

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



## PROJET DE FIN DE CYCLE

### MASTER

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Génie Mécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Énergétique

#### Thème

# Étude théorique et expérimentale de certaines méthodes de mesure de débit

Préparé par :

AYAD Tahar et BAGHDACHE Tayeb

Soutenu publiquement le : 23 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

M. ABED Belkacem	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. CHAIB Khaled	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. BOUZOUINI Mohamed	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
SAD CHEMLOUL N-Eddine	Professeur "Pr" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2021 - 2022

# *Remerciements*

*Nous remercions ALLAH, le tout puissant de nous avoir aidé et donner la volonté de mener à terme ce travail.*

*Un grand merci à nos parents pour l'éducation qu'ils ont nous offerts et leurs appuis inconditionnels le long de notre cycle de formation*

*Nous tenons à remercier sincèrement Monsieur encadreur **SAD CHEMLOUL Nord-Eddine** qui, en tant qu'encadreur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.*

*Nos sincères remerciements vont également aux membres de jury qui nous avoir fait l'honneur de participer à l'examen de ce travail.*

*Et finalement, nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous apportés leur aide de ce mémoire.*

# *Dédicaces*

*« A conscience tranquille tout est accessible*

*Quand il y a la soif d'apprendre*

*Tout vient à point à qui sait attendre »*

*Je dédie ce travail*

*À celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère à mon père, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger. Que allah les gardes et les protège.*

*A mes chers et adorable sœur et frères. En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que dieu, le tout puissant, vous protégé et vous garde.*

*À tous mes amis Sachez que vous m'êtes très chers. Je suis juste très reconnaissant pour tout l'amour, le soutien et la confiance dont vous faites preuve à mon égard ;  
À tous ceux qui nous aiment.*

*Du fond du cœur MERCI.*

*Baghdache Tayeb*

# *Dédicace*

*Grâce à Dieu tout puissant, nous dédions ce modeste Travail à toutes les Personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la Réalisation de ce Mémoire plus particulièrement*

*A nos très chers parents, tout notre respect et Affection en Témoignage de leur soutien, sacrifice, patience, ainsi que Pour leurs conseils et orientations dans nos vies.*

*A toutes nos familles et nos très chers frères et nos Sœurs.*

*A tous nos enseignants et à notre promotion de génie Mécanique.*

*A tous mes amis et tous les gens qui m'ont aidé durant tout*

*Mon cursus d'étude.*

**AYAD Tahar**

# Sommaire

Remerciements.....	i
Table des matières.....	iv
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux.....	x
Nomenclature.....	xi
Introduction générale : .....	1

## Chapitre I : Etude bibliographique

I.1 Introduction .....	2
I.2 Débit .....	2
I.3 Historique d'évolution des débitmètres .....	2
I.4 Concept théorique d'un écoulement à surface libre .....	4
I.5 Classification des principaux débitmètres .....	5
I.5.1 Débitmètres à technologie traditionnelle .....	6
I.5.1.1 Débitmètre de pression différentiel ou déprimogène .....	6
I.5.1.1.1 Norme ISO 5167 .....	7
I.5.1.2 Débitmètres à déplacement positif .....	8
I.5.1.3 Débitmètre à turbine .....	9
I.5.1.4 Débitmètres à section variable .....	10
I.5.1.4.1 Principe de fonctionnement .....	10
I.5.2 Débitmètres de nouvelle technologie .....	11
I.5.2.1 Débitmètre à effet CORIOLIS .....	11
I.5.2.2 Débitmètre à ultrason .....	13
I.5.2.3 Débitmètre électromagnétique .....	13
I.5.2.4 Débitmètre à vortex .....	15
I.5.2.5 Débitmètres massiques thermiques .....	15
I.6 Autres débitmètre .....	16
I.6.1 Débitmètre à cible .....	16
I.6.2 Vélocimétrie laser Doppler .....	17

I.6.3 Débitmètre ionique .....	18
I.6.4 Débitmètre à piston .....	18
I.6.5 Débitmètre à fil ou film chaud .....	19
I.6.5.1 Principe de fonctionnement .....	20
I.6.6 Débitmètres à engrenages ovales .....	20
I.6.7 Débitmètre à palettes .....	21
 <b>Chapitre II : Etude théorique des débitmètres</b> 	
II.1 Généralités sur mécanique des fluides.....	22
II.2 Définition des fluides.....	22
II.2.1 Fluides incompressible .....	22
II.2.2 Fluides parfaits .....	23
II.2.3 Fluides réels .....	23
II.3 Caractéristiques d'un fluide .....	23
II.3.1 Masse volumique .....	23
II.3.2 Poids volumique (Poids spécifique) .....	23
II.3.3 Densité .....	23
II.3.4 Viscosité .....	24
II.3.4.1 Viscosité dynamique .....	24
II.3.4.2 Viscosité cinématique .....	25
II.4 Ecoulements .....	25
II.4.1 Ecoulement laminaire .....	25
II.4.2 Ecoulement turbulent .....	26
II.5 Théorème de Bernoulli .....	26
II.5.1 Principe de conservation de l'énergie .....	27
II.5.2 Application du principe de la conservation de l'énergie .....	27
II.5.3 Autres écritures de l'équation de Bernoulli .....	27
II.6 Equation de continuité .....	28
II.7 Théorème D'Euler .....	30

II.8 Pertes de charges .....	30
II.8.1 Définition .....	30
II.8.2 Pertes de charge singulière .....	31
II.8.3 Pertes de charges linéaires .....	31
II.8.4 Diagramme de Moody .....	32
II.9 Tube de venturi .....	33
II.9.1 Historique .....	34
II.9.2 Application de l'effet venturi .....	35
II.9.3 Installation .....	37
II.9.4 Avantages .....	37
II.9.5 Inconvénients .....	38
II.10 Diaphragme .....	38
II.10.1 Prises de pression à la bride .....	39
II.10.2 Prises de pression dans les angles .....	40
II.10.3 Prises sur le tuyau .....	41
II.10.4 Avantages et désavantages des diaphragmes .....	41
II.11 Tube de Pitot .....	41
II.11.1 Evolution du tube de Pitot .....	42
II.11.2 Principaux types de tubes de Pitot et leurs applications .....	44
II.11.2.1 Tube de Kiel .....	44
II.11.2.2 Sonde avec une forme sphérique.....	44
II.11.2.3 Sonde avec une forme spéciale .....	45
II.11.3 Applications de tube de Pitot .....	45
II.11.3.1 Marine .....	45
II.11.3.2 Aéronautique .....	45
II.11.3.3 Designs particuliers .....	46
II.11.3.4 Automobile.....	46
II.11.4 Autres applications .....	46

II.12 Rotamètre .....	46
II.12.1 Présentation .....	47
II.12.2 Caractéristiques métrologiques .....	47
II.12.3 Avantages et Inconvénients .....	48
II.12.3.1 Avantages .....	48
II.12.3.2 Inconvénients .....	48

## **Chapitre III : Etude expérimental-résultats et discussions**

III.1 Description de l'installation expérimentale .....	49
III.1.1 Différentes mesures possibles du banc d'essai.....	52
III.2 Résultats expérimentaux et interprétation .....	52
III.2.1 Débitmètre « le rotamètre » .....	53
III.2.2 Débitmètre « tube de Venturi » .....	56
III.2.2.1 Mesure de débit .....	58
III.2.2.2 Variation du coefficient de débit en fonction du nombre de Reynolds dans le cas du débitmètre de Venturi .....	60
III.2.2.3 Variation de la pression le long du tube de Venturi.....	62
III.2.2.4 Variation de la perte de charge dans le tube de venturi en fonction du nombre de Reynolds .....	63
III.2.3 Comparaison entre le débit déterminé par le débitmètre « diaphragme » et le débit mesuré par la méthode directe : .....	64
III.2.4 Comparaison entre le débit déterminé par le tube de Pitot fixe et le débit mesuré par la méthode directe.....	68
III.2.5 Comparaison entre le débit mesuré par la méthode directe et le débit déterminé les autres méthodes.....	71
III.2.6 Mesure de débit à l'aide du tube de Pitot mobile.....	72
Conclusion générale.....	75
Référence bibliographie.....	76
Annexe.....	79
Résumé	



*Liste des figures et des  
tableaux*

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : les principaux débitmètres de chaque technologie.....	4
<b>Figure I.2</b> : Répartition des débitmètres dans l'industrie.....	6
<b>Figure I.3</b> : Les différents organes déprimogènes .....	7
<b>Figure I.4</b> : Débitmètre à turbine.....	10
<b>Figure I.5</b> : Débitmètre à effet CORIOLIS .....	11
<b>Figure I.6</b> : Principe de fonctionnement de débitmètre Coriolis.....	12
<b>Figure I.7</b> : Principe de fonctionnement d'un débitmètre à ultrason .....	13
<b>Figure I.8</b> : Débitmètres électromagnétiques (a) à écoulement plein et (b) à insertion. ....	14
<b>Figure I.9</b> : Fonctionnement d'un débitmètre à vortex .....	15
<b>Figure I.10</b> : Débitmètre massique thermique.....	16
<b>Figure I.11</b> : Débitmètre à cible .....	16
<b>Figure I.12</b> : vélocimétrie laser Doppler (Montage en diffusion avant) .....	17
<b>Figure I.13</b> : Schéma de principe et électrique d'un débitmètre ionique .....	18
<b>Figure I.14</b> : Débitmètre à piston .....	19
<b>Figure I.15</b> : Débitmètre à fil chaud.....	19
<b>Figure I.16</b> : Débitmètre à engrenages ovales.....	21
<b>Figure I.17</b> : Débitmètre à palettes.....	21
<b>Figure II.1</b> : Profil de vitesse écoulement de Couette entre deux plaques, une mobile et l'autre fixe	24
<b>Figure II.2</b> : Différents types d'écoulement.....	25
<b>Figure II.3</b> : Ecoulement laminaire .....	26
<b>Figure II.4</b> : Ecoulement turbulent.....	26
<b>Figure II.5</b> : Fluide s'écoulant dans une conduite. ....	28
<b>Figure II.6</b> : Ecoulement d'un fluide parfait dans une canalisation en régime stationnaire.....	29
<b>Figure II.7</b> : ligne de charge, piézométrique et trajectoire d'un écoulement dans une conduite.....	31
<b>Figure II.8</b> : Diagramme de Moody .....	33

<b>Figure II.9 :</b> Schématisation de l'effet Venturi.....	34
<b>Figure II.10 :</b> Tube de Venturi, aqueduc de Catskill, adduction d'eau à New York.....	35
<b>Figure II.11 :</b> schéma d'un Diaphragme .....	38
<b>Figure II.12 :</b> Evolution de la pression d'un fluide traversant un diaphragme .....	39
<b>Figure II.13 :</b> Diaphragme avec prise de pression dans les angles .....	40
<b>Figure II.14 :</b> tube de Pitot.....	42
<b>Figure II.15 :</b> Différentes sondes de mesure de pression.....	43
<b>Figure II.16 :</b> Sonde de pression totale Kiel. ....	44
<b>Figure II.17 :</b> Schéma d'un rotamètre. ....	47
<b>Figure III.1 :</b> HM 112 Installation expérimentale de mesure de débit : .....	51
<b>Figure III.2 :</b> Rotamètre .....	53
<b>Figure III.3 :</b> Schéma du débitmètre « rotamètre » .....	54
<b>Figure III.4 :</b> Variation du débit volumique mesuré à l'aide du rotamètre $Q_{v(\text{rot})}$ en fonction de celui déterminé par la méthode directe $Q_{v(\text{dir})}$ . ....	55
<b>Figure III.5 :</b> Tube de venturi .....	56
<b>Figure III.6 :</b> Représentation schématique de tube de venturi.....	56
<b>Figure III.7 :</b> Variation du débit volumique mesuré à l'aide du tube de Venturi $Q_{v(\text{ven})}$ en fonction de celui déterminé par la méthode directe $Q_{v(\text{dir})}$ en tenant compte de toutes les mesures. ....	59
<b>Figure III.8 :</b> Variation du débit volumique mesuré à l'aide du tube de Venturi $Q_{v(\text{ven})}$ en fonction de celui déterminé par la méthode directe $Q_{v(\text{dir})}$ , cas d'une variation linéaire. ....	60
<b>Figure III.9 :</b> Variation du coefficient de débit en fonction du nombre de Reynolds dans le cas du débitmètre de Venturi.....	61
<b>Figure III.10 :</b> Variation de la pression le long du tube de Venturi pour différentes valeurs du débit volumique.....	63
<b>Figure III.11 :</b> Variation de la perte de charge singulière en fonction du nombre de Reynolds ....	64
<b>Figure III.12 :</b> Débitmètre Diaphragme.....	65

