est caractérisé par deux débits:

- Un débit d'extrémité qui doit transiter par la conduite et noté Q_t ;
- Et un débit consommé par les branchements raccordés à la conduite, appelé débit en route noté Q_r . Ce dernier est supposé uniformément réparti le long de la conduite.

6.9.1.1Débit de calcul

On calcule alors la conduite de distribution d'eau potable (perte de charge et vitesse) comme si elle débitait un débit constant de $Q_t + 0,55 Q_r$;

Pour ne pas avoir des vitesses très différentes des vitesses réelles de l'écoulement, on limite la longueur d'un tronçon de calcul à 1000 m ;

L'utilisation de la valeur du débit fictif (Q_c), supposé constant, reviendrait à remplacer le débit Q_r consommé par les abonnés situés tout le long de la conduite par deux grands consommateurs: le premier, situé au nœud amont A, qui consommerait $0,45.Q_r$ et le second, situé au nœud aval B, et qui consommerait $0,55.Q_r$;

Le calcul du réseau ramifié se fait en partant de l'extrémité aval du réseau et en remontant de proche en proche jusqu' au réservoir ;

- 1- Calcul de Q_r , de Q_t et ensuite Q_c par $(Q_t + 0,55 Q_r)$;
- 2- Choix du diamètre D qui permet d'écouler le débit Q_c avec une vitesse moyenne (entre 0,60 et 1,20 m/s). Le diamètre minimum étant 0,100 m (exceptionnellement 0,080 m) ;
- 3- Calcul de la perte de charge avec Q_c , en utilisant les abaques ;
- 4- Calcul de la charge hydraulique en chaque nœud et en déduire la pression au sol.

6.9.2 Réseau maillé

Ce réseau est constitué d'une série de tronçons disposés de telle manière qu'il soit possible de décrire une ou plusieurs boucles fermées en suivant son tracé: une telle boucle s'appelle une « maille ». Ce système qui présente de nombreux avantages par rapport au réseau ramifié s'adapte très bien au plan des agglomérations urbaines.

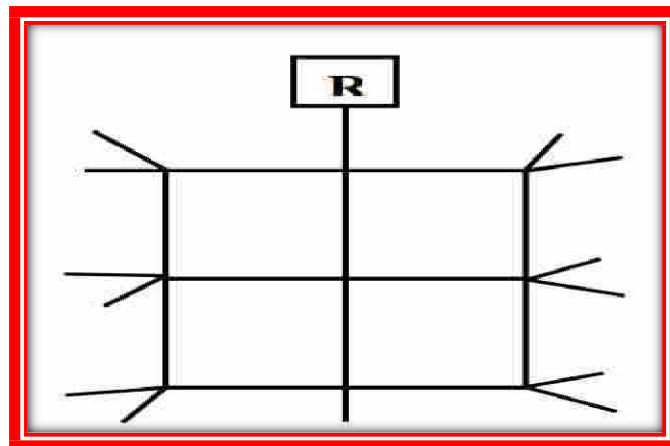


Figure 16: Réseau maillé

6.9.2.1 Principe de calcul d'un réseau maillé par la méthode de Hardy-Cros

Le calcul d'un réseau maillé est assuré par l'utilisation de la méthode d'Hardy-cross basée sur des approximations successives et qui repose sur deux lois, la loi des mailles et la loi des nœuds :

Loi des nœuds

Pour chaque nœud, la somme des débits qui y entrent est égale à la somme des débits qui en sortent.

Loi des mailles ou loi de la conservation de la charge

Le long d'un parcours fermé et orienté, la somme algébrique des pertes de charge est nulle (figure 12). Pour chaque maille, on se fixera une répartition arbitraire des débits ainsi qu'un sens d'écoulement, tout en respectant la première loi.

Le problème revient à résoudre le système d'équations suivant:

✓ Pour chaque nœud : $Q \text{ sortant} - Q \text{ entrant} = 0$ (51)

✓ Le long d'un contour fermé et orienté: $\Sigma \Delta h_{t,i} = 0$ (52)

Δh_i étant la perte de charge totale le long d'un tronçon i (m).

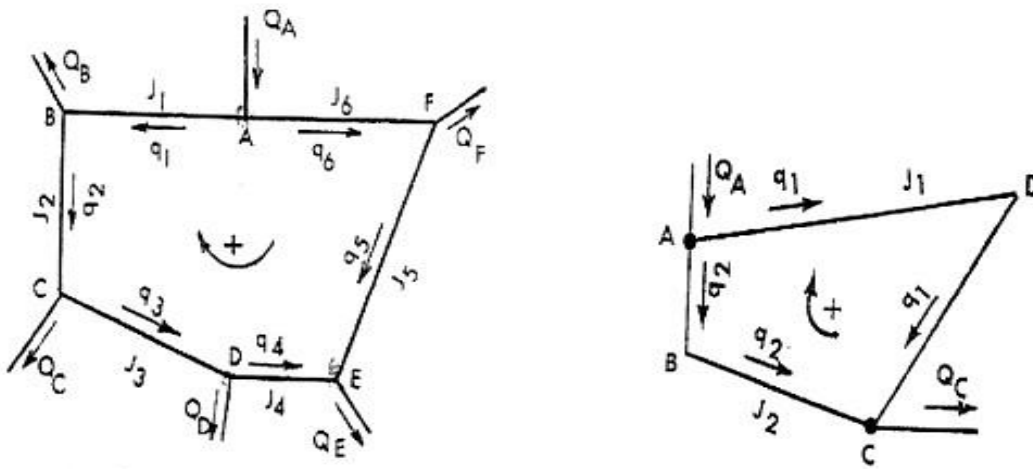


Figure 17: Principe de la méthode de Hardy-Cross

La méthode de Hardy Cross consiste, tout d'abord, à se fixer une répartition provisoire des débits ainsi qu'un sens d'écoulement dans tout le réseau, tout en respectant la première loi. Cette première répartition permet de choisir d'une manière provisoire les diamètres des canalisations, (avec des vitesses entre 0,60 et 1,20 m/s) et de calculer les pertes de charge correspondantes.

Soit ΔH_T la perte de charge totale dans un tronçon quelconque de la maille. Elle est reliée au débit Q qui y passe:

$$\Delta H_T = R \cdot Q^2 \text{(53)}$$

Avec R : résistance hydraulique de la conduite

Le principe d'équilibre des pertes de charge se traduit par :

$$\Sigma \Delta H_T = \Sigma R \cdot Q^2 = 0 \text{(54)}$$

Le symbole Σ représente la somme algébrique de toutes les pertes de charge dans une maille formée par des tronçons véhiculant chacun le débit Q_i .

Le débit supposé (Q') diffère du débit réel à l'équilibre (Q) d'une quantité Δq , qui représente la correction à apporter au débit arbitraire Q' pour satisfaire au principe d'équilibre des pertes de charge. D'où l'équation :

$$Q = Q' + \Delta q \dots \dots \dots (55)$$

Δq étant exprimé en valeur algébrique.

L'application de la formule (4) donne alors:

$$\Sigma \Delta H_T = \Sigma R \cdot Q_i^2 = \Sigma (Q' + \Delta q)^2 = 0 \dots \dots \dots (56)$$

Δq est supposé petit par rapport à Q' , donc on peut dans le développement de la formule (56), négliger les infiniment petits et on a :

$$\Delta q = - \frac{\Sigma \Delta H}{2 \Sigma \frac{\Delta H}{Q}} \dots \dots \dots (57)$$

Rappelons que les débits positifs, par rapport à l'orientation choisie, seront corrigés par Δq , affecté de son signe, alors que les débits négatifs seront corrigés par Δq multiplié par (-1).

Si, pour les nouveaux débits, la deuxième loi n'est toujours pas vérifiée, il faudra de nouveau corriger les débits. Ainsi, on se rapprochera de zéro pour la somme algébrique des pertes de charge du contour. Dans le cas de deux mailles adjacentes, la conduite commune sera affectée par les deux corrections des débits calculées pour les deux mailles, affectées de leurs signes respectifs.