**Figure III.13 :** Allure de la répartition de la ligne piézométrique et la ligne de charge dans une conduite munie d'un débitmètre « diaphragme » ..... 65

**Figure III.14 :** Variation du débit volumique déterminé à l'aide du débitmètre de diaphragme  $Q_{v(\text{dia})}$  en fonction de celui mesuré par la méthode directe  $Q_{v(\text{dir})}$  en tenant compte de toutes les mesures. 67

**Figure III.15 :** Variation du débit volumique déterminé à l'aide du débitmètre de diaphragme  $Q_{v(\text{dia})}$  en fonction de celui mesuré par la méthode directe  $Q_{v(\text{dir})}$ , cas d'une variation linéaire.... 68

**Figure III.17 :** Représentation schématique de tube de Pitot..... 69

**Figure III.18 :** Variation du débit volumique déterminé à l'aide du tube de Pitot fixe  $Q_{v(\text{Pitot fixe})}$  en fonction de celui mesuré par la méthode directe  $Q_{v(\text{dir})}$  ..... 70

**Figure III.19 :** Variation du débit volumique déterminé à l'aide du tube de Pitot fixe  $Q_{v(\text{Pitot fixe})}$  en fonction de celui mesuré par la méthode directe  $Q_{v(\text{dir})}$ , cas d'une variation linéaire..... 71

**Figure III.20 :** Comparaison entre les différentes méthodes de mesure de débit. .... 72

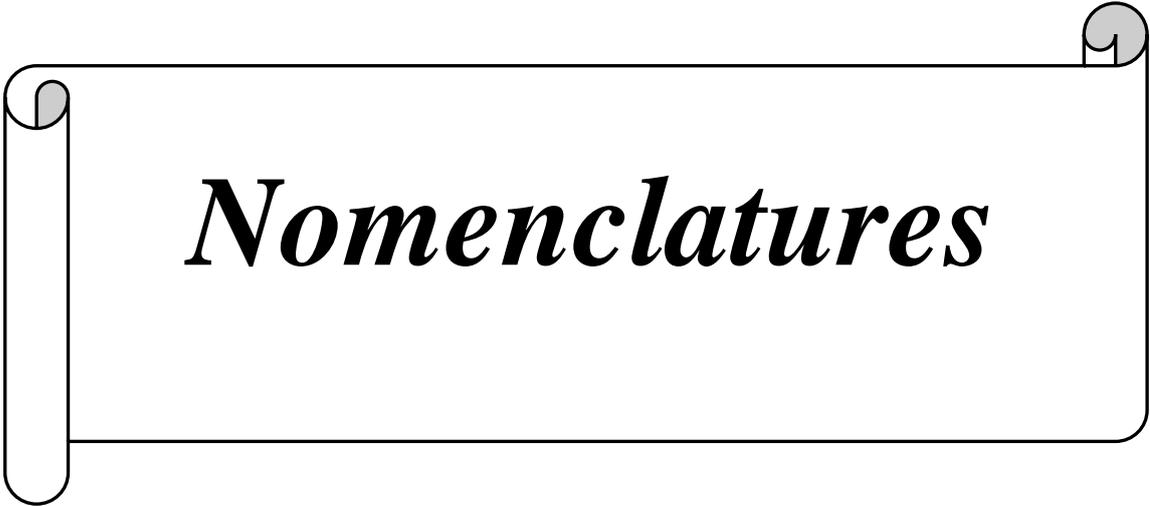
**Figure III.21 :** Tube de Pitot mobile ..... 72

**Figure III.22 :** Profil de vitesse mesuré à l'aide tube de Pitot double mobile. .... 73

**Figure III.23 :** Profil de vitesse mesuré à l'aide tube de Pitot double mobile. .... 74

## Liste des tableaux

**Tableau III.1 :** Quelques valeurs standard du coefficient de débit en fonction du rapport des diamètres et du nombre de Reynolds.....61



***Nomenclatures***

<b>Symbole</b>	<b>Définition</b>	<b>Unité</b>
C	Coefficients de décharge	[-]
D	Le diamètre	[m]
E	Coefficient de vitesse	[-]
F	La force	[N]
L	Longueur de la conduite	[m]
P	Pression	[N/m <sup>2</sup> ]
S	Surface de conduite	[m <sup>2</sup> ]
T	Température	[K]
U	Vitesse moyenne	[m/s]
V	Vitesse	[m/s]
W	Le travail	[J]
a	La vitesse angulaire	[rad/s]
d	Densité	[-]
g	Accélération de la pesanteur	[m/s <sup>2</sup> ]
h	Hauteur	[m]
m	La masse	[Kg]
t	Temps	[s]
v	Volume	[m <sup>3</sup> ]
z	L'altitude	[m]
C <sub>d</sub>	Coefficient de débit	[-]
Q <sub>m</sub>	Débit massique	[Kg/s]
Q <sub>v</sub>	Débit volumique	[m <sup>3</sup> /s]
R <sub>e</sub>	Nombre de Reynolds	[-]
ΔE <sub>c</sub>	Energie cinétique	[J]
ΔE <sub>p</sub>	Energie potentielle	[J]
ΔP	Pertes de pression	[N/m <sup>2</sup> ]
ΔV	Écart de vitesse	[m/s]
ΔH	Perte de charge	[m]
Δy	Distance entre deux couches	[m]
<b>Symboles grecs</b>		
μ	Viscosité dynamique	[Kg/m.s]
ν	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> /s]

## Nomenclatures

---

$\rho$	La masse volumique	$[\text{Kg} / \text{m}^3]$
$\rho_{\text{réf}}$	La masse volumique référence (eau)	$[\text{Kg} / \text{m}^3]$
$\tau$	Contrainte de cisaillement	$[\text{N} / \text{m}^2]$
$\varpi$	Poids volumique	$[\text{N} / \text{m}^3]$
$\lambda$	Coefficient de perte de charge linéaire	$[-]$
$\varepsilon$	Coefficients de détente	$[-]$

---

## Indices et exposants

---

dia	diaphragme
dir	direct
L	Linéaire
pit	Pitot
rot	Rotamètre
S	Singulière

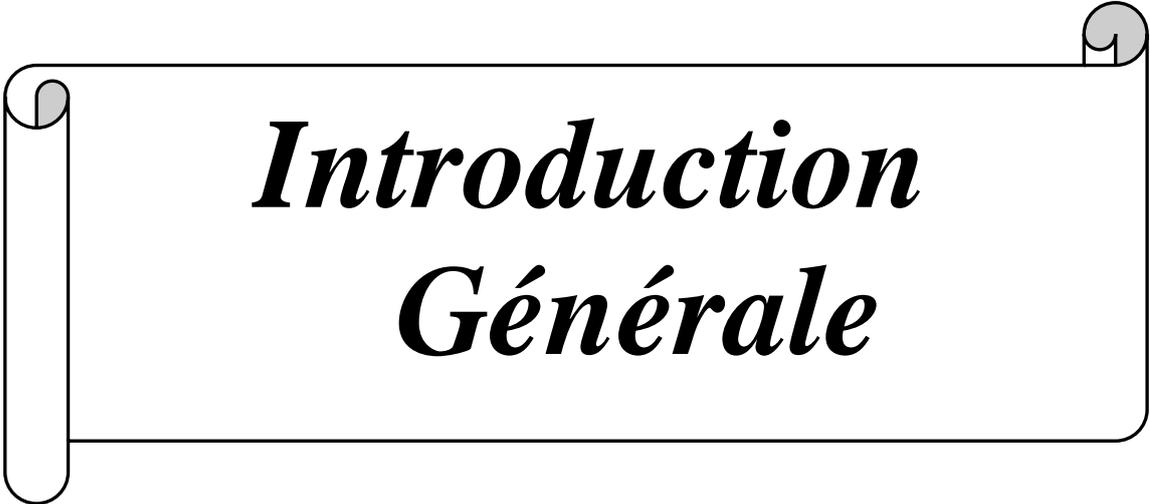
---

## Abréviations

---

DP	Déplacement positif
LDV	Laser Doppler velocimetry
LDA	Laser Doppler anemometry

---



***Introduction  
Générale***

### Introduction générale :

Au cours de ces dernières années, l'importance de la mesure du débit a augmenté. Des méthodes de mesure du débit précises et uniformes sont requises dans divers domaines, qu'il s'agisse d'effluents industriels, municipaux, agricoles ou autres. En effet, la mesure du débit répond à des objectifs multiples : qualité constante des produits, sécurité, optimisation des process et protection de l'environnement voici quelques-unes des raisons pour lesquelles la mesure de débit industrielle est devenue indispensable.

La mesure des débits est indispensable pour les opérations industrielles de production, de transport, d'utilisation et de manipulation des fluides, afin d'établir des bilans d'exploitation, de fabriquer un produit dans certaine spécification et de régler le fonctionnement d'un procédé de fabrication.

La précision de mesure du débit de fluides est un paramètre d'importance capitale sur les plans technologique et économique dans la majorité des industries. Cette précision est influencée par les débitmètres utilisés et les conditions d'installation des débitmètres dans la conduite.

Avec les débitmètres utilisés aujourd'hui, en fonction de l'appareil utilisé, une formule de calcul prend en compte la mesure associée instantanée (hauteur en mètre par exemple) pour la convertir simultanément en débit (généralement exprimé en  $m^3/h$ ).

L'aspect Technico-économique des mesures des débits des fluides avec plus de précision a motivé plusieurs études. De ce fait il est très intéressant d'étudier ces dispositifs afin d'augmenter leurs performances en assurant une meilleure précision.

Il existe de nombreuses méthodes et techniques de mesure le débit mais elles diffèrent les unes des autres, nous devons donc mener des expériences pour trouver la meilleure méthode de mesurer le débit et ceci afin de donner les meilleurs résultats.

L'objectif de ce travail est fait une étude théorique et expérimentale sur certaines méthodes de mesure de débit, ces méthodes sont comparées à la méthode directe (volume/temps).

Ce mémoire comporte trois chapitres, le premier chapitre est une étude bibliographie sur la mesure de débit et les différents débitmètres dans l'industrie et leurs principes de fonctionnement. Le deuxième chapitre est un rappel sur la mécanique des fluides, et les différentes méthodes utilisées dans la mesure de débit : rotamètre, tube de venturi, diaphragme, tube de Pitot fixe et Pitot mobile. Le troisième chapitre traite la partie expérimentale dans laquelle on trouve la description du banc d'essai, les différents essais expérimentaux réalisés ainsi que les interprétation et l'analyse des résultats expérimentaux trouvés. Les résultats trouvés sont très intéressants.



*Chapitre I : Étude  
bibliographique*

### I.1 Introduction :

Au cours de ces dernières années, la mesure de débit des fluides a connu une très grande importance et application dans plusieurs domaines. Le choix de l'instrument approprié pour une application particulière est soumis à beaucoup de variables, y compris le coût. Le choix technique et le profil économique de la mesure du débit a motivé des actions dans plusieurs laboratoires de recherche dans le monde. En raison des variations des propriétés physiques et chimiques du débit, beaucoup de techniques de comptage ont été élaborés chacun pour une application donnée. Chacun des dispositifs de mesure du débit a ses propres avantages et inconvénients.[1]

L'objectif de ce chapitre est fait une étude bibliographie sur la mesure de débit, et nous montrons quelques débitmètres utilisés dans l'industrie.

### I.2 Débit :

Le débit est la quantité de matière, exprimée par une masse ou un volume, qui passe à chaque unité de temps à travers cette section. [1]

Si on veut savoir la quantité de matière d'un fluide, alors on parlera de débit massique qui s'exprime en  $(\text{Kg}/\text{s})$ , Cependant si on veut savoir le volume de ce fluide, on parlera de débit volumique qui s'exprime en  $(\text{m}^3/\text{s})$ .

$$Q_v = S \cdot V \quad (\text{I.1})$$

Si  $\rho$  est la masse volumique du fluide qui s'exprime en  $(\text{Kg}/\text{m}^3)$ , on a la relation liant le débit massique au débit volumique

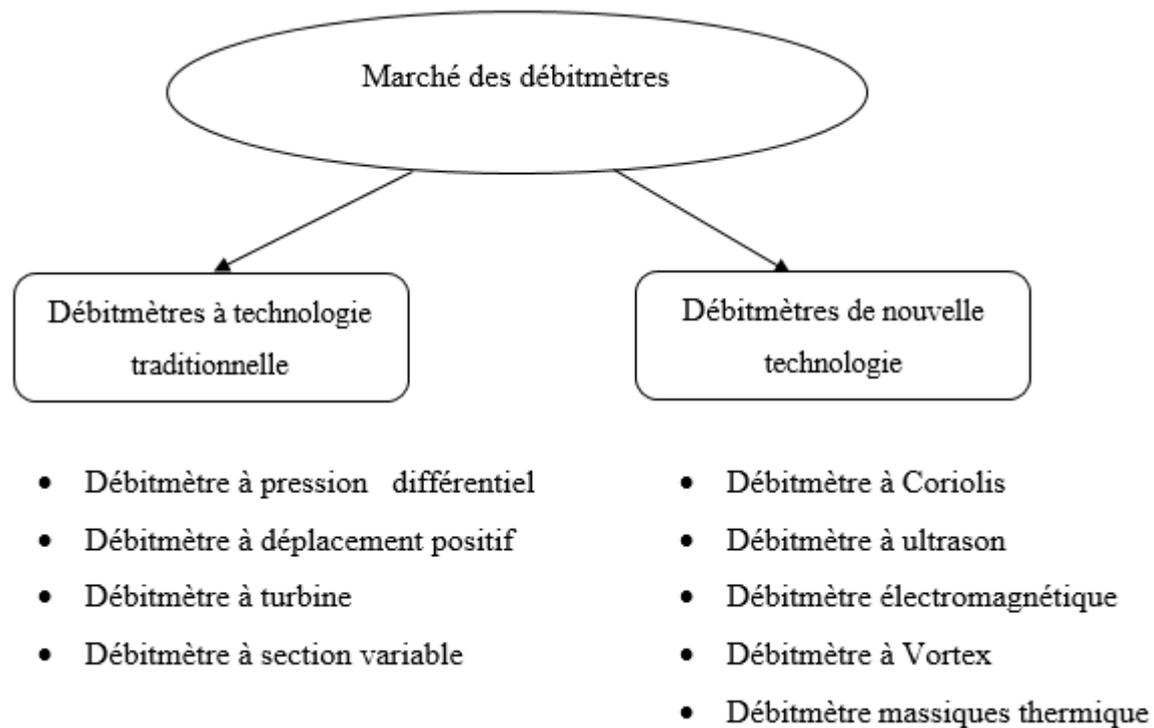
$$Q_m = \rho \cdot Q_v \quad (\text{I.2})$$

### I.3 Historique d'évolution des débitmètres :

La mesure du débit des fluides a toujours été une marque de civilisation significative pour tous les peuples anciens. Bien que l'intérêt de la mesure du débit de fluide remonte à plus de trois mille ans, les principes de fonctionnement des débitmètres traditionnels ont été compris et étudiés sur une base scientifique il y a quatre cents ans. Les soucis initiaux pour mesurer le débit étaient les besoins agricoles et la nécessité d'évaluer la consommation d'eau par les utilisateurs. Cette nécessité a conduit au développement précoce de dispositifs capables de mesurer le débit dans des canaux ouverts. Les anciens Égyptiens dépendaient fortement du Nil, car la plupart de leurs activités vitales

étaient liées à l'irrigation de leurs champs. L'observation des niveaux d'eau du Nil a fourni une indication sur l'abondance de la récolte. Les ingénieurs romains étaient réputés non seulement pour la construction des routes et des ponts, mais également par leurs systèmes de canalisation conduisant l'eau des sources à leurs maisons aux fontaines et aux bains thermaux. Le débit a été mesuré à l'aide de dispositifs pouvant être considérés comme l'ancêtre du l'orifice actuel.

Les Chinois mesuraient aussi le débit d'eau sur un complexe d'irrigation en 251 avant J-C.26 de l'époque des Romains à l'an 1500 environ, il n'y avait pas d'informations historiques sur la mesure du débit. De 10 au 12 e siècle, la civilisation arabo-musulmane avait achevé la réflexion théorique sur le cycle de l'eau et l'origine des fleuves et exprimait le débit d'une rivière comme le nombre de moulins que celle-ci pouvait alimenter. Du XVIe au XVIIIe siècle, grâce aux travaux des scientifiques, les concepts fondamentaux de la dynamique des fluides ont été étudiés en profondeur. Au cours de cette période, en conséquence des connaissances théoriques acquises, certains types des débitmètres différentiels de pression, déplacements positifs et à déduction ont été développés. Plus tard, à la fin du XIXe siècle, la mesure du débit est devenue pertinente à la fois pour des objectifs industriels et domestique. La plus grande et la plus ancienne catégorie de débitmètres traditionnels, basée sur des techniques de pression différentielle, a répondu à ces besoins jusque vers 1950, lorsque des méthodes alternatives sont devenues disponibles. A partir de 1960, de nombreux débitmètres selon un nouveau concept sont développés et réalisés afin de répondre aux exigences sans cesse croissantes des mesures du débit domestiques, industrielles des liquides, gaz et vapeurs et le comptage transactionnel sous forme monophasée ou polyphasée. Il existe actuellement environ huit techniques principales de mesure du débit : pression différentielle, section variable, déplacement positif, déduction (par exemple, turbine), dynamique des fluides (par exemple le vortex), débitmètres à ultrasons, électromagnétiques et massiques (Coriolis et thermique). Les débitmètres massiques sont relativement nouveaux et peuvent être considérés comme des appareils particulièrement importants pour la mesure du débit dans l'industrie, car ils font partie des rares techniques de mesure permettant une mesure directe précise des débits massiques (voir les figures I.1).[2]



**Figure I.1:** les principaux débitmètres de chaque technologie.[2]

#### I.4 Concept théorique d'un écoulement à surface libre :

Le terme « écoulement à surface libre » s'applique lorsque la surface de l'écoulement demeure toujours en contact avec l'atmosphère. La surface de l'eau est dans ce cas soumise à la pression atmosphérique. La vitesse de l'écoulement dépend alors du gradient de la pente de la conduite et de la résistance frictionnelle aux parois. Étant donné que le résultat de l'équation (I.1) précédemment énoncé ne change pas, les variables de l'équation doivent donc s'ajuster comme l'énonce le principe de conservation de l'énergie.

Dans ce type d'écoulement, la vitesse et l'aire ( $A$ ) sont les deux variables qui doivent être mesurées dans l'évaluation du débit lorsqu'aucun dispositif de mesure n'est installé dans la conduite découverte. Cela s'exprime par l'équation (I.1), où l'aire de la section mouillée ( $m^2$ )

D'une conduite rectangulaire correspond à :

$$A = h \times B \quad (I.3)$$

Où

$h$  : hauteur de l'écoulement

$B$  : largeur de la section (valeur constante).

Ce qui permet finalement d'obtenir la formule détaillée suivante :

$$Q = V \times h \times B \quad (I.4)$$

Selon cette équation, si on présume que le débit demeure constant, lorsqu'un changement de vitesse est imposé ou induit à l'écoulement (par exemple, à l'intérieur d'un élément primaire), la hauteur de l'écoulement doit s'ajuster pour respecter l'équation. Ainsi, lorsque l'écoulement s'accélère et que l'énergie se transforme en vitesse, la hauteur doit diminuer. Inversement, lorsque la vitesse diminue, la hauteur doit augmenter. La baisse du niveau de la surface d'écoulement de l'eau alors constatée est nommée rabattement.

Un canal Parshall est un exemple de dispositif de mesure (élément primaire) qui illustre bien le phénomène du changement de hauteur lorsque la vitesse augmente. Quand l'eau entre dans le canal, elle accélère dans la section convergente pour atteindre une vitesse maximale lorsqu'elle passe dans la section de contrôle (étranglement) dont la pente du plancher est descendante, ce qui provoque une baisse importante du niveau d'eau au niveau de l'étranglement.

Le principe de l'équation (I.4) peut être appliqué pour des conduites découvertes de formes diversifiées.

L'écoulement à surface libre se rencontre habituellement en conduite découverte, comme dans le cas des canaux d'irrigation, mais peut également se voir en conduite partiellement fermée, telle que les ponceaux dans lesquels l'écoulement ne se fait pas au maximum de sa capacité. [3]

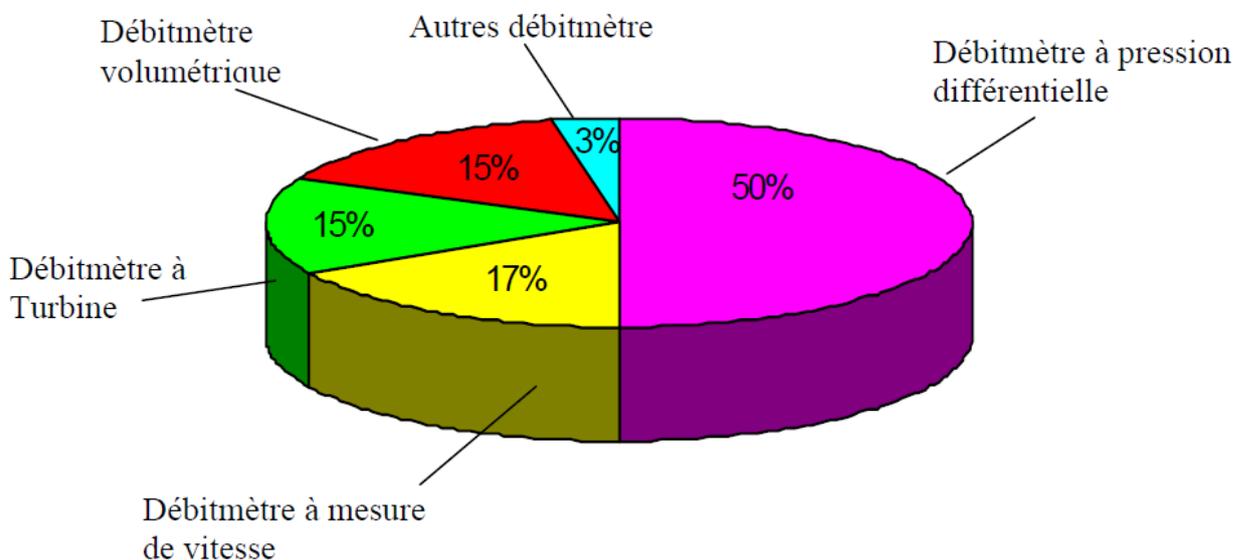
### **I.5 Classification des principaux débitmètres :**

La mesure de débit de fluide industriel a une grande importance, en raison de la présence de ces derniers dans les opérations de commercialisation des produits soit en liquide ou en état gazeux. Pour assurer le transport et la distribution de ces fluides sans grande perte, des appareils de mesure de débit sont nécessaires afin de minimiser ces pertes. Les appareils mesurant le débit s'appellent débitmètres. Les appareils mesurant le volume de fluide (quelle que soit la durée) ou la masse écoulee s'appellent des compteurs. Un débitmètre est un groupe de composants liés qui fournissent un signal relié uniquement au débit ou la quantité de fluide entrante dans une conduite. L'objectif d'installation des débitmètres est d'obtenir une mesure du débit, généralement sous forme d'un signal électrique. Depuis l'apparition des premiers débitmètres et, avec le développement de l'industrie gazière, ceux-ci n'ont cessé d'évoluer. Les volumes échangés sont en constante augmentation et la qualité du comptage prend de plus en plus d'importance. Une grande diversité des moyens de comptage existe. En électronique, les progrès réalisés et la miniaturisation ont permis le développement de nouveaux moyens de comptage ou l'évolution des moyens existants. Cette diversité doit permettre l'utilisation

d'un débitmètre bien adapté aux besoins et aux conditions d'utilisation. Les principales « familles » de débitmètre sont :

- les débitmètres volumétriques auxquels on peut ajouter les débitmètres fluidiques: le volume de gaz qui les traverse est mesuré par remplissage cyclique de capacités de contenance déterminée;
- les débitmètres de vitesse: le volume de gaz dépend directement de la vitesse d'écoulement mesurée;
- les débitmètres massiques Les divers types de débitmètres sont, en fonction de leur principe et de l'application à laquelle ils sont destinés, spécifiés pour une pression de service maximale et pour une plage de température de service

La figure I.2 suivante présente la répartition des différents types de débitmètres dans l'industrie : [4].