6.10 Interconnexion de réservoirs

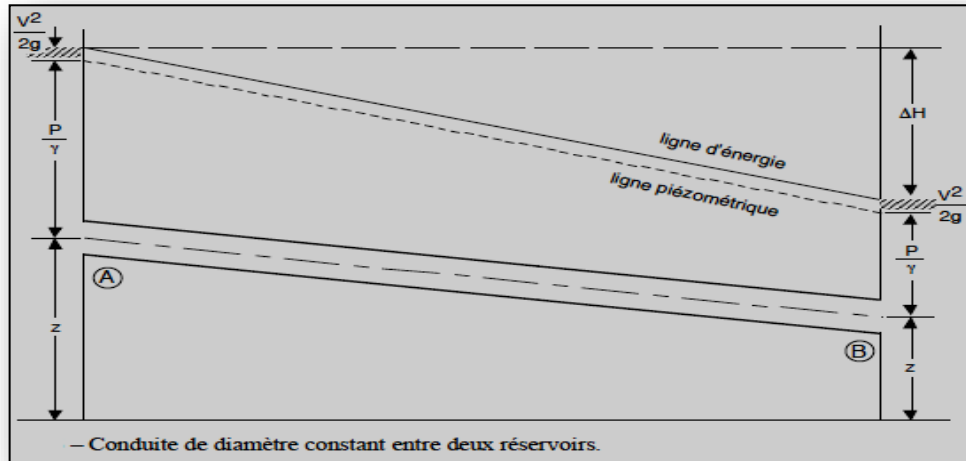


Figure 18: Conduite de diamètre constant entre deux réservoirs

$$\left. \begin{aligned} H_A &= \frac{p_A}{\rho g} + z_A + \frac{v_A^2}{2g} \\ H_B &= \frac{p_B}{\rho g} + z_B + \frac{v_B^2}{2g} \end{aligned} \right\} \longrightarrow H_A - H_B = \Delta h = \lambda \frac{v^2 L}{2gD} = \lambda \frac{8Q^2 L}{\pi^2 gD^5}$$

$$\Rightarrow Q = \pi \sqrt{\frac{g(H_A - H_B)}{8 \frac{\lambda L}{D^5}}}$$

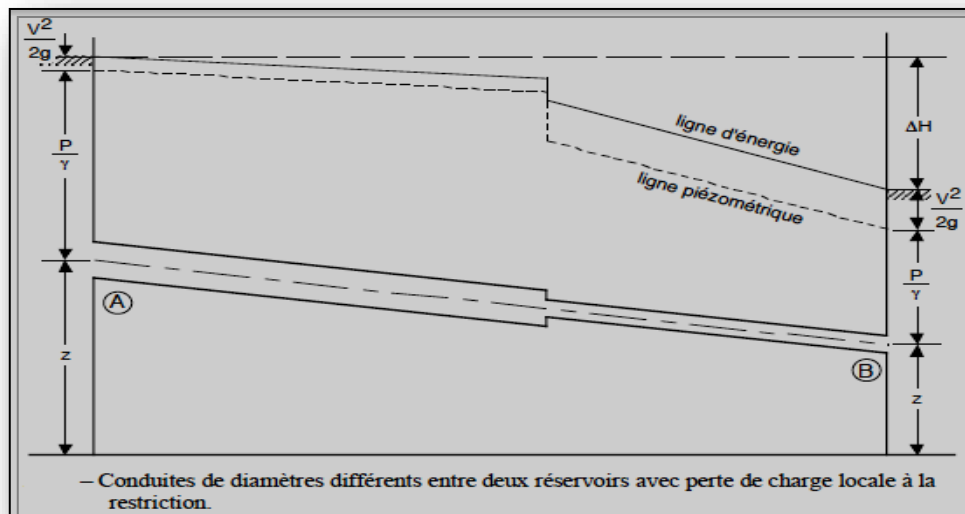


Figure 19: Conduites de diamètres différents entre deux réservoirs avec une perte de charge à la restriction

$$\left. \begin{aligned} H_A &= \frac{p_A}{\rho g} + z_A + \frac{v_A^2}{2g} \\ H_B &= \frac{p_B}{\rho g} + z_B + \frac{v_B^2}{2g} \end{aligned} \right\} \longrightarrow H_A - H_B = \Delta h = \frac{8}{\pi^2 g} \left(\frac{\lambda L_1}{D_1^5} + \frac{\lambda L_2}{D_2^5} + \frac{k}{D_2^4} \right) Q^2$$

$$Q = \pi \sqrt{\frac{g(H_A - H_B)}{8 \left(\frac{\lambda L_1}{D_1^5} + \frac{\lambda L_2}{D_2^5} + \frac{k}{D_2^4} \right)}}$$

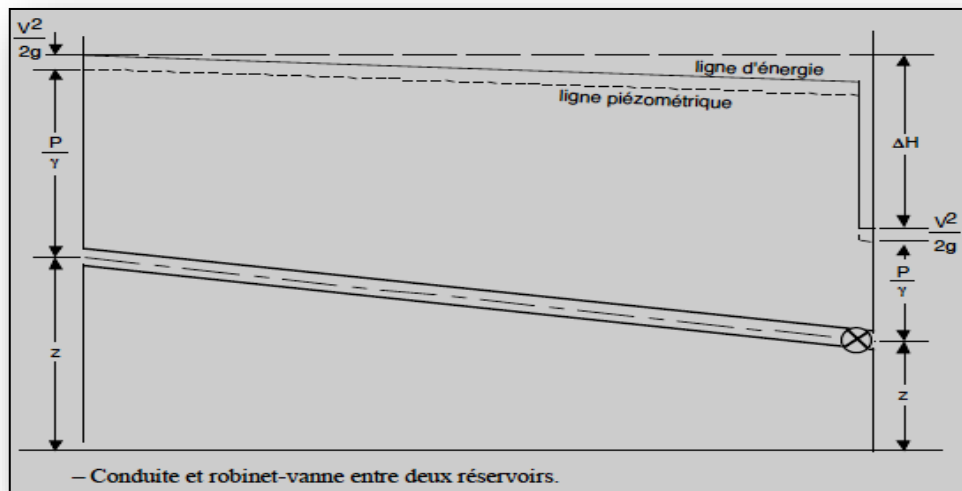


Figure 20: Conduite de diamètre constant et robinet vanne entre deux réservoirs

$$\left. \begin{aligned} H_A &= \frac{p_A}{\rho g} + z_A + \frac{v_A^2}{2g} \\ H_B &= \frac{p_B}{\rho g} + z_B + \frac{v_B^2}{2g} \end{aligned} \right\} \longrightarrow H_A - H_B = \Delta h = \frac{8}{\pi^2 g} \left(\frac{\lambda L}{D^5} + \frac{k}{D^4} \right) Q^2$$

$$\Rightarrow Q = \pi \sqrt{\frac{g(H_A - H_B)}{8 \left(\frac{\lambda L}{D^5} + \frac{k}{D^4} \right)}}$$

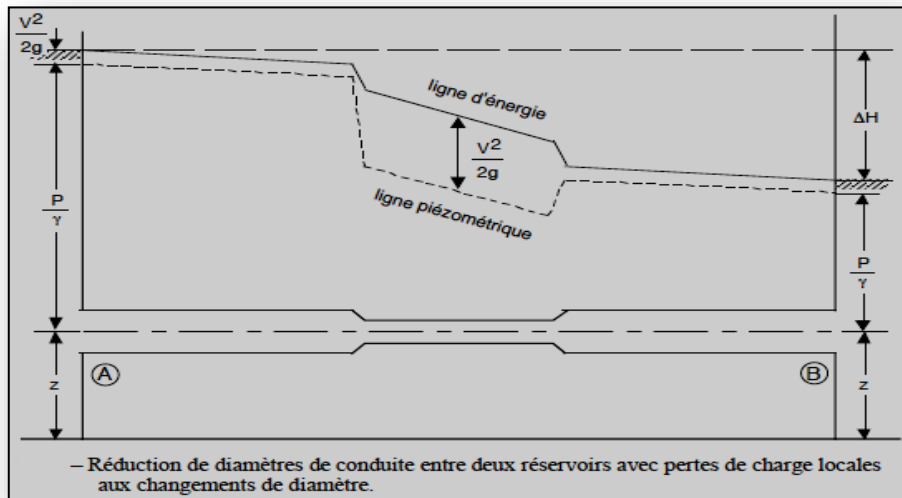


Figure 21: Réduction de diamètre de conduite entre deux réservoirs avec pertes de charge locales aux changements de diamètre

$$\left. \begin{aligned} H_A &= \frac{P_A}{\rho g} + z_A + \frac{v_A^2}{2g} \\ H_B &= \frac{P_B}{\rho g} + z_B + \frac{v_B^2}{2g} \end{aligned} \right\} \longrightarrow H_A - H_B = \Delta h = \frac{8}{\pi^2 g} \left(\frac{\lambda L_1}{D_1^5} + \frac{\lambda L_2}{D_2^5} + \frac{\lambda L_3}{D_1^5} + \frac{k_1}{D_2^4} + \frac{k_2}{D_1^4} \right) Q^2$$

$$Q = \pi \sqrt{\frac{g(H_A - H_B)}{8 \left(\frac{\lambda(L_1 + L_3)}{D_1^5} + \frac{\lambda L_2}{D_2^5} + \frac{k_1}{D_2^4} + \frac{k_2}{D_1^4} \right)}}$$

6.11 Puissance de pompage

Considérons un réseau muni d'une pompe, celle-ci communique au liquide pompé à une charge manométrique totale (HMT) en mètre. Le débit de liquide est Q_v en m^3/s . Il est possible de calculer la puissance hydraulique fournie par la pompe au fluide et on la note P_h . On a ainsi :

$$P_h = Q_v \cdot \rho \cdot g \cdot HMT \dots \dots \dots (62)$$

L'unité de la puissance hydraulique P_h est le joule par seconde (J/s) ou watt (W).

La puissance P_a absorbée par la pompe (en Joules/s ou en Watts) est égale au travail effectué par la pompe, pendant l'unité de temps, pour élever le débit d'eau Q_v (en m^3/s) à une hauteur HMT (en m). Cette puissance est donnée par:

$$P_a = Q_v \cdot \rho \cdot g \cdot HMT / \eta \dots \dots \dots (63)$$

Où

η est le rendement de la pompe, g est l'accélération de la pesanteur (= 9,81 m^2/s) et ρ est la masse volumique de l'eau (1000 Kg/m^3).

6.12 NPSH disponible

NPSH est l'abréviation anglo-saxonne de «Net Positive Suction Head», ce qui se traduit en français par : «Charge Totale Nette d'Aspiration» au-dessus de la pression de vapeur saturante. La capacité d'aspiration NPSH est la charge absolue à l'aspiration (en m). Elle est définie par la relation suivante:

$$NPSH_{disponible} = \frac{P_A}{\rho g} + \frac{U_A^2}{g} - \frac{P^0}{\rho g} \dots \dots \dots (64)$$

Où

P_A est la pression du fluide à l'aspiration de la pompe, U_A la vitesse moyenne du fluide dans la conduite d'aspiration et P^0 la pression de vapeur saturante du fluide (à la température à laquelle se trouve le fluide).

6.13 NPSH requis

Pour chaque pompe, il y a un NPSH minimal en-dessous duquel la cavitation apparaît. C'est ce qu'on appelle le NPSH requis. D'une autre façon il représente la hauteur minimum de liquide (supposé à sa température d'ébullition), nécessaire au-dessus de l'aspiration, afin d'empêcher cette cavitation.

Il dépend:

- ✓ Du type de pompe ;
- ✓ Du point de fonctionnement.

Il est donné par le fabricant de la pompe sous la forme d'une courbe donnant le NPSH requis (en mètre de liquide) en fonction du débit. Exprimé ainsi (en mètres de liquide), le NPSH est

indépendant de la nature du liquide pompé. Il est toujours positif et généralement de quelques mètres (2 à 5 mètres).

Pratiquement, pour qu'une pompe puisse fonctionner normalement (sans cavitation), il faut calculer le NPSH disponible et vérifier qu'il est bien supérieur au NPSH requis. Une pompe fonctionne dans des conditions d'aspiration d'autant meilleures que la différence (NPSH disponible – NPSH requis) est grande. Généralement on prend une marge de sécurité supplémentaire de 0,5 mCL et donc d'avoir:

$$NPSH_{disponible} \succ NPSH_{requis} + 0,5 \dots \dots \dots (65)$$

6.14 Diamètre économique

Du point de vue économique, la conduite de refoulement et la station de pompage sont liées. Pour élever un débit Q à une hauteur Hg donnée, on peut, a priori, employer une canalisation de diamètre quelconque, il suffit de faire varier la puissance de la station de pompage. En effet, plus le diamètre est petit, plus la perte de charge sera grande, plus la puissance fournie par la pompe est grande. Il existe donc un diamètre économique pour la conduite de refoulement résultant d'un compromis entre les deux tendances contradictoires suivantes:

- Les frais d'achat et de pose de la conduite (Fa) qui augmentent quand le diamètre de la conduite augmente ;
- Les frais de fonctionnement de la station de pompage (Fe) qui décroissent quand le diamètre augmente, par suite de la diminution de la perte de charge.

On peut ainsi dire que le diamètre optimal (le plus économique) est alors donné par les dépenses totales minimales (Fa + Fe actualisé).

6.15 Instruments de mesure des fluides

6.15.1 Mesure des densités des fluides

6.15.1.1 Balance de Westphal

Cet instrument a d'abord été décrit en 1832 par le chimiste allemand Carl Friedrich Mohr. C'est un équilibre avec deux bras, où l'équilibre est atteint en ajoutant du poids sur un plateau. Ce type d'instrument a été modifié par G. Westphal qui a remplacé le plateau avec un contrepoids réglable.

La balance de Westphal est utilisée pour la détermination de la densité des liquides .Elle est munie d'un plongeur en verre de volume V et d'une série de cavaliers de valeurs M . L'un des cavaliers de masse M , disposé avec le plongeur à l'extrémité du fléau, s'oppose exactement à la poussée d'Archimède exercée par l'eau pure sur ce plongeur.



Figure 22: Balance de Westphal complète - Circa (1910)

En effet, si $V = X$ en cm^3 , $M = X$ en g.

Ce premier cavalier de masse M , doit être systématiquement disposé à l'extrémité du fléau lorsque le plongeur est immergé dans un liquide plus lourd que l'eau.

Ce dernier est souvent muni d'un thermomètre permettant de repérer la température lors de la mesure.

6.15.1.2 Densimètre (Aréomètre)

Les densimètres ou aréomètres fonctionnent suivant le principe d'Archimède et destinés à mesurer la densité d'une solution, pour en déterminer la concentration (acide, alcool, sirop, etc.). Ils sont constitués d'une partie renflée et lestée, surmontée d'une tige graduée. Plongé dans un liquide, il flotte verticalement et s'enfonce d'autant plus que le liquide est moins dense.

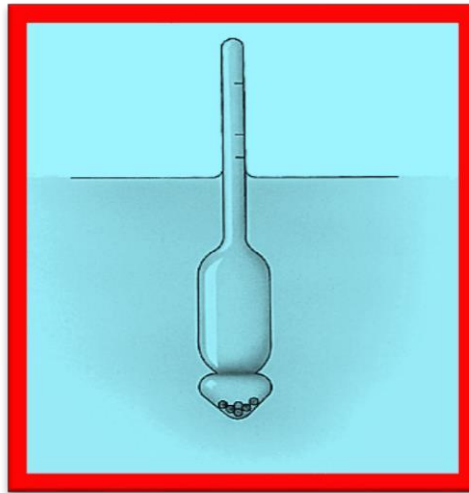


Figure 23: Densimètre

Dans les aréomètres à volume constant, le volume immergé est constant, mais le poids peut être augmenté ou diminué.

Dans les aréomètres à poids constant, beaucoup plus utilisés, le volume immergé et donc la hauteur de la tige au-dessus du liquide varie avec la densité du liquide.

Les densimètres sont gradués directement en densité, et les traits de la graduation ne sont pas régulièrement espacés.

6.15.1.3 Tube en U

Dans un tube en U de section constante S , on verse un volume $V = S L$ de liquide (L est donc la longueur de la partie du tube contenant le liquide). Au repos, la théorie des vases communicants oblige, le liquide est au même niveau dans les deux branches; ce niveau sera pris comme origine des altitudes.

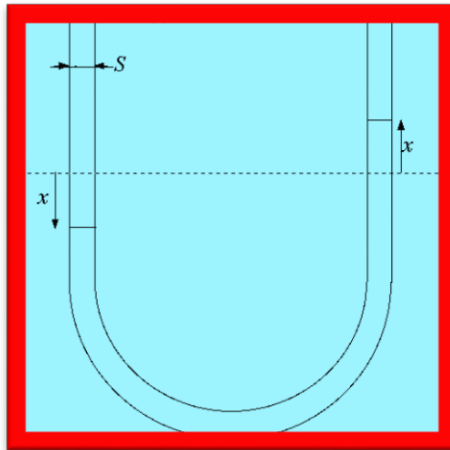


Figure 24: Tube en U

On provoque des oscillations de sorte que le niveau s'élève algébriquement de $x(t)$ dans la branche droite et donc s'abaisse de la même quantité dans la branche gauche. On n'oublie pas pour l'instant les phénomènes dissipatifs, c'est à dire la viscosité. On note la masse volumique du liquide.

La méthode du tube manométrique consiste à verser dans l'une des deux branches du tube en U contenant déjà un liquide de masse volumique connue, une quantité du liquide de masse volumique inconnue et à mesurer la dénivellation h présentée dans la figure N°25 ci-dessous.

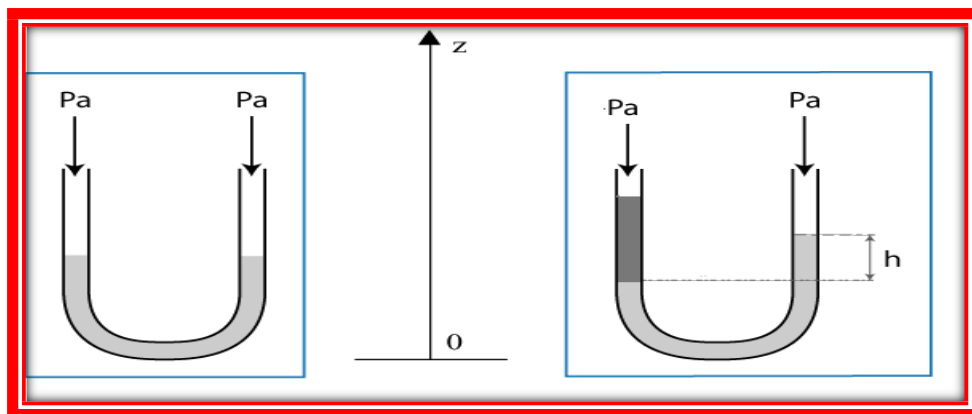


Figure 25: Instrument de mesure de densité

En appliquant le principe des vases communicants, on peut déterminer la masse volumique du liquide étudié par l'équation suivante:

$$\rho = \rho_0 h_0 / h \dots\dots\dots(66)$$

La densité du liquide en question sera déterminée de la même manière précédente.

6.15.1.4 Viscosimètres rotatifs

Dans ce groupe, on retrouve les viscosimètres de MacMichael et de Stormer. Ces instruments sont constitués de deux cylindres concentriques dans l'espace entre eux est rempli du liquide considéré. L'essai repose sur l'expérience de Couette.