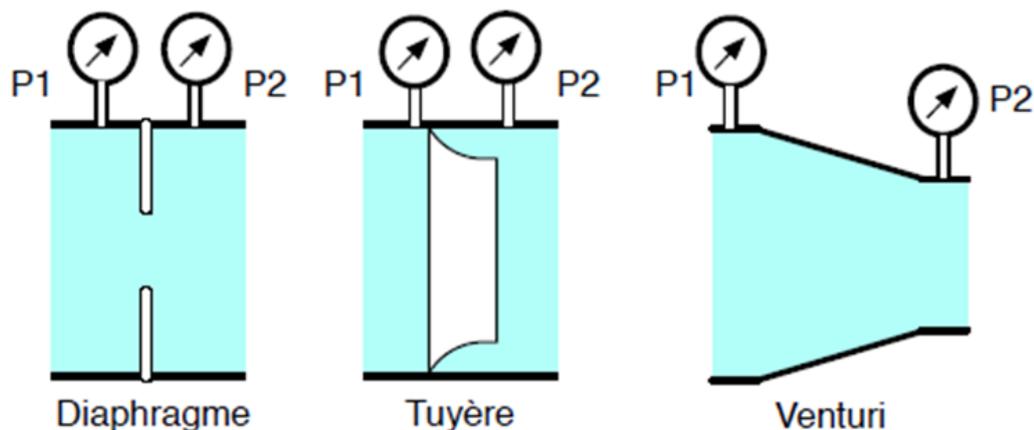
**Figure I.2 :** Répartition des débitmètres dans l'industrie

### I.5.1 Débitmètres à technologie traditionnelle :

#### I.5.1.1 Débitmètre de pression différentiel ou déprimogène :

Le choix d'un dispositif primaire, est probablement la décision de conception la plus importante. Dans le cas de la mesure fiscale, le choix est influencé par la performance en service établie, l'existence des normes de mesures pour la technologie, l'investissement du capital d'équipement, et les frais d'exploitation. Le débitmètre déprimogène est le dispositif le plus anciennement connu pour la mesurer ou le réglage d'écoulement des fluides. Pour mesurer un débit à partir d'une différence de pression, on doit étrangler la conduite pour provoquer une chute de pression. Le fluide devant s'écouler par un passage plus étroit, la pression en amont du rétrécissement sera plus élevée qu'en

aval. Cette baisse de pression augmente la vitesse du fluide puisqu'une même quantité de matière s'écoule en aval et en amont de l'étranglement. Or, la vitesse varie en fonction du débit, donc un débit plus élevé amènera une plus grande différence de pression en amont et en aval de l'étranglement. Ainsi, nous pouvons en mesurant une différence de pression (ou pression différentielle) de part et d'autre de l'étranglement pour déterminer le débit. La partie de l'appareil servant à rétrécir la conduite s'appelle l'organe déprimogène. Les organes déprimogènes sont caractérisés par leur rapport de contraction de diamètre et regroupent les orifices ou diaphragmes les tubes de Venturi et les tuyères [2], la figure I.3 montre une schématisation de ces débitmètres.



**Figure I.3 :** Les différents organes déprimogènes

#### I.5.1.1.1 Norme ISO 5167 :

Les mesures de débit au moyen d'organes déprimogènes font l'objet de la norme internationale ISO 5167. La normalisation définit les spécifications de construction et les conditions d'utilisation de ces débitmètres ainsi que les procédures de calcul. Elle concerne principalement :

- La définition des éléments primaires. Ceux-ci sont composés des appareils déprimogènes et des prises de pression qui leur sont associées, les appareils secondaires couvrant tous les autres instruments et dispositifs utilisés dans la chaîne de mesure ;
- Les conditions générales de validité des mesures, relativement à l'élément primaire, à la nature du fluide et à l'installation ;
- Les valeurs des coefficients de décharge  $C$  et de détente  $\epsilon$ .

Les principaux types d'organes déprimogènes décrits par la norme sont :

- Les diaphragmes ou plaques à orifice concentrique
- Les orifices profilés (tuyères, tubes de Venturi et les Venturi-tuyères) [5].

L'ensemble de mesure comprend :

- ✓ Un élément primaire composé de l'organe déprimogène (diaphragme, Venturi, tuyère) et des prises de pressions associées ;
- ✓ Les appareils secondaires nécessaires au mesurage (transducteurs de pression et de pression différentielle, ...).

Les paramètres de base d'un élément primaire (organe déprimogène) sont :

- Le rapport d'ouverture  $\beta$  qui définit la géométrie de la contraction de l'écoulement ;
- Le nombre de Reynolds,  $Re$ , qui définit l'aspect dynamique de l'écoulement.

• **Incertitude de mesure :**

Les normes permettent de déterminer les incertitudes ou les erreurs de mesure pour les organes déprimogènes ; Elles sont de l'ordre de :

- $\pm 2 \%$  pour le diaphragme et la tuyère normalise ;
- $\pm 1.5 \%$  pour le tube de Venturi normalise. [5]

**I.5.1.2 Débitmètres à déplacement positif :**

Débitmètres à déplacement positif (DP) sont débitmètres volumétriques qui mesurent le débit en faisant passer des parcelles discrètes de fluide dans des volumes connus avec précision. Les débitmètres PD sont des instruments de précision dont les composants mobiles internes sont équilibrés en masse tout en restant déséquilibrés hydrauliquement. Le résultat est que le débitmètre peut mesurer de très faibles débits de liquides et de gaz sans utiliser d'alimentation externe. Le débitmètre PD dérive la puissance nécessaire pour travailler à partir de l'énergie contenue dans le processus d'écoulement. Le débitmètre à déplacement positif présente l'avantage qu'il ne nécessite aucune alimentation externe et, contrairement aux autres technologies de débit, ne nécessite aucun profil de débit entièrement développé pour une mesure de débit précise qui peut être précise jusqu'à 0.1%.

Chaque chambre mobile de fluide est séparée de la chambre suivante par un joint capillaire, dont l'intégrité est fonction de la précision avec laquelle le compteur est fabriqué. Cette haute précision permet à ces débitmètres d'être presque universellement acceptés comme étalons de transfert lorsqu'ils sont correctement installés et calibrés en débit. Les tolérances étroites des composants de dosage internes nécessitent que le débitmètre à déplacement positif soit utilisé uniquement avec des fluides propres. La métallurgie du compteur dicte le type de procédé pour lequel il peut être utilisé. Généralement, ces débitmètres sont utilisés dans des applications dédiées à débit unidirectionnel,

telles que la distribution d'huile de débitmètre de carburant, ou en tant que débitmètres de gaz naturel ou débitmètres d'eau.

Les bonnes pratiques d'instrumentation exigent qu'un mécanisme de filtrage et un récipient capacitif pour l'élimination de l'air pour les liquides ou un filtre coalescent pour les gaz fassent partie intégrante de l'installation du débitmètre. Les progrès technologiques permettent aux débitmètres d'être compensés en température et d'interfacer électroniquement avec des systèmes de contrôle centraux. Ils peuvent également être facilement configurés pour faire partie intégrante d'un système de distribution de débitmètre monté sur camion. Les spécifications des fabricants individuels aideront l'utilisateur à sélectionner le débitmètre approprié pour l'application. Des exemples de compteurs à déplacement positif les plus courants sont les pistons oscillants, les disques de nutation, les engrenages ovales, les racines, les palettes, les rotors et les multi-pistons. [6]

### **I.5.1.3 Débitmètre à turbine :**

Les spirales, les vis et les moulins à vent ont une longue histoire dans la mesure de vitesse. Robert Crochet a proposé un petit moulin à vent en 1681 pour mesurer la vitesse de l'air et plus tard un pour la mesure de distance. En 1870, Reinhard Woltman développa un ventilateur multi lame pour mesurer le débit des rivières. Le dispositif a été un précurseur de la longue hélice de type à vis mètre largement utilisé pour les flux de tuyauterie dans le secteur de l'eau. Le premier débitmètre moderne de ce type, a été élaboré en États-Unis en 1938. Le dispositif le plus anciennement utilisé était fondé sur le principe de l'anémomètre : une hélice d'une forme plus ou moins élaborée occupait toute la section de passage du flux gazeux. La vitesse de rotation est, en première approximation, proportionnelle à la vitesse d'écoulement, donc au débit. Si cette hélice entraîne un totalisateur, celui-ci indique le volume ayant traversé l'appareil. Pendant de nombreuses années, ces appareils ont eu une étendue de mesure faible et des qualités métrologiques douteuses qui en ont freiné le développement. Aujourd'hui, ces débitmètres sont très largement utilisés, en particulier en transport de gaz. Ils présentent une excellente exactitude en débit stabilisé. Ils sont moins encombrants et moins chers que les débitmètres à pistons rotatifs de calibre équivalent. [4]

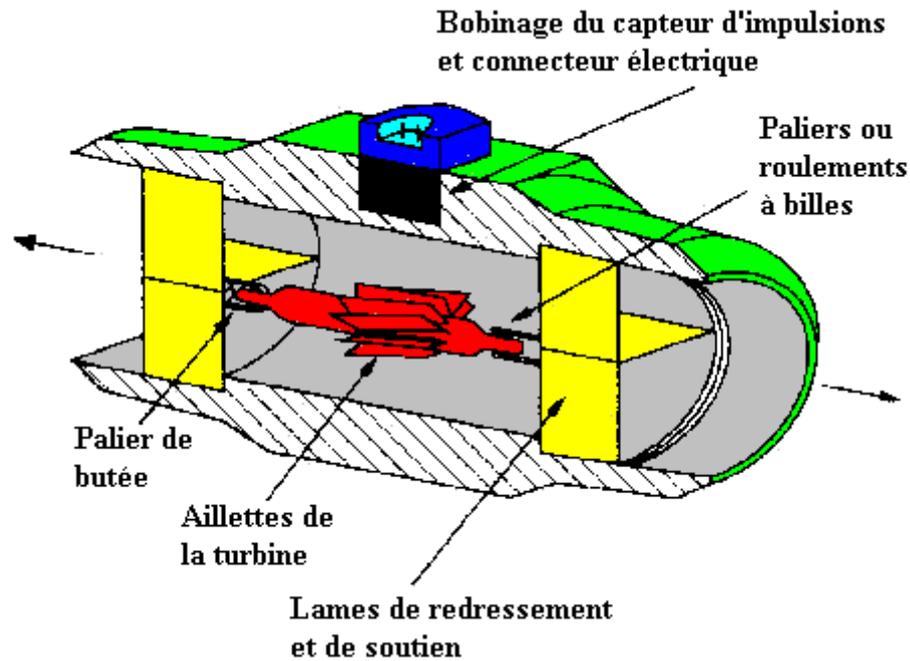


Figure I.4 : Débitmètre à turbine [7]

#### I.5.1.4 Débitmètres à section variable :

Le débitmètre à section variable est un débitmètre à flotteur utilisé pour mesurer le débit de liquide ou de gaz. Le débitmètre à section variable est composé d'un tube et d'un flotteur. Le flotteur réagit aux changements de débit de manière linéaire. Les gammes de débit sont généralement de 10 à 1. Pour les débitmètres à section variable de laboratoire OMEGAMD, il est possible d'obtenir davantage de flexibilité grâce à l'utilisation d'équations de corrélation. Le débitmètre à flotteur est populaire en raison de son échelle linéaire, sa gamme de mesure relativement longue et sa faible perte de pression. Il est simple à installer et à entretenir. [8]

##### I.5.1.4.1 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement du débitmètre à section variable est basé sur le principe des sections variables.

le débit du fluide soulève un flotteur dans un tube conique, augmentant la section de passage du fluide. Plus le débit est élevé, plus le flotteur est soulevé. La hauteur du flotteur est directement proportionnelle au débit. Avec les liquides, le flotteur est soulevé par la combinaison de la force de flottabilité du liquide et la hauteur dynamique du fluide. Avec des gaz, la force de flottabilité est négligeable, et le flotteur répond à la hauteur dynamique seule. Le flotteur se déplace vers le haut ou le bas du tube proportionnellement au débit du fluide et à la surface annulaire entre le flotteur et la paroi du tube. Le flotteur atteint une position stable dans le tube lorsque la force vers le haut exercée par le fluide en écoulement est égale à la force de gravité vers le bas exercée par le poids du flotteur. Un changement de débit bouleverse cet équilibre des forces. Le flotteur se déplace ensuite vers le

haut ou vers le bas, en changeant la surface annulaire jusqu'à ce qu'il atteigne à nouveau une position où les forces sont en équilibre. Pour correspondre à l'équation de la force, le flotteur du débitmètre à section variable prend une position distincte pour chaque débit constant. Cependant, il est important de noter que puisque la position du flotteur dépend de la gravité, le débitmètre à flotteur doit être orienté et monté verticalement. [8]

## I.5.2 Débitmètres de nouvelle technologie :

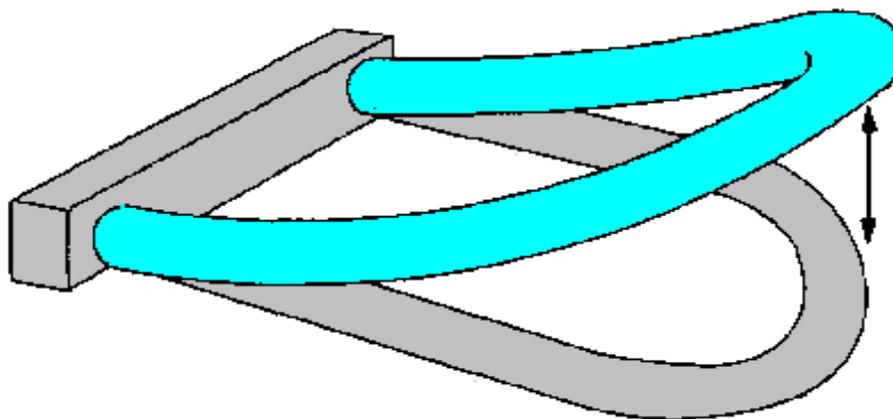
### I.5.2.1 Débitmètre à effet CORIOLIS :