6.15.1.5 Expérience de Couette

On considère un fluide remplissant l'espace délimité par les surfaces solides de deux cylindres de même axe. On met le cylindre extérieur en rotation avec une vitesse angulaire constante. Le cylindre intérieur, initialement fixe se met à tourner dans le même sens. Le fluide en contact avec le cylindre extérieur va y adhérer et par conséquent va être animé de la vitesse V du cylindre extérieur.

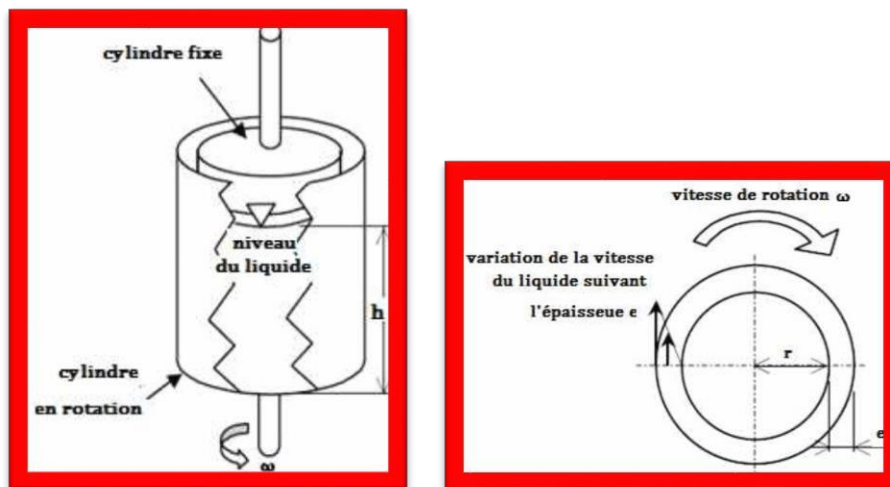


Figure 26: Viscosimètre de rotatif

Le fluide en contact avec le cylindre fixe aura une vitesse nulle et la viscosité fait naître une force de frottement.

6.15.1.6Viscosimètre de saybolt

Cet instrument fonctionne d'après le principe d'écoulement (vidange) non permanent et laminaire d'un liquide de volume fixe à travers un orifice. Le temps de vidange permet de mesurer la viscosité dynamique.

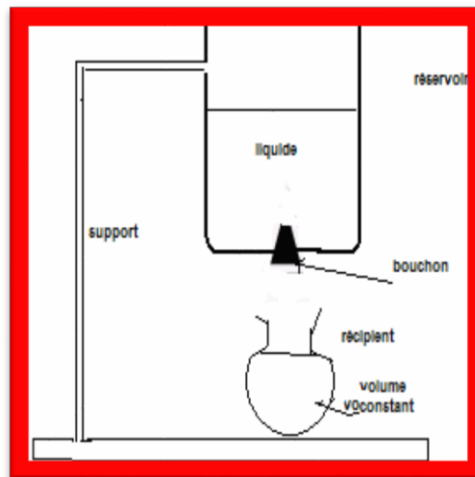


Figure 27: Viscosimètre de saybolt

6.15.1.7Viscosimètre Engler

L'appareil est constitué par une cuve métallique jaugée comportant à son point bas un orifice calibré, fermé par un pointeau. Des repères placés dans la cuve permettent de la remplir toujours de la même façon. La température de la cuve et celle du liquide qu'elle contient sont maintenues constantes, à 20 C, grâce à un bain-marie. Pour faire une mesure de viscosité, on enlève le pointeau et on mesure le temps d'écoulement du liquide. Le viscosimètre a été étalonné avant sa mise en service avec de l'eau distillée, dont le temps d'écoulement a été mesuré dans les mêmes conditions. Le rapport entre le temps d'écoulement du liquide étudié et celui de l'eau distillée donne la mesure de la viscosité en degrés Engler.

6.15.1.8Viscosimètre d'Ostwald

Le viscosimètre d'Ostwald, nommé par Wilhelm Ostwald, est un viscosimètre à capillaire composé d'un tube en U à rayon variable. Dans une des branches verticales du U, se trouve en hauteur une partie plus large en forme de bulbe qui est directement suivi par un capillaire. Le tube reprend sa largeur standard puis effectue la partie courbée du tube. Dans l'autre branche

verticale, on trouve un second bulbe, plus large encore, mais, cette fois, situé dans la partie inférieure.

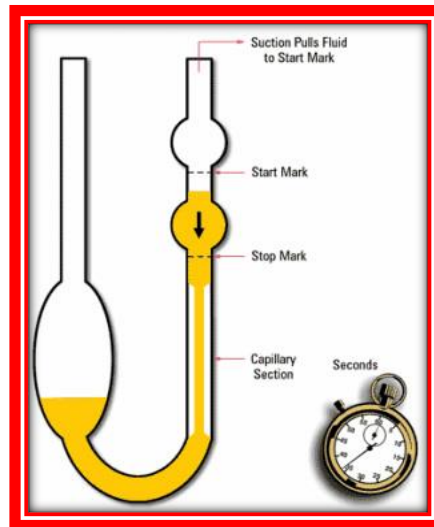


Figure 28: Viscosimètre d'Ostwald

Ce type de viscosimètre mesure le temps d'écoulement (t) d'un volume V de liquide à travers un tube capillaire, (uniquement des liquides Newtoniens sont utilisés), puis on déduit que la viscosité cinématique ν est proportionnelle à la durée t .

- Si on connaît la constante de l'appareil (K) fournie par le constructeur :

$$\nu = K \cdot t \dots \dots \dots (67)$$

- Si on ne connaît pas cette constante, on la détermine préalablement à l'aide de l'eau.

6.15.1.9 Viscosimètre à chute de bille (viscosimètre d'Hoepler)

La mesure directe du temps t permet de caractériser la viscosité, c'est le temps nécessaire pour permettre à une bille d'air de parcourir une distance donnée dans un tube de diamètre connu. Ce temps en secondes peut ensuite être converti en Stokes. On utilise des tubes de référence de viscosité connue pour une méthode comparative avec une désignation alphabétique. Ils couvrent le domaine de viscosité de 0,005 à 1000 Stokes. Une bille sphérique tombe lentement dans un tube bien calibré renfermant le liquide visqueux. On mesure la durée t que met la bille pour parcourir une certaine distance. On montre que la viscosité dynamique η est proportionnelle à la durée t :

$$\eta = K \cdot t \dots \dots \dots (68)$$

6.16 Mesures des pressions statiques et totales

6.16.1 Manomètre

Cet instrument est utilisé pour mesurer la pression relative, absolue et différentielle de justesse avec élément au ressort tubulaire, à la membrane, à la capsule et au soufflet.



Figure 29: Manomètre

Les manomètres peuvent être équipés avec des accessoires électriques et électroniques et combiné avec des séparateurs de pression dans les plus différentes exécutions.

Des mesureurs électroniques de pression existent aussi: transducteurs pressostats et transmetteurs pour pression relative, absolue et différentielle. Le matériel avec lequel est construit peut être: ligue de cuivre, acier dans les différentes exécutions ou dans les cas spéciaux, matériels spéciaux.

La pression de procès est toujours mesurable en relation à une pression de référence. Cette dernière est appelée la pression atmosphérique et donc le manomètre indique tout ce qu'il est supérieur ou inférieure à cette pression.

6.16.2 Micro-manomètre

Il est utilisé pour la mesure rapide et précise de la pression différentielle. La pression différentielle (Pa) est montrée en mbar ou en mmH₂. Dans ce cas la température du milieu est prise en compte, ainsi que la pression ambiante effective et l'humidité.



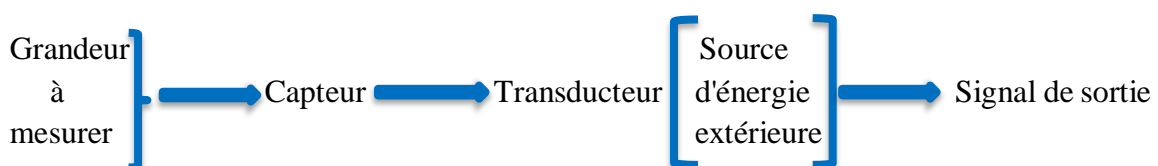
Figure 30: Micro-manomètre

Le micro-manomètre de pression différentielle se caractérise par son usage universel comme un mesureur de pression relative et différentielle avec des possibilités de mesure du débit dans des conditions réelles (compensation de la température du milieu, l'humidité du milieu et la pression environnementale), et également la mesure du débit à travers des sections transversales de canaux variables. Cet instrument est donc parfait pour un usage dans l'industrie, les services et le laboratoire.

6.16.3 Capteurs de mesure

Un capteur est l'élément d'un appareil de mesure servant à la prise d'informations relatives à la grandeur à mesurer. Le capteur est l'élément capital et le premier maillon d'une chaîne de mesure. Il a pour rôle de saisir et de transformer la grandeur physique à mesurer (ou mesurande) et le contenu de son information en une autre grandeur physique accessible aux sens humains ou aux maillons suivants de la chaîne d'acquisition. Cette transformation nécessite généralement un apport d'énergie extérieure au système. Parmi ces capteurs, on peut citer ce qui suit: mesures et capteurs de pression, mesures et capteurs de débits et mesures et capteurs de niveau.