La force de CORIOLIS (Mathématicien français) explique notamment pourquoi les cyclones tournent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud et dans le sens inverse dans l'hémisphère Nord. Il est question, dans un système en rotation, de la force qui agit perpendiculairement sur la masse en mouvement dans le système, selon la vectrice vitesse relative et sur l'axe de rotation du système. Pour une masse  $m$  se déplaçant à une vitesse  $v$ , dans un système en rotation ayant lui-même une vitesse angulaire  $\omega$ , la force de CORIOLIS vaut :

$$F = 2 \cdot m \cdot a \cdot V \quad (I.5)$$

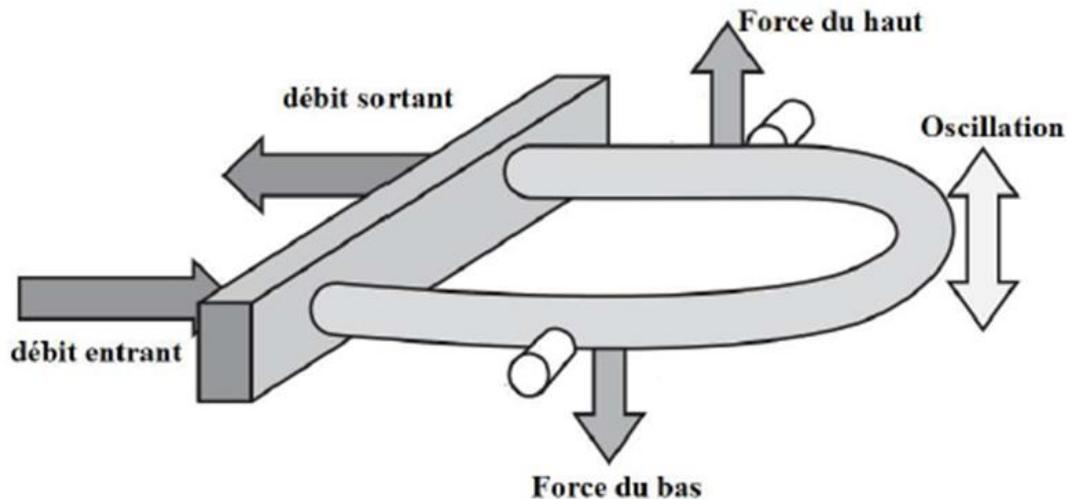
F : La force de CORIOLIS

Le débitmètre à CORIOLIS utilise comme détecteur un tube en U sans obstacle (voir figure I.5)



**Figure I.5 :** Débitmètre à effet CORIOLIS [7]

Le tube de mesure vibre à sa fréquence naturelle à l'intérieur du boîtier du capteur. Le tube de mesure est actionné par un bobinage électromagnétique situé au centre de la courbure du tube et vibre comme un diapason. Le fluide s'écoule dans le tube de mesure et contraint de suivre le mouvement vertical du tube vibrant. Lorsque le tube monte pendant une moitié de sa période vibratoire, le fluide traversant le détecteur résiste à son entraînement vers le haut en repoussant le tube vers le bas. [7]



**Figure I.6 :** Principe de fonctionnement de débitmètre Coriolis [7]

A la sortie du détecteur, le fluide a un mouvement ascendant, induit par le mouvement du tube. Lorsqu'il franchit le coude du tube, le fluide résiste aux modifications de son mouvement vertical en repoussant le tube vers le haut. La différence de forces entraîne une torsion du tube de mesure. Lorsque le tube descend pendant la seconde moitié de sa période vibratoire, il se tord dans le sens opposé. C'est cette caractéristique de torsion qui est appelé effet CORIOLIS. Du fait de la seconde loi de mouvement de NEWTON, l'amplitude de la torsion du tube de mesure est directement proportionnelle au débit massique du fluide traversant le tube. Les détecteurs électromagnétiques situés de part et d'autre du tube de mesure enregistrent la vitesse du tube vibrant. Le débit massique se détermine en mesurant la différence de temps entre les signaux de détecteurs de vitesse. En effet la torsion du tube de mesure, pendant l'écoulement du fluide, entraîne une différence de temps entre les deux signaux de vitesse. C'est cette différence de temps qui est directement proportionnelle au débit massique traversant le tube et demeure indépendante des propriétés de ce fluide.[7]

- Domaine d'utilisation : liquide propre et visqueux (pâtes, boues). Ce dispositif exige l'absence de toute bulle de vapeur formée momentanément dans le liquide et susceptible de perturber la mesure ;

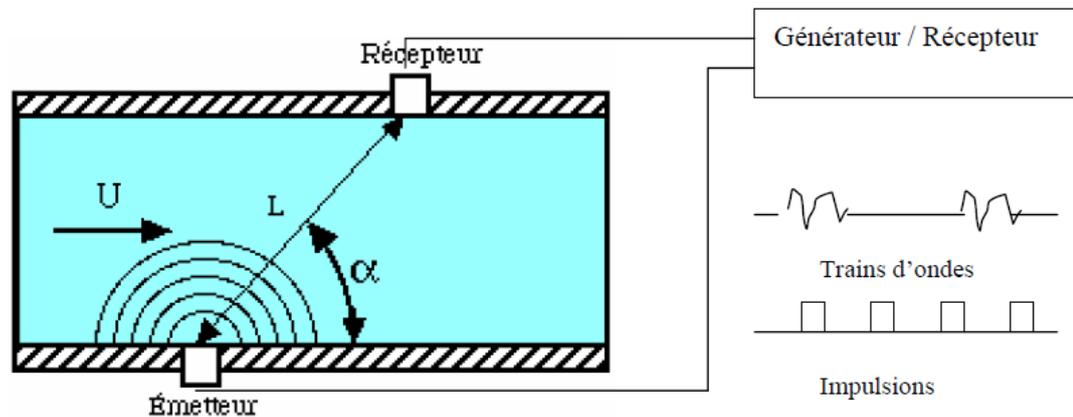
- Diamètre de canalisation : < 13 mm ;

- Précision : 1 % ;

### **I.5.2.2 Débitmètre à ultrason :**

La technique de comptage par ultrasons est connue depuis 1928, mais elle n'a pu être exploitée de façon intégrale que 40 ans après dans le domaine industriel, ceci grâce aux progrès dans le domaine de l'électronique et de la technologie numérique. Les premiers appareils sont donc apparus dans les

années 60 et cette technologie n'a cessé de se développer depuis. Le débitmètre ultrasonique a été développé dans les années 60 pour aider au lancement des missiles sous-marins dans les sous-marins. Parmi les deux classes générales des débitmètres ultrasoniques (temps de transit, Doppler), la méthode de temps de transit a démontré des performances acceptables pour le comptage du gaz naturel. [4]



**Figure I.7 :** Principe de fonctionnement d'un débitmètre à ultrason [9]

Le temps mis par l'onde ultrasonique pour parcourir la distance L entre l'émetteur et le récepteur est :

$$t = \frac{L}{c + U \cos(\alpha)} \quad (\text{I.6})$$

Où :

c : est la vitesse de propagation du son dans le fluide ;

U : Vitesse du fluide ;

alpha : Angle entre la vitesse U et la direction définie par le couple émetteur/récepteur.

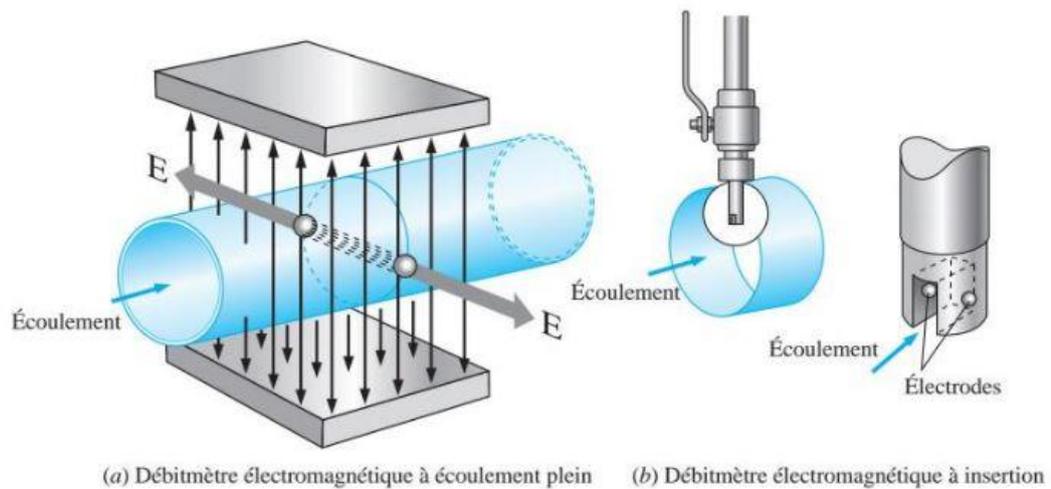
### I.5.2.3 Débitmètre électromagnétique :

Les débitmètres électromagnétiques sont utilisés depuis les années 1950 et ils présentent différents designs comme les débitmètres à écoulement plein et à insertion.

Un débitmètre électromagnétique à écoulement plein est un dispositif non intrusif, qui consiste en un rouleau qui encercle la conduite et deux électrodes introduites dans la conduite le long d'un diamètre avec la surface interne de la conduite de sorte que les électrodes sont en contact avec le fluide, mais n'interfèrent pas avec l'écoulement et n'entraînent donc aucune perte. Les électrodes sont connectées à un voltmètre. Les rouleaux génèrent un champ magnétique quand ils sont soumis à un courant électrique. Et le voltmètre mesure la différence de potentiel électrique entre les deux

électrodes. Cette différence de potentiel est proportionnelle à la vitesse d'écoulement du fluide conducteur, et la vitesse d'écoulement peut donc être mesurée en la reliant à la tension générée.

Les débitmètres électromagnétiques à insertion fonctionnent de façon similaire, mais le champ magnétique est confiné au sein d'un canal d'écoulement au bout d'une tige insérée dans l'écoulement. Comme illustré sur la figure (I-8) [10].



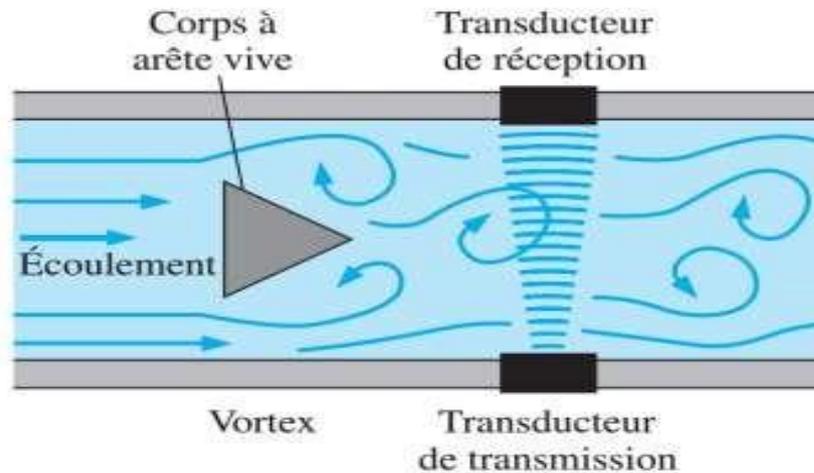
**Figure I.8:** Débitmètres électromagnétiques (a) à écoulement plein et (b) à insertion [10].

- **Domaine d'utilisation** : liquide visqueux, pâteux, chargés d'impuretés, abrasifs ou très corrosifs à condition qu'ils soient conducteurs de l'électricité (ce qui n'est pas le cas des hydrocarbures) ;
- **Diamètre de canalisations** : 3 mm à 3 m ;
- **Bonne précision** de l'ordre de 1 % (limitée pour les faibles vitesses d'écoulement) ;
- Mesure ne dépendant pas des caractéristiques physiques du liquide (viscosité, densité, granulométrie) et possible à haute température (450 °C) et haute pression (1000 bars).

#### I.5.2.4 Débitmètre à vortex :

Un débitmètre à vortex consiste en un corps à arête vive placé dans l'écoulement, qui sert de générateur de vortex, et un détecteur (comme un transducteur de pression qui enregistre l'oscillation de la pression), placé à une petite distance en aval sur la surface interne de la paroi pour mesurer la fréquence de remous. Le détecteur peut être un capteur ultrasonique, électronique, ou fibre optique qui enregistre les modifications de la forme du vortex et transmet un signal. Un microprocesseur

utilise alors l'information de la fréquence pour calculer et afficher la vitesse d'écoulement ou le débit [10]. Comme illustré sur la figure I.9



**Figure I.9 :** Fonctionnement d'un débitmètre à vortex [10]

#### I.5.2.5 Débitmètres massiques thermiques :

La mesure de débitmètre massique thermique, qui remonte aux années 1930, est une méthode quasi directe, adapté, surtout à la mesure du débit de gaz. Les débitmètres massique thermique déduisent les propriétés thermiques du fluide en écoulement (tels que la chaleur spécifique et la conductivité thermique) et ils sont capables de fournir des mesures qui sont proportionnels à la masse du milieu. Dans les plages normalement rencontrées dans l'industrie des processus, la chaleur spécifique du gaz est essentiellement indépendante de la pression et de la température et proportionnelle à la densité et donc à la masse. Les deux façons les plus courantes de mesure le débit en utilisant des techniques thermiques sont de mesurer le taux de perte de chaleur du corps chauffé dans le courant d'écoulement, ou de mesurer la hausse de la température du fluide en écoulement quand il est chauffé. Un débitmètre thermique massique produira généralement un signal lié au débit massique, et convertir la variable mécanique (débit) par l'intermédiaire d'une variable thermique (transfert thermique) en signale électrique (courant ou tension) qui peut être traité après par un microcontrôleur par exemple. Le schéma suivant illustre (figure I.10) ce principe de fonctionnement. La gamme de fonctionnement de n'importe quel débitmètre massique dépend des propriétés du fluide telles que la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la densité. [2]

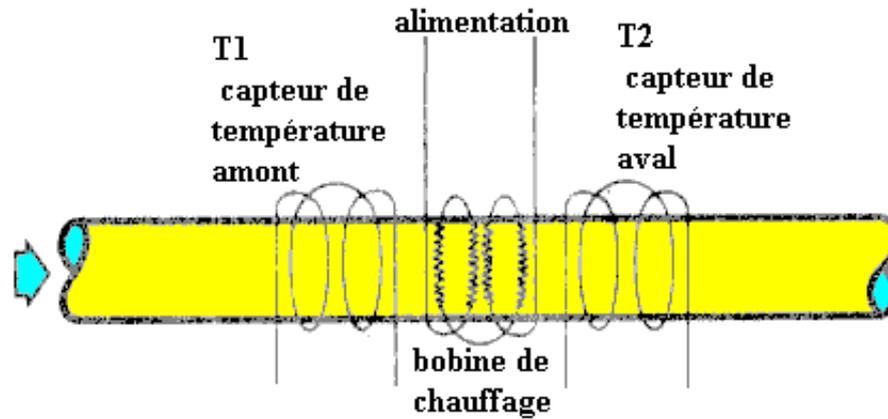


Figure I.10 : Débitmètre thermique [7]

## I.6 Autres débitmètres :

### I.6.1 Débitmètre à cible :

Il comprend un disque (cible), centré dans une conduite. La surface de la cible est placée à  $90^\circ$  par rapport à l'écoulement du fluide. La force exercée par le fluide sur la cible permet une mesure directe du débit de fluide.

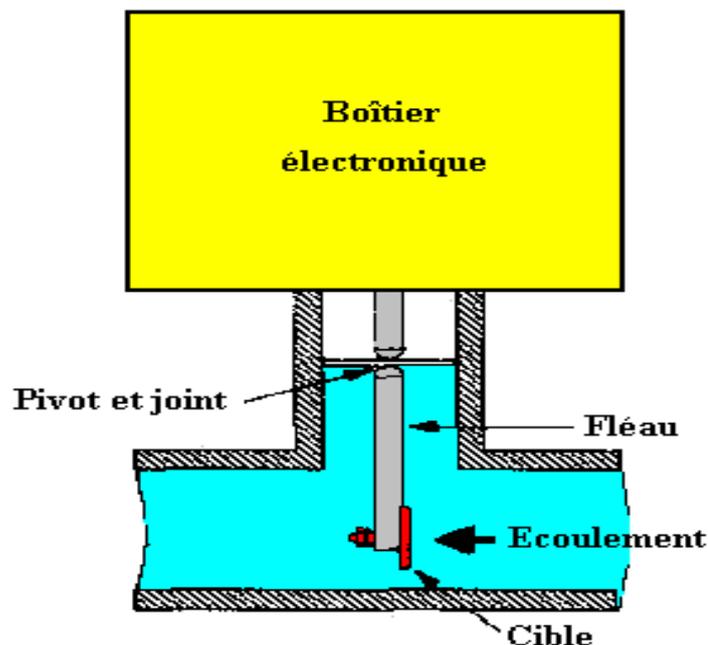


Figure I.11 : Débitmètre à cible

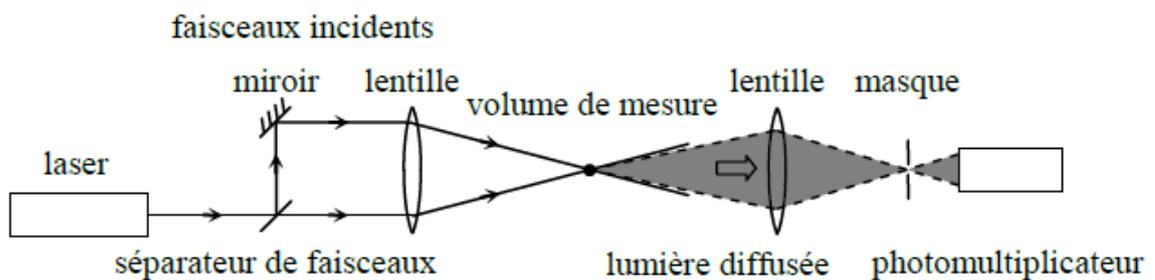
Comme précédemment, le signal de sortie est une pression différentielle, un calculateur est nécessaire pour l'obtention d'un signal proportionnel au débit. [11]

- domaine d'utilisation : fluides chargés ou corrosifs
- diamètre de canalisation: 15 à 1800 mm

- Précision : 1 à 2 % de la valeur réelle

### I.6.2 Vélométrie laser Doppler :

La vélocimétrie laser Doppler (acronyme anglais LDV pour “laser Doppler velocimetry”), aussi appelée anémométrie laser Doppler lorsqu’il s’agit plus particulièrement d’utilisation dans l’air (ou LDA pour “laser Doppler anemometry”), est une technique non invasive, c’est-à-dire qui ne nécessite pas l’introduction d’une sonde matérielle dans le milieu à explorer. La mesure est optique et ponctuelle, elle s’effectue à l’intersection de deux faisceaux de lumière cohérente. Il est néanmoins nécessaire d’ensemencer le fluide en particules suffisamment petites et avec de bonnes propriétés de diffusion de la lumière pour suivre parfaitement l’écoulement et réémettre une intensité lumineuse suffisante pour être détectée. La LDV s’est développée rapidement dans les années 1960 avec l’apparition des premiers lasers (Yeh et al., 1964, première mesure dans l’eau, Rolfe et al., 1967, première mesure dans l’air, Wisler et al., 1972, première mesure en machine tournante). Le système de base permet la mesure d’une composante du vecteur vitesse mais des vélocimètres plus complexes, utilisant plusieurs longueurs d’onde laser, permettent d’obtenir simultanément deux composantes ou les trois composantes de la vitesse. Par ailleurs, la fréquence d’acquisition des données peut être suffisamment élevée pour permettre des mesures de turbulence. Cette technique est donc couramment utilisée en recherche expérimentale et dans l’industrie pour la mesure de vitesse dans les écoulements en milieux fluides transparents (gaz, liquides, milieux diphasiques, généralement l’air et l’eau, combustion, ...), où il est possible d’avoir des accès optiques. La gamme d’application va des vitesses très lentes aux vitesses supersoniques. [12]



**Figure I.12 :** vélocimétrie laser Doppler (Montage en diffusion avant)

### I.6.3 Débitmètre ionique :

Trois fils sont placés perpendiculairement au déplacement du fluide. Le fil central est placé à un potentiel élevé, les deux autres sont reliés à la masse. Ce champ électrique crée une ionisation du fluide, et deux courants électriques  $I_1$  et  $I_2$ , du fil central à chacun des autres fils. Si la vitesse du fluide est nulle,

Les courants  $I_1$  et  $I_2$  sont identiques. Si le fluide est en mouvement, à la vitesse  $V$ , le système devient asymétrique. La différence des intensités  $I_2 - I_1$  est proportionnelle à  $V$ , alors que la somme  $I_1 + I_2$  est sensiblement constante (fig. I.13). [13]

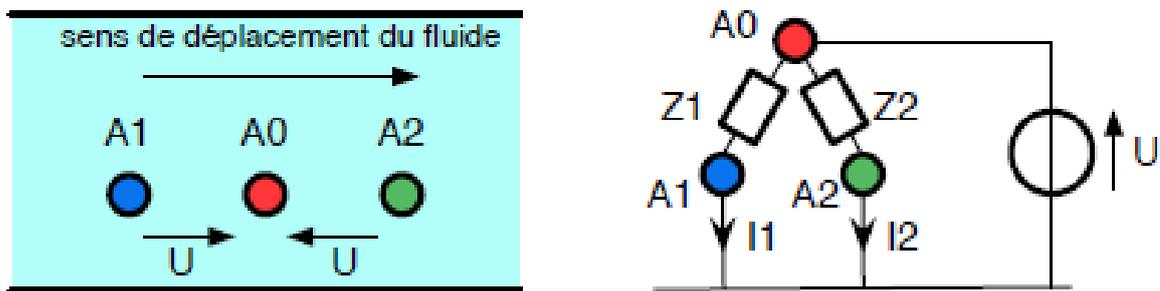


Figure I.13 : Schéma de principe et électrique d'un débitmètre ionique

### I.6.4 Débitmètre à piston :

Les débitmètres à piston sont des modèles de débitmètres mécaniques adaptés pour mesurer des débits peu élevés de liquides à moyenne ou forte viscosité. Ils sont équipés d'un revêtement en laiton ou en aluminium qui résiste au passage des fluides même agressifs.

Les débitmètres à piston sont équipés d'un piston rotatif, mis en mouvement au contact du fluide s'écoulant dans la conduite. Un aimant est fixé sur le piston et transmet des impulsions à un capteur, permettant d'en déduire le débit du liquide selon l'effet de Hall. Les débitmètres à piston permettent de réaliser des mesures avec une précision atteignant 0,5% de la valeur mesurée. Ce type de débitmètre peut fonctionner avec des fluides dont la température s'élève à 300°C. [14]

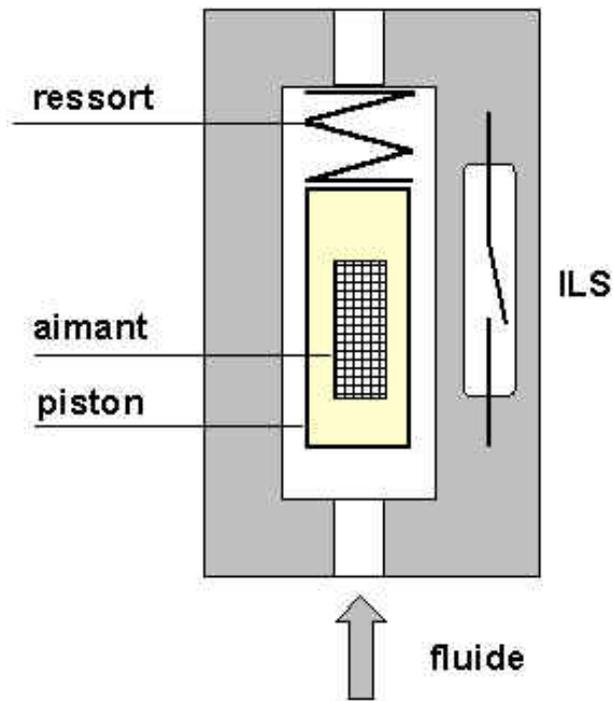


Figure I.14: Débitmètre à piston [15]

#### I.6.5 Débitmètre à fil ou film chaud :

Un débitmètre à fil chaud utilise le phénomène de transfert de chaleur entre un corps chaud et un gaz pour quantifier un débit. Lorsqu'un gaz circule au-dessus d'une surface chaude, un transfert de chaleur s'opère entre la surface chaude et le gaz. [16]

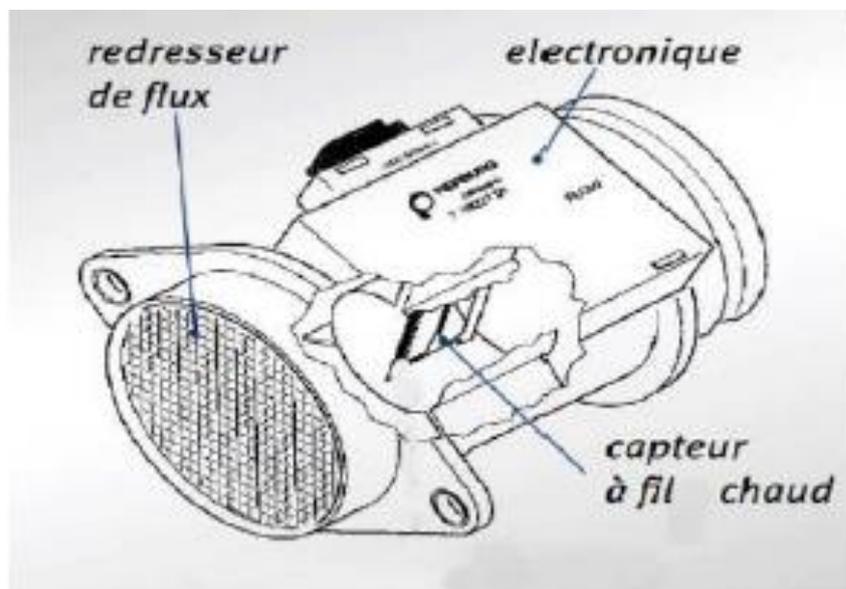


Figure I.15: Débitmètre à fil chaud

**I.6.5.1 Principe de fonctionnement :**

Lorsque on place dans un écoulement un fil porté par effet Joule à une température supérieure da température de cet écoulement. Il se produit alors un échange de chaleur par convection, cet échange est fonction des propriétés physiques du fluide, de sa vitesse et de l'écart de température entre l'élément chauffé et le fluide.