Schéma de principe :



Par simplification, l'ensemble est appelé «capteur».

6.17 Procèdes de conversion

6.17.1 Conversion par variation de résistance

La résistance d'un conducteur est donnée par la relation suivante:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \dots\dots\dots (69)$$

Où

- R: la résistance en Ω ;
- ρ : la résistivité du conducteur en $\Omega \text{ m}$;
- l : la longueur du conducteur en m ;
- S: la section du conducteur en m^2 .

6.17.1.1 Principe de fonctionnement

La piste résistive est placée sur la partie fixe du capteur et le mouvement mécanique à mesurer est accouplé à un curseur qui se déplace sur celle-ci. Ainsi, la résistance entre un point fixe et la partie mobile du potentiomètre dépend de la position à mesurer.

6.17.1.2 Avantages

- Utilisable sans conditionneur ;
- Signal de sortie élevé ;
- Possibilité d'adapter à une variation non linéaire.

6.17.1.3 Inconvénients

- Sensibilité aux vibrations ;
- Courte durée de vie.

6.17.2 Conversion par variation de capacité

6.17.2.1 Rappel de physique

Un condensateur est composé de deux conducteurs séparés par un isolant. La capacité d'un condensateur s'écrit:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{e} \dots\dots\dots(70)$$

Où:

- ε_0 : permittivité du vide = $8,85 \cdot 10^{-12}$;
- ε_r : permittivité relative de l'isolant ;
- S : surface en regard en m^2 ;
- e : épaisseur de l'isolant en m.

6.17.2.Principe de fonctionnement

La différence de pression entraîne la variation de l'épaisseur entre les conducteurs, d'où une variation de la capacité de la cellule. Dans le cas des capteurs de pressions différentielles, les pressions P1 et P2 sont transmises par l'intermédiaire d'une huile de silicone à la membrane déformable. Ceci engendre une variation de la capacité entre les armatures et la membrane déformable.

6.17.2.3Avantages

- Peu sensible aux accélérations ;
- Faible masse.

6.17.2.4Inconvénients

- Sensibilité à la température (sauf montage différentiel) ;
- Sortie haute impédance.

6.18 Mesure des contraintes visqueuses

6.18.1 Tube de Stanton

Stanton, Marshall et Bryant sont les premiers qui avaient utilisé le tube de Stanton, pour étudier la sous-couche laminaire d'un écoulement. Sa largeur est généralement beaucoup plus grande que sa hauteur, de sorte que le est effectivement bidimensionnel. L'instrument peut être étalonné dans des écoulements de cisaillement connus pour déterminer les effets de déplacement d, par exemple, en le plaçant dans un conduit dont les parois sont éloignées par rapport à la hauteur du tube. La friction de la peau (T_w) peut être déduite de la chute de

pression le long du conduit. En raison de la taille finie du tube. L'utilisation déclarée du tube de Stanton dans la littérature est rare et se limite entièrement aux flux d'air.

6.18.2 Tube de Preston

Le tube Preston est un moyen fiable et valide de mesurer le frottement local de la peau sur des surfaces lisses pour les flux d'air et d'eau. C'est un tube Pitot ordinaire monté directement sur le mur et assez petit pour se trouver dans la région de droit interne. Un tube de Preston est utilisé comme référence d'étalonnage pour le tube de Stanton.

Cummings et Kirby ont également utilisé un tube de Preston (tube de Pitot coudé) disposé à au contact de la paroi du conduit et face à l'écoulement. La vitesse de frottement est obtenue en recalant l'écart de pression mesuré (entre la pression totale et la pression statique) avec le modèle de calibration des tubes de Preston.

6.19 Mesures des niveaux

6.19.1 Niveau à glace

L'indicateur de niveau à glace comme le type LGG, est un appareil destiné à l'indication visuelle instantanée d'un niveau de liquide dans un réservoir. Il peut être équipé de voyants en verre transparent ou à réflexion ou de plaques mica. Pour le contraste clair/foncé, on se sert du principe de réfraction. Pour des pressions inférieures à 25 bars on utilise des indicateurs avec tube en verre.



Figure 31: Indicateur de niveau type LGG

6.19.1.1 Applications pour l'indicateur de niveau à glace

- Installations thermo-conductrices et installations de réfrigération ;
- Installations cryogéniques ;
- Chaudières à vapeur ;
- Industrie du procès: industrie chimique, pétrochimique, offshore, gazière, centrales électriques.

6.19.2 Détecteur résistif

Le détecteur de niveau résistif est utilisé pour le contrôle de niveau de liquides conducteurs (eaux usées, produits chimiques, eaux salées, etc.). L'équipement est auto-adaptatif ce qui veut dire que sa sensibilité s'ajuste automatiquement en fonction de la résistivité de l'eau. Il est configurable via des commutateurs DIP en face avant. Quatre sorties alarmes sont disponibles (niveau haut, trop plein, niveau bas, niveau très bas) pour la surveillance de remplissage ou de vidange. Le détecteur comporte aussi un relais de sortie et un inverseur. Le montage se fait sur rail Din ou par connecteur circulaire onze broches. La plage de fonctionnement est entre 220 Ω et 220 K Ω .



Figure 32: Détecteur résistif

6.19.3 Mesures de niveaux capacitifs

Un capteur de niveau capacitif est un organe de prélèvement d'information dans un dispositif capacitif. Un dispositif capacitif est constitué d'un boîtier contenant l'électronique qui est placé à l'extérieur du réservoir à mesurer. Il est lié à une électrode métallique protégée par une isolation plastique qui plonge dans le produit. L'électrode forme un condensateur avec la

paroi métallique du réservoir. Le produit constitue le diélectrique. La capacité du condensateur est ainsi en fonction du niveau du produit. Ce dispositif convient à la mesure et à la détection de niveau pour des produits conducteurs ou non.

La mesure du niveau d'un liquide contenu dans une cuve opaque peut être réalisée à l'aide de capteurs capacitifs. Deux cas sont à envisager selon que le liquide est électriquement isolant ou conducteur. Dans le cas d'un liquide isolant la variation de capacité est due au changement de diélectrique dans le condensateur formé de deux conducteurs métalliques.



Figure 33: Détecteur capacitif

Dans le cas d'un liquide conducteur, le condensateur est constitué d'un conducteur recouvert d'une fine couche d'un matériau isolant (diélectrique) ; le liquide joue alors le rôle de la seconde armature du condensateur (voir figure 33). La variation de la capacité résulte donc du changement de l'aire des armatures du condensateur.

6.20 Mesure des vitesses

Un anémomètre est un appareil qui permet de mesurer la vitesse du vent (du grec anemos = vent). Il existe différents types d'anémomètres utilisant des principes de fonctionnement divers et variés:

6.20.1 Sonde de Prandtl

Le tube Prandtl est utilisé pour mesurer les vitesses dans la direction axiale. Il se compose d'un corps en laiton doublé de flux creux de 19 mm de diamètre. Le tube Prandtl est constitué

de deux tubes coudés concentriques dont les orifices, en communication avec le fluide dont on veut mesurer la vitesse, sont disposés de façon particulière:

- Le tube extérieur s'ouvre perpendiculairement à l'écoulement du fluide. La pression à l'intérieur de ce tube 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. La pression à l'intérieur de celui-ci est donc la pression totale, somme de la pression statique et de la pression dynamique.

Un mesure de la différence de pression entre les deux tubes, c'est-à-dire la pression dynamique, et permet donc de calculer la vitesse d'écoulement du fluide autour du tube.

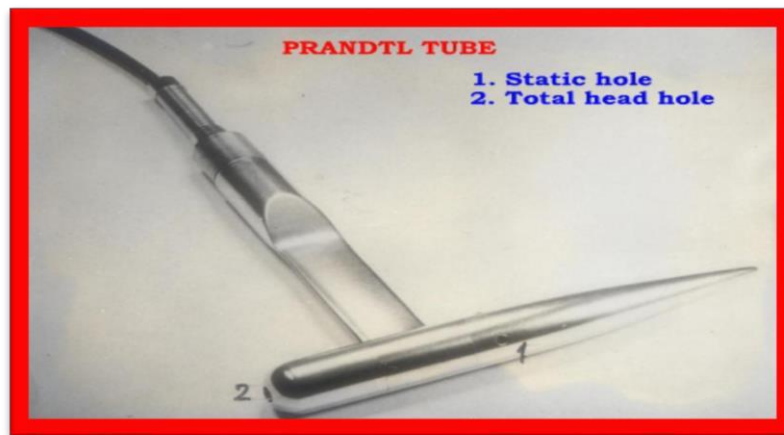


Figure 34: tube Prandtl

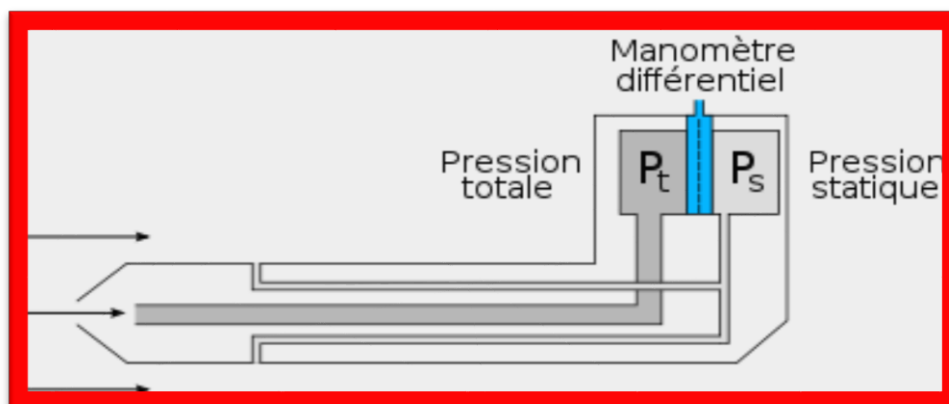


Figure 35: Sonde de Prandtl

La vitesse du vent U est déterminée par la mesure de la pression différentielle Δp à travers un manomètre lorsque la sonde de Prandtl est face à l'écoulement. Dans ce cas, la pression différentielle Δp est identique à la pression dynamique P_d :

$$\Delta P = P_d = P_{tot} - P_s \dots\dots\dots(71)$$

La vitesse du vent peut être calculée avec la formule suivante:

$$U = \sqrt{\frac{2}{\rho_{air}} P_d} = \sqrt{\frac{2}{1,2} P_d} \dots\dots\dots(72)$$