La température d'équilibre du fil qui constitue le capteur est déterminée par mesure de sa résistance : elle est fonction de la puissance Joule dissipée et de la vitesse de fluide qu'il s'agit de déterminer.

Le métal utilisé pour la réalisation du capteur doit avoir un coefficient de température de la résistance élevé : dans les gaz, on utilise un film de platine ou de tungstène très fin ( $0.6\mu\text{m} < D < 10\mu\text{m}$ ). Dans les liquides, pour des raisons de solidité, le capteur est un film mince de platine, déposé sur un cône ou un cylindre. [16]

**• Caractéristiques :**

Limites de température :  $-30^{\circ}\text{C}$  à  $+80$

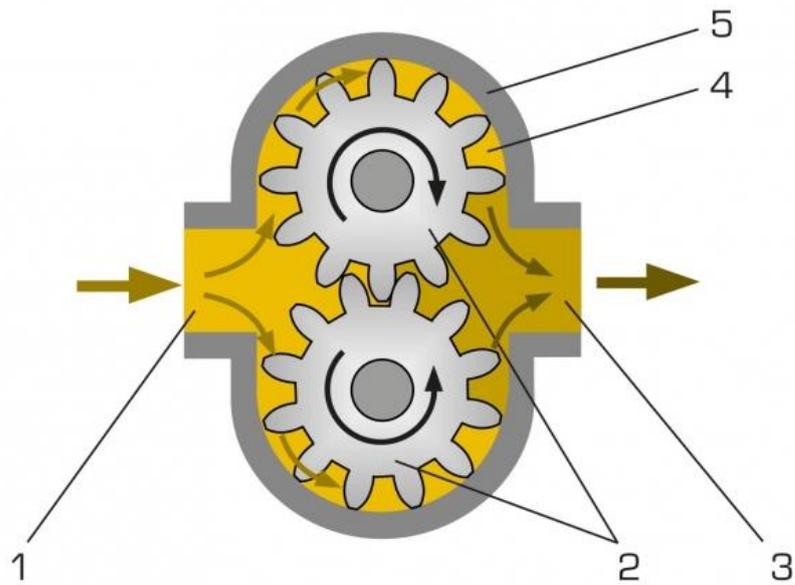
Débit : jusqu'à 0 à 99 909 m/h

Vitesse du fluide : 0.15 à 3 m/s et 3.1 à 30 m/s

Temps de réponse : inférieur à 0,001 s

**I.6.6 Débitmètres à engrenages ovales :**

Deux rotors ovales identiques s'engrènent au moyen de fentes autour du périmètre de l'engrenage. Les engrenages de forme ovale sont utilisés pour balayer un volume exact du liquide traversant la chambre de mesure du débit lors de chaque rotation. Le débit peut être calculé en mesurant la vitesse de rotation. Des tolérances étroites garantissent que les fuites sont minimisées. Contrairement aux compteurs à disque nutating (nutating), le facteur d'étalonnage ne varie pas avec la viscosité. Bien que des revendications de haute performance soient faites, les débitmètres à engrenages ovales ne sont généralement pas aussi précis que la conception à palettes coulissantes. Un autre inconvénient est que des pulsations sont introduites dans le débit par le compteur. Les débitmètres à engrenages ovales sont généralement utilisés pour mesurer le débit de solvants et de liquides « secs ». [6]

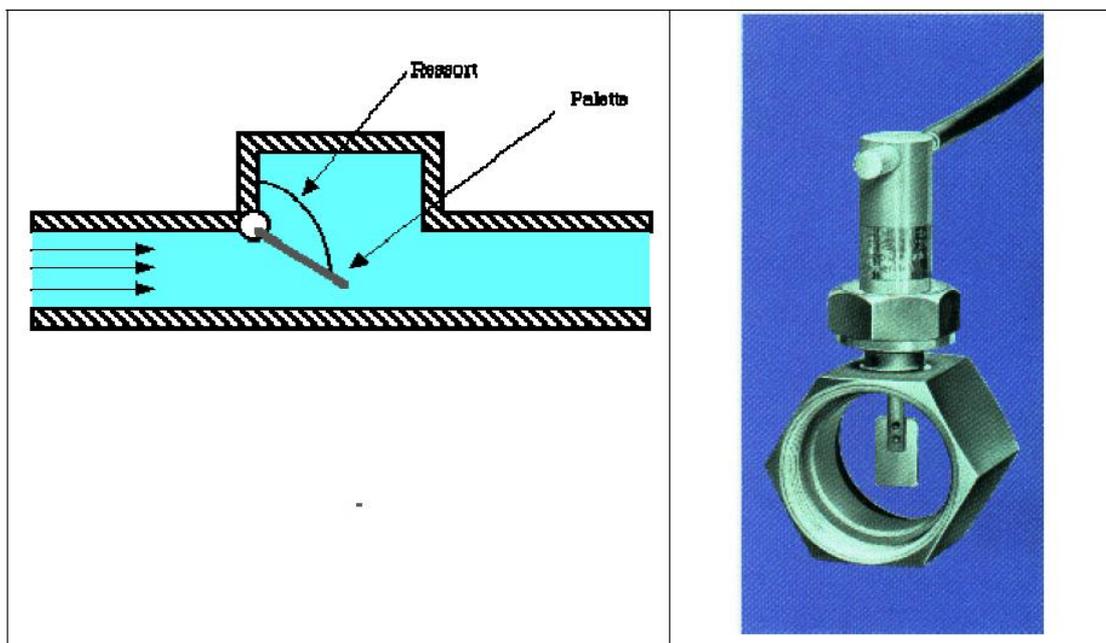


**Figure I.16:** Débitmètre à engrenages ovales [17]

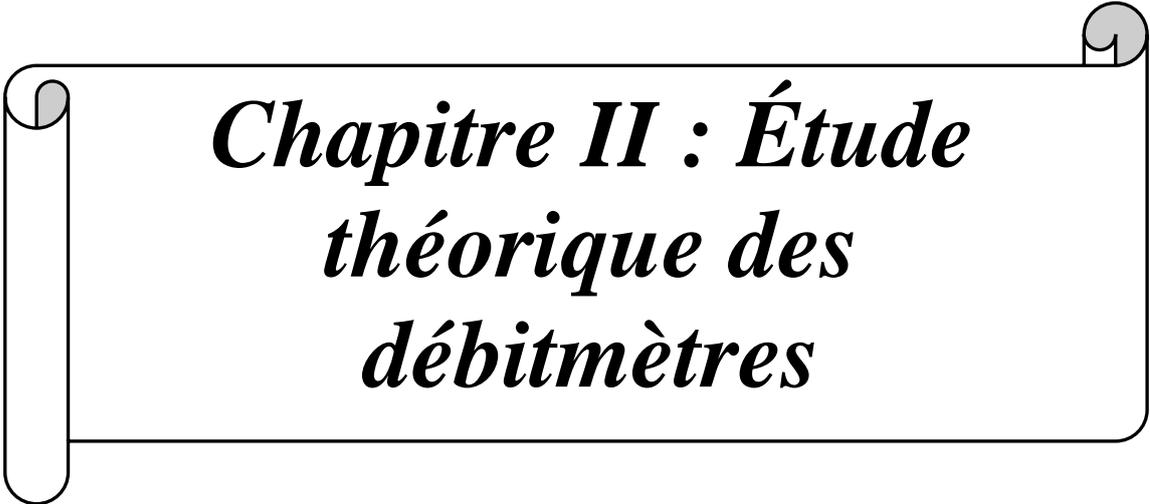
1) entrée d'huile, 2) engrenages, 3) sorties d'huile, 4) interstices des dents utilisé comme chambre de refoulement, 5) boîte

### I.6.7 Débitmètre à palettes :

La palette est soumise à la force exercée par l'écoulement du fluide, à son poids et éventuellement à l'action d'un ressort de rappel. La position d'équilibre de la palette est fonction du débit et peut être converti en signal électrique à l'aide d'un potentiomètre dont l'axe est fixé à celui de la palette [18].



**Figure I.17 :** Débitmètre à palettes [18]



*Chapitre II : Étude  
théorique des  
débitmètres*

Dans ce chapitre, nous aborderons un rappel sur la mécanique des fluides et les différentes méthodes de mesure de débit (tube de Venturi, diaphragme, tube de Pitot et rotamètre).

### II.1 Généralités sur mécanique des fluides :

La mécanique des fluides est la science des lois de l'écoulement des fluides. Elle est la base du dimensionnement des conduites de fluides et des mécanismes de transfert des fluides. C'est une branche de la physique qui étudie les écoulements de fluides c'est-à-dire des liquides et des gaz lorsque ceux-ci subissent des forces ou des contraintes. Elle comprend deux grandes sous-branches

- La statique des fluides : appelée généralement « l'hydrostatique », c'est la filière de la mécanique des fluides qui s'intéresse aux comportements des fluides au repos.
- La dynamique des fluides : appelée généralement « l'hydrodynamique », c'est la filière de la mécanique des fluides qui s'intéresse aux comportements des fluides en mouvement. [19]

### II.2 Définition des fluides :

Un fluide peut être considéré comme étant une substance formée d'un grand nombre de particules matérielles, très petites et libres de se déplacer les unes par rapport aux autres. C'est donc un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité et qui peut s'écouler.

Dans un milieu fluide, les interactions entre les molécules sont faibles, ce qui autorise une déformation. Un corps fluide adopte ainsi la forme du réservoir qui le contient.

Parmi les fluides on distingue les liquides et les gaz.

➤ **Les liquides:** Corps peu compressibles et dont la masse volumique est importante (eau, huile...).

Les liquides occupent des volumes bien définis et représentent des surfaces libres.

➤ **Les gaz:** Corps très compressibles et même extensibles (dioxyde de carbone, Air...).

Les gaz se dilatent jusqu'à occuper toutes les parties du récipient qui le contient [20].

#### II.2.1 Fluides incompressible :

Un fluide est dit incompressible lorsque le volume occupé par une masse donnée ne varie pas en fonction de la pression extérieure. La masse volumique est constante ; celle-ci s'exprime par :  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ). [21]

**II.2.2 Fluides 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.

**II.2.3 Fluides réels :**

Un fluide est dit réel si, pendant son mouvement, les forces de contact ne sont pas Perpendiculaires aux éléments de surface sur lesquelles elles s'exercent (elles Possèdent donc des composantes tangentielles qui s'opposent au glissement des couches fluides les unes sur les autres). Cette résistance est caractérisée par la viscosité.