6.20.2 Anémomètres à coupelles

L'avantage principal de cet anémomètre est qu'il n'est pas nécessaire de fixer les coupelles dans la direction du vent de façon exacte. La direction du vent n'a aucune influence sur la mesure de la vitesse, puisque cet anémomètre capte le vent n'importe d'où.



Figure 36: Anémomètres à coupelles



Figure 37: Usage de l'anémomètre

6.20.3 Anémomètres à hélices

Le principe de mesure des anémomètres à hélice s'effectue par la détermination de la vitesse d'écoulement par une mesure de fréquence liée à la rotation de l'hélice. Ces anémomètres à hélice sont des capteurs très sensibles à pallier au diamant, dont l'ajustage est très précis. On obtient ainsi une grande précision de la mesure



Figure 38: Anémomètre à hélice

Un anémomètre à hélice normal a l'inconvénient qu'il n'est pas capable d'obtenir des mesures exactes que si l'hélice est fixée justement dans la direction du vent, comme le cas de l'anémomètre à coupelles.

6.20.3.1 Avantages

- Grande précision aux vitesses d'écoulement moyennes et aux températures ambiantes ;
- Insensible aux écoulements turbulents.

6.20.3.2 Inconvénients

- Capteur sensible aux sollicitations mécaniques, dépendant de la direction.

6.20.4 Anémomètres à fil chaud

L'anémométrie à fil chaud est une technique classique de mesure de la vitesse d'un fluide en un point, faiblement intrusive, de mise en œuvre relativement légère et assez bon marché. Son point fort est son excellente résolution spatiale et temporelle, qui en font la technique de choix pour l'étude des fluctuations turbulentes. Ses points faibles sont sa fragilité et la limitation de la mesure à une seule composante de la vitesse.



Figure 39: Anémomètre à fil chaud

Les anémomètres à fils chauds usuels sont constitués d'une fine fil d'environ 1 mm de long, de 1 à 10 μm de diamètre, tendu entre deux broches (figure 39). Les mesures sont effectuées le plus souvent dans des souffleries (écoulement d'air de l'ordre de 0,1 m/s à plusieurs centaines de m/s), mais aussi dans des veines d'essai hydrauliques (écoulement d'eau de l'ordre de 0,01 m/s à quelques m/s). Divers compromis entre résistivité, conductivité thermique et robustesse mécanique conduisent à privilégier pour le fil des matériaux comme le tungstène, le platine ou certains alliages.

6.20.5 Anémomètres à film chaud

Les anémomètres à fil ou film chaud vont donc permettre de déterminer les caractéristiques de vitesse locale d'un fluide.



Figure 40: Anémomètre à film chaud

6.21 Mesure des débits

Le débit est la quantité de matière ou de fluide, liquide ou gazeux, qui s'écoule par unité de temps. En pratique on distingue deux débits:

- Débit-masse ou débit massique Q_m qui s'exprime en kg/s ;
- Débit-volume ou débit volumique Q_v qui s'exprime en m^3/s .

Si ρ est la masse volumique du fluide (kg/m^3), on a la relation liant le débit-masse au débit volume:

$$Q_m = \rho \cdot Q_v \dots \dots \dots (73)$$

Les appareils mesurant le débit s'appellent débitmètres et les appareils qui mesurent le volume de fluide (quelle que soit la durée) ou la masse écoulée s'appellent des compteurs.

6.21.1 Diaphragme

Les diaphragmes sont constitués d'une plaque percée d'un trou calibré perpendiculaire à la conduite. La version habituelle est munie d'un chanfrein sur la partie aval d'un angle qui doit être compris entre 30 et 45° et d'une arête vive en amont de l'orifice. Le diamètre intérieur (d) doit être compris entre 0,20 et 0,80m selon le type du diaphragme, l'épaisseur de la partie

cylindrique e doit être comprise entre $0,005 D$ et $0,02 D$ et l'épaisseur totale E doit être comprise entre e et $0,05 D$.

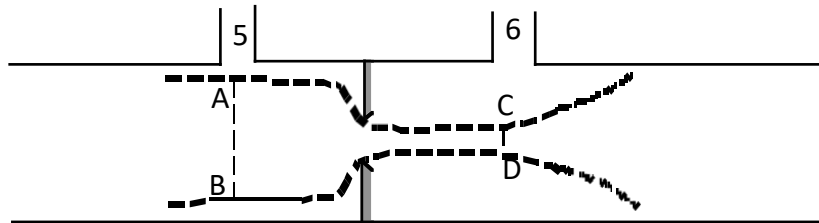


Figure 41: Lignes de courant au voisinage du diaphragme.

Les diaphragmes peuvent se mettre dans les deux sens de l'écoulement, et ils doivent être symétriques et doivent comporter des arêtes vives sur les deux faces.

La perte de charge de part et d'autre de la singularité est importante, cette perte de charge est due essentiellement aux frottements au sein du fluide causés par les tourbillons.

6.21.2 Tube de venturi

Le tube de venturi est un débitmètre à organes déprimogènes permettant de mesurer le débit d'un fluide placé sur une canalisation cylindrique de section A_1 , le venturi comporte successivement un premier tube tronconique, le convergent, suivi d'un tube cylindrique de section réduite A_2 puis d'un deuxième tube tronconique assez long, le divergent.

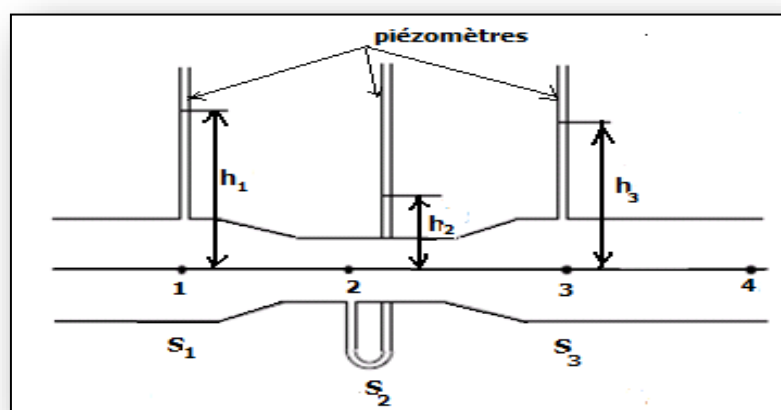


Figure 42: Tube de Venturi

Le fluide circulant dans la conduite passe dans un convergent avant d'atteindre un col de section inférieure à celle de la conduite, la vitesse de l'écoulement augmente dans ce convergent. Cette augmentation de vitesse correspond à une diminution de pression. En mesurant cette variation de pression, on peut donc déduire la valeur du débit de l'écoulement en appliquant le théorème de Bernoulli.

Après le col, le fluide passe dans un divergent, où il perd de sa vitesse et remonte en pression. Par l'application de l'équation de Bernoulli, nous pouvons déduire la valeur de débit Q:

$$Q = S_1 \cdot 2g \cdot \frac{h_2 - h_1}{(1 - S_1^2)S_2} \dots\dots\dots(74)$$

6.21.3Tuyère

Dans ce type d'orifice l'air est guidé jusqu'à la section de l'écoulement minimale qui coïncide avec la surface minimale de l'étranglement. Elle est constituée d'un col cylindrique précédé d'un convergent, elle est divisée en deux types:

6.21.3.1Tuyère ISA 1932

Le convergent est d'allure torique de plusieurs rayons, le col de diamètre d est de longueur 0,3.d (figure 42).

6.21.3.2Tuyère à long rayon

Elle comporte un convergent en quart d'ellipse et un col cylindrique.

- Pour $0,25 \leq \beta \leq 0,8$, on utilise la tuyère à grand rapport d'ouverture ;
- Pour $0,20 \leq \beta \leq 0,5$, on utilise la tuyère à petit rapport d'ouverture.

6.21.4Débitmètres à turbine

Le débitmètre à turbine est compatible avec de nombreux liquides même très légèrement visqueux. Il est destiné aux applications industrielles générales (eau, alcools, carburants, acides, gaz liquéfiés, liquides cryogéniques). L'écoulement du fluide entraîne la rotation d'une turbine dont la vitesse (proportionnelle à celle du fluide, donc au débit volumique total) est mesurée en comptant la fréquence de passage des ailettes. Chaque impulsion représente un volume de liquide distinct. Les débitmètres à turbine permettent des débits généralement plus élevés et moins de perte de charge que les débitmètres à déplacement positif.

Ils sont en general très précis et permettent d'obtenir une limite d'exactitude de $\pm 0.25\%$ à $\pm 1\%$ sur la valeur mesurée.

6.21.5 Rotamètre

Les rotamètres sont des appareils qui ont été et qui sont encore très utilisées pour les mesures de débit; le courant d'air à mesurer déplace un indicateur qui donne une lecture directe du débit. L'air s'écoule vers le haut à travers un tube tronconique vertical dans lequel s'élève un flotteur jusqu'à ce que le poids de ce dernier soit équilibré par la force exercée par le fluide. L'air de passage du fluide est constitué par l'espace annulaire entre le tube et le flotteur. La position de ce dernier dans le tube est donc une indication du débit (Fig.43).



Figure 43: Rotamètre

Il existe différents types de rotamètres mais le plus couramment employé est constitué par un tube en verre calibré conique et vertical dans lequel le flotteur peut se déplacer librement vers le haut ou vers le bas.

6.1.6 Débitmètre à palette

Le débitmètre est principalement composé du tube de mesure équipé de la chambre de et éléments de mesure (ressort de torsion et clapet), le système d'affichage à aimant opposé et de l'afficheur. Le débitmètre est construit en sandwich aux diamètres nominaux DN 50 à DN 400. Le débitmètre TSK1 convient pour la mesure du débit des produits liquides dans les canalisations. Son avantage particulier réside dans sa capacité d'utilisation dans tous les sens d'écoulement. Le débit instantané s'affiche en volume ou en masse par unité de temps.

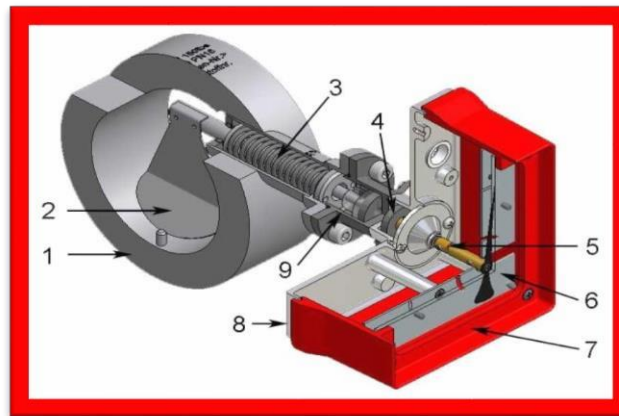


Figure 44: Débitmètre à palette

- 1 Chambre / tube de mesure ;
- 2 Clapet ;
- 3 Axe de clapet avec ressort de torsion ;
- 4 Aimant circulaire permanent ;
- 5 Système d'affichage à aimant opposé ;
- 6 Graduation de débit ;
- 7 Capot avec vitre ;
- 8 Fond de boîtier ;
- 9 Chambre d'accouplement.

Le diamètre nominal de la canalisation à raccorder doit correspondre à celui du débitmètre. Éviter de monter des robinetteries à étranglement unilatéral directement devant l'appareil. Il convient de respecter une distance suffisante par rapport aux pièces ferromagnétiques. Lors du montage, il convient également de respecter en série un tronçon d'entrée de $5 \times D$ et un tronçon de sortie de $3 \times D$.

Le débitmètre se monte verticalement ou horizontalement, en fonction du sens d'écoulement. Le diamètre nominal de la canalisation à raccorder doit correspondre à celui du débitmètre. Ce dernier est monté de préférence entre des brides mobiles. Lors du montage entre des brides à souder, ces brides mobiles doivent être purgées lentement l'air de l'appareil pour éviter un coup de bélier contre le clapet dû aux bulles de gaz.

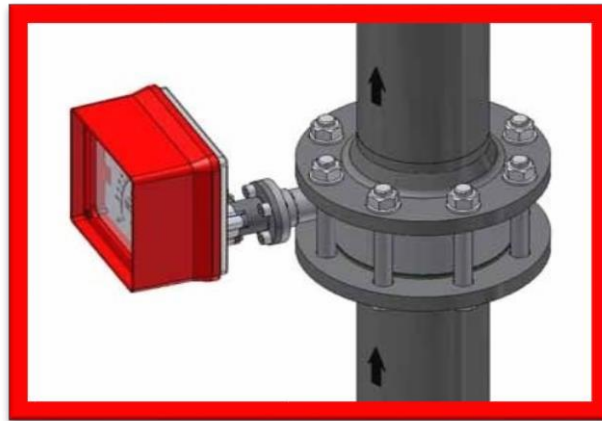


Figure 45: Exemple de montage de débitmètre à palette

6.21.7 Débitmètre à coude

Deux prises de pression placées à l'amont (7) et à l'aval (8) montrées à la figure 46 du coude permettent de mesurer la chute de pression en écoulement réel dans le coude.

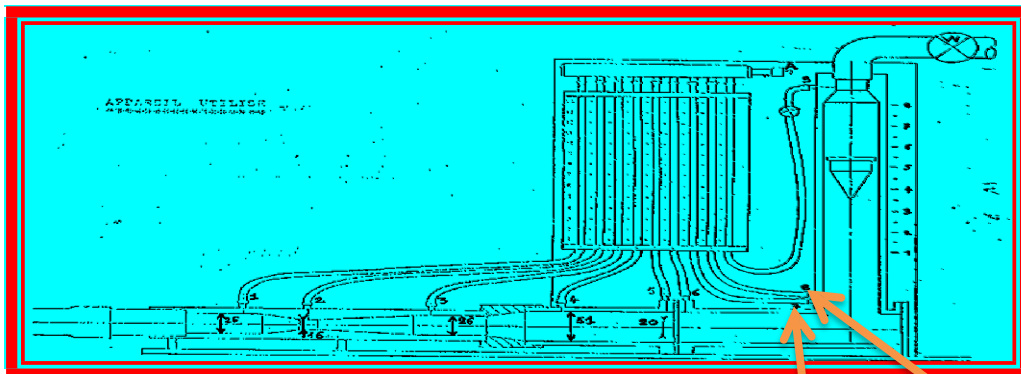


Figure 46: Disposition des différents débitmètres sur le montage



Figure 47: Débitmètre à coude

Les sections S7 et S8 ont les mêmes valeurs et la relation entre la chute de pression et la vitesse est de la forme suivante:

$$P_7 - P_8 = K_1 \cdot v^2 \quad \text{et} \quad q_v = K (h_7 - h_8)^{1/2} \dots\dots\dots (75)$$

6.21.8Gazomètre

Un gazomètre est un réservoir servant à stocker le gaz de ville, le gaz naturel ou bien le biogaz à température ambiante et à une pression proche de la pression atmosphérique. Le volume du réservoir varie selon la quantité de gaz qu'il contient, la pression étant assurée par une cloche mobile verticalement. Il est formé d'une cloche cylindrique en acier à fond plat de masse volumique (ρ_1), de rayon intérieur (R), de hauteur (h) et d'épaisseur faible (e). On note V le volume de l'acier constituant la cloche. On prendra $h = R$. Cette cloche est renversée sur une cuve à eau de surface libre fixe. Elle est en partie immergée et contient du gaz.

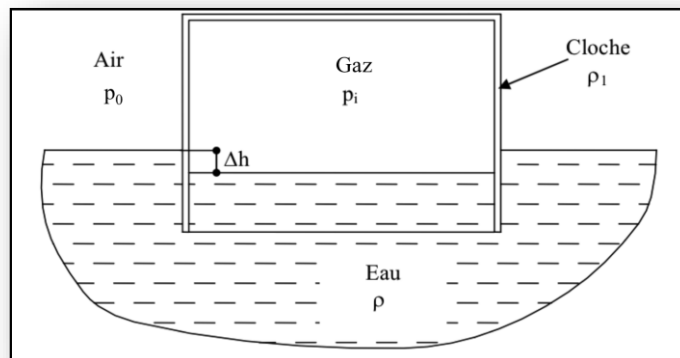


Figure 48: Gazomètre

Les gazomètres servaient pour le stockage et la distribution dans les usines de production de gaz. Ils sont aujourd'hui utilisés principalement pour la régulation, en permettant de conserver des pressions sans danger pour les tuyaux, et non plus pour stocker le gaz en vue de son utilisation. Cependant, ils présentent un avantage sur les autres méthodes de stockage, en ce qu'il est le seul à permettre le stockage à la pression d'utilisation:

Quand la pression baisse dans le réseau de distribution, sous le coup d'une forte demande par exemple, le gaz contenu dans les gazomètres est alors libéré et permet d'approvisionner les utilisateurs sans diminution de pression.

Chapitre 3 : Les écoulements transitoires dans les conduites en charge

1 Introduction

Cette partie est consacrée à l'étude des écoulements quasi-permanents comme le cas de vidange d'un réservoir vers une rivière et vidange d'un réservoir vers un autre, les mouvements oscillatoires des liquides, les écoulements transitoires. L'intensité ainsi que les phases du phénomène de coup de bélier seront également montrés. En fin, nous terminerons par une aperçu sur les moyens et équipement de protections des pompes, tuyauteries, robinetteries et les composants d'une installation contre les risques de coup de bélier (cheminée d'équilibre, fermeture lente, soupape de décharge, volant d'inertie et réservoir anti-bélier).

2. Ecoulements quasi-permanents

2.1 Vidange d'un réservoir vers une rivière

L'écoulement du réservoir vers une rivière est incompressible, homogène et parfait mais n'est pas stationnaire. Cependant la vitesse de variation de la hauteur d'eau dans le réservoir est très faible devant la vitesse d'éjection du fluide.

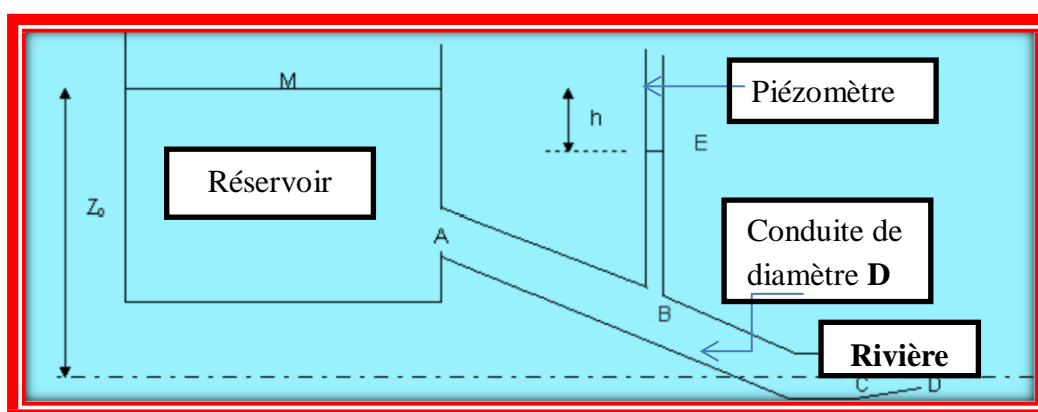


Figure 49: vidange d'un réservoir vers une rivière

On peut donc considérer le régime comme quasi-stationnaire. On peut alors appliquer la relation de Bernoulli entre les points M et C, le long d'une ligne de courant:

$$Z_M + \frac{P_M}{\rho g} + \frac{U_M^2}{2g} = Z_C + \frac{P_C}{\rho g} + \frac{U_C^2}{2g} \dots\dots\dots(76)$$

Avec $Z_M = Z_1$ et $Z_C = 0$

$$P_M = P_C = P_{atm}$$

L'équation de Bernoulli devient :

$$Z_1 + \frac{P_{atm}}{\rho g} + \frac{0}{2g} = 0 + \frac{P_{atm}}{\rho g} + \frac{U_C^2}{2g} \dots\dots\dots(77)$$

$$Z_0 = \frac{U_C^2}{2g} \Rightarrow U_C = \sqrt{2g \cdot Z_0} \text{ (Formule de Torricelli)} \dots\dots\dots(78)$$

2.2 Vidange d'un réservoir vers un autre

Soit un écoulement en charge d'un liquide réel entre deux réservoirs de section 1 et section 2.

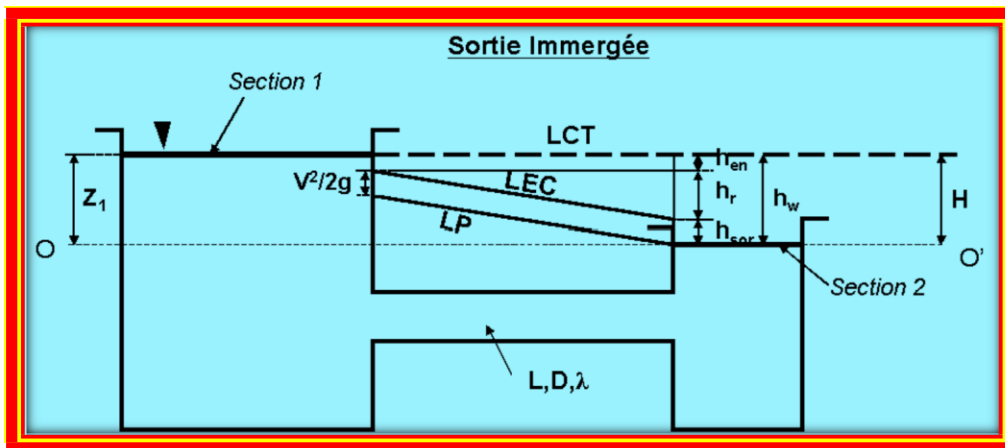


Figure 50: Vidange d'un réservoir vers un autre

Section 1:

- $Z_1 = H$
- $P_1 = P_{atm}$
- $V_1 = 0$ (niveau constant)

Section 2:

- $Z_2 = 0$
- $P_2 = P_{atm}$

➤ $V_2 = 0$ (niveau constant)

Application de l'équation de Bernoulli entre les sections 1 et 2 par rapport à OO':

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_C + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + H \dots\dots\dots(79)$$

$$H = \Delta ht = \Delta h_L + \Delta h_s = \frac{\lambda v^2}{2gD} \cdot L + \xi_{en} \cdot \frac{v^2}{2g} + \xi_{sor} \cdot \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(80)$$

$$H = \left(\frac{\lambda}{D} \cdot L + \xi_{en} + \xi_{sor} \right) \cdot \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(81)$$

Avec :

H ou Δht : Dénivelée disponible entre les plans d'eau ou perte de charge totale (en m) ;

Δh_L et Δh_s : Sont respectivement perte de charge linéaire et singulière (en m) ;

v: Vitesse moyenne d'écoulement (en m/s).

La dénivelée disponible entre les plans d'eau (H) définit le débit (Q) qui sera transporté dans la canalisation de diamètre D.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{\lambda}{D} \cdot L + \xi_{en} + \xi_{sor}}} \cdot \sqrt{2gH} \dots\dots\dots(82)$$

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{D} \cdot L + \xi_{en} + \xi}} \cdot \sqrt{2gH} \dots\dots\dots(83)$$

BIBLIOGRAPHIE

- Abdelaziz R. (2005)., Cours d'hydraulique générale. Centre Universitaire de Bechar.
- Abd-Lefdil M. (2011)., Chapitre 5, Mécaniques des fluides. Université Mohammed V-Agdal.
- Adil R. (2008)., Dynamique des fluides réels. Département de mathématiques et mécanique. Université de Caen.
- Aloui L.Z. (2016)., Hydraulique Générale. Université de Djillali Liabbes de Sidi BelAbbes.
- Ammari A., Chapitre II, Propriétés des Fluides.
- Bansal R. K., A Textbook of Fluid Mechanics and Hydraulic Machines.
- Bedjaoui A. (2014)., Dimensionnement des réseaux de distribution d'eau potable par la méthode du modèle rugueux de référence (MMR). Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS). Université de Biskra.
- Bélaïb A., Modélisation hydraulique d'un système de transfert du couloir Chlef-Tenes-El-Guelta à partir du barrage de Sidi Yacoub. Thèse de magister. Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- Ben Hamouda R. (2008)., Notions des mécaniques des fluides, Cours et exercices corrigés.
- Carbonnet J. et Roques M., Mécaniques des fluides, académie de Nancy-Metz.
- Dominique A. (2004)., Mécanique des fluides et agitation.
- Elguerri M. (2014)., Mécanique des fluides, Théorie et applications. Université Ibn Khaldoun de Tiaret.
- Jacques B. (2005)., Hydraulique urbaine. Ecole d'ingénieur de canton de vaud. Suisse.
- Jean-Loup P. et Christophe D. (2006)., Etude de cas, Alimentation en eau d'une ville.
- Jean-loup R. (2004)., Hydraulique urbaine. Université de laval.
- José V., Hydraulique général. Laboratoire systèmes hydrauliques urbains. Ecole national du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg (ENGEES).
- Hamedi A. (2012)., Etude de l'écoulement instationnaire d'un fluide Newtonien dans un domaine cartésien en présence d'un gradient de pression. Mémoire de magister en génie mécanique. Université Mohamed Khider de Biskra.
- Henri B. (2016)., Mécanique des fluides. Université Nice Sophia Antipolis.

- Kateb S., (2014)., Mécanique des fluides. Université Kasdi Merbeh d'Ouargla.
- Mahmoud M. (2002)., Poly-Alimentation en eau potable. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.
- Menneret M. (1911)., Mouvement oscillatoire et mouvement uniforme des liquides dans les tubes cylindrique, Frottement interne.
- Nechmi A. (2014) ., Adduction de la ville de Souaghi à partir du transfert du barrage koudiat acerdoune de Média.
- Ouigadd G. E. (1960)., A Note on the Theory of the Stanton Tube. Aeronautical research council reports and memoranda. London.
- Ramoul S. (2014)., Modélisation numérique des écoulements transitoires dans les conduites en charge à géométrie complexe. Université Hadj Lakhdar de Batna.
- Roland O. et Yonaba. (2015)., Adduction d'eau potable, Calcul des ouvrages constitutifs des réseaux d'AEP.
- Sellam F., Hydraulique général (Mécanique des fluides). Département du génie rural. Institut national agronomique.