**II.3 Caractéristiques d'un fluide : [22]****II.3.1 Masse volumique :**

La masse volumique  $\rho$  d'un fluide est la masse de l'unité de volume de ce fluide.

$$\rho = \frac{\text{masse}}{\text{volume}} = \frac{m}{v} \left( \text{Kg} / \text{m}^3 \right) \quad (\text{II.1})$$

**II.3.2 Poids volumique (Poids spécifique) :**

Il représente la force d'attraction exercée par la terre sur l'unité de volume, c'est -à-dire le poids de l'unité de volume.

$$\varpi = \frac{mg}{v} = \frac{\rho v g}{v} = \rho g \left( \text{N} / \text{m}^3 \right) \quad (\text{II.2})$$

**II.3.3 Densité :**

Elle mesure le rapport de la masse volumique du fluide rapportée à un corps de référence. C'est une grandeur sans unité définie par :

$$d = \frac{\text{masse volumique du fluide}}{\text{masse volumique du fluide de référence}} = \frac{\rho}{\rho_{\text{réf}}} \text{ (sans unité)} \quad (\text{II.3})$$

**Remarque :**

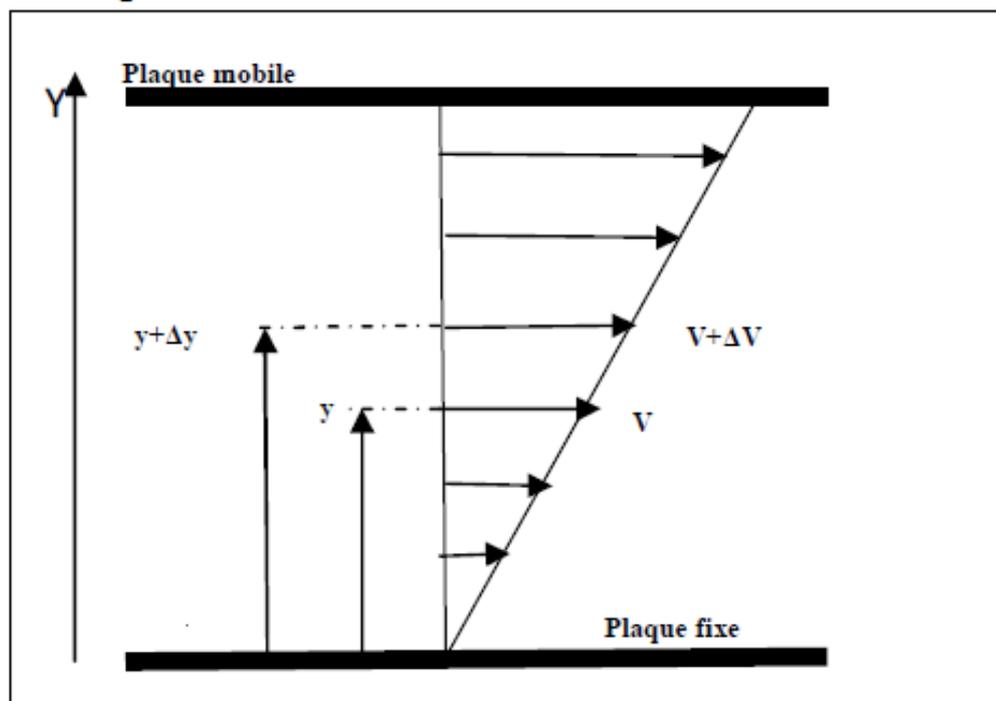
Dans le cas des liquides on prendra l'eau comme fluide de référence. Dans le cas des gaz on prendra l'air comme fluide de référence.

### II.3.4 Viscosité :

#### II.3.4.1 Viscosité dynamique :

C'est une grandeur qui caractérise les frottements internes du fluide, autrement dit la capacité du fluide à s'écouler. Elle caractérise la résistance d'un fluide à son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force. C'est à dire les fluides de grande viscosité résistent à l'écoulement et les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement.

Sous l'effet des forces d'interaction entre les particules de fluide et celles de la paroi, chaque particule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. On dit qu'il existe un profil de vitesse (Figure II.1). Considérons 02 couches de fluide adjacentes distantes de  $\Delta y$ , la force de frottement  $F$  qui s'exerce 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  $\Delta V$ , à leur surface  $S$  et inversement proportionnelle à  $\Delta y$ . Le facteur de proportionnalité  $\mu$  est le coefficient de viscosité dynamique du fluide. [22]



**Figure II.1** : Profil de vitesse écoulement de Couette entre deux plaques, une mobil et l'autre fixe

$$F = \mu S \frac{\Delta V}{\Delta y} \Rightarrow \tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{\Delta V}{\Delta y} \quad (\text{II.4})$$

### II.3.4.2 Viscosité cinématique :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (\text{II.5})$$

### II.4 Ecoulements :

Les expériences réalisées par Reynolds (1883) lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique rectiligne dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : laminaire et turbulent. [23]

$$\text{Re} = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (\text{II.6})$$

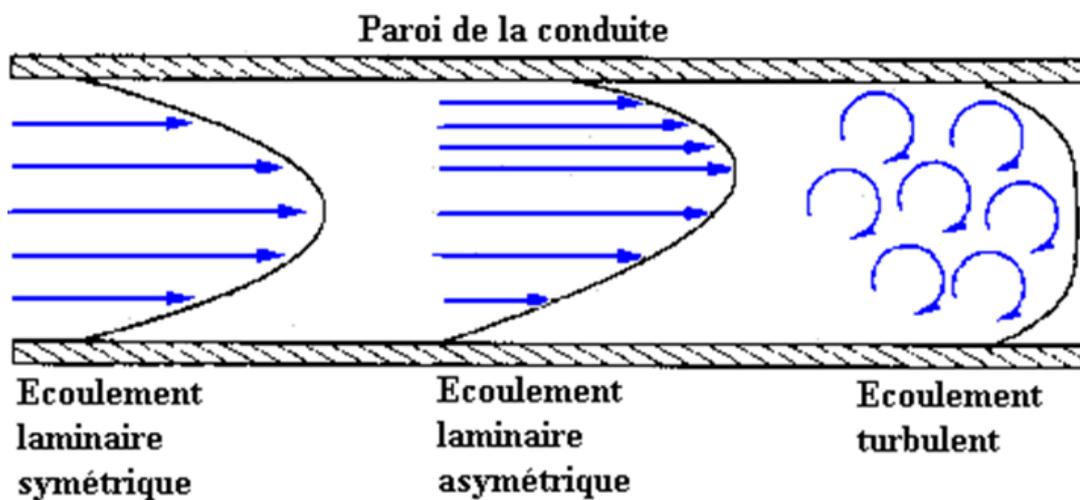


Figure II.2 : Différents types d'écoulement.[20]

#### II.4.1 Écoulement laminaire : $\text{Re} < 2300$

Un écoulement est laminaire lorsque les particules de liquide se déplacent parallèlement à la conduite c'est un écoulement régulier sans aucune turbulence.

Si on fait couler un filet de teinture à l'entrée de la conduite ou s'écoule de l'eau on constate dans ce cas que ce filet reste rectiligne et parallèle à la conduite sur toute sa longueur L. [23]

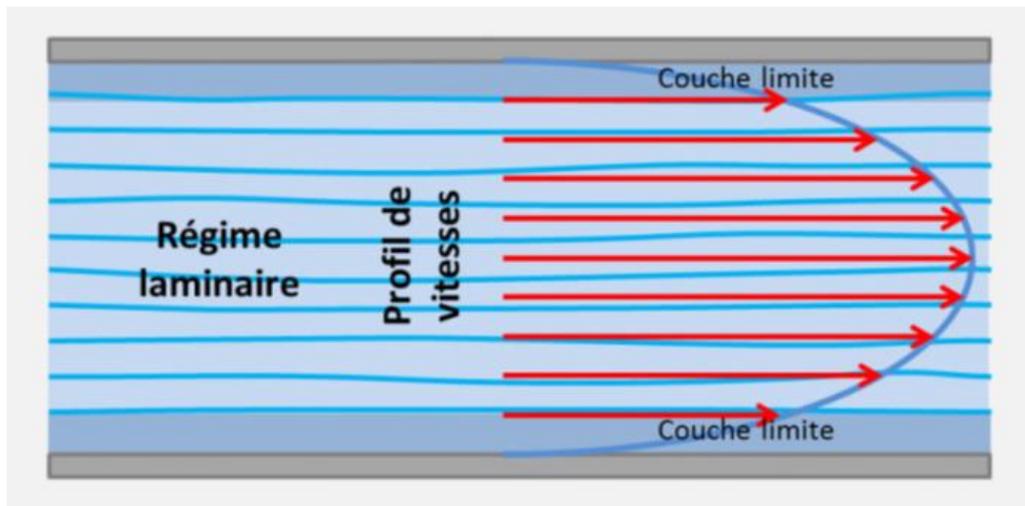


Figure II.3 : Ecoulement laminaire

#### II.4.2 Ecoulement turbulent : $Re > 2300$

Cet écoulement est caractérisé par un mouvement constant des tourbillons et des turbulences.

Si on fait couler un filet de teinture et diffuse d'une façon très désordonnée sur toute la veine fluide. [23]

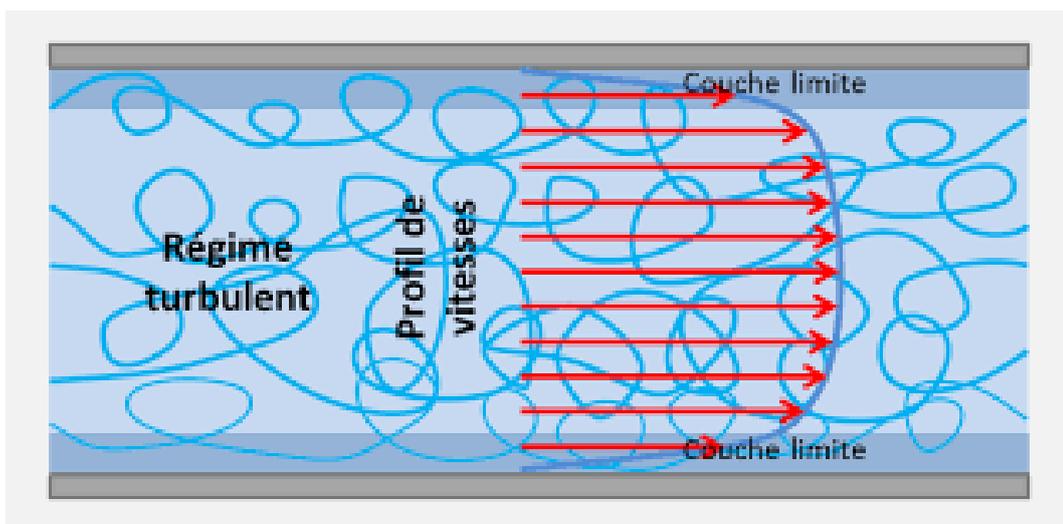


Figure II.4 : Ecoulement turbulent

#### II.5 Théorème de Bernoulli : [24]

Pour un fluide incompressible ( $\rho = \text{cste}$ ), parfait (non visqueux) et pour un écoulement stationnaire (la vitesse du fluide reste inchangé au cours du temps), l'équation de Bernoulli donne :

$$P + \frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g z = \text{cste} \quad (\text{II.7})$$

L'équation de Bernoulli est une équation de conservation de l'énergie où se produit une accélération dans le flux d'un fluide, simultanément avec la diminution de la pression.

**II.5.1 Principe de conservation de l'énergie :**

Considérons un fluide dans une portion de tube de courant de section droite variable de volume ( $v$ ) et de masse ( $m$ )

Expressions des différentes formes d'énergies

Energie cinétique :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} m V_2^2 - \frac{1}{2} m V_1^2 = \frac{1}{2} \rho v (V_2^2 - V_1^2) \quad (\text{II.8})$$

Energie potentielle :

$$\Delta E_p = mgz_2 - mgz_1 = \rho v g (z_2 - z_1) \quad (\text{II.9})$$

Le travail :

$$W = F_1 \Delta x_1 - F_2 \Delta x_2 = P_1 A_1 \Delta x_1 - P_2 A_2 \Delta x_2 \quad (\text{II.10})$$

$$W = v (P_1 - P_2) \quad (\text{II.11})$$

Les indices « 1 » et « 2 » réfèrent à l'entrée et la sortie du fluide respectivement.

**II.5.2 Application du principe de la conservation de l'énergie :**

L'application du principe de la conservation de l'énergie entre l'entrée et la sortie, donne :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 + \rho g z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \rho g z_2 \quad (\text{II.12})$$

La somme de la pression et de l'énergie mécanique par unité de volume reste constante tout au long du tube de courant. C'est le théorème de Bernoulli (exprimée en termes de pression) :

$$P + \frac{1}{2} V^2 \rho + \rho g z = \text{cste} \quad (\text{II.13})$$

**II.5.3 Autres écritures de l'équation de Bernoulli :**

L'équation de Bernoulli peut s'écrire sous d'autre forme :

Equation de Bernoulli exprimée en termes d'énergie :

En divisant l'équation précédente par  $\rho$ , l'unité des différents termes de devient le Joule par Kilogramme :

$$\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2}V^2 + gz = \text{cste} \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] \quad (\text{II.14})$$

Equation de Bernoulli en termes de hauteur :

En divisant l'équation précédente par  $\rho g$ , l'unité des différents termes devient le mètre :

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{cste} [\text{m}] \quad (\text{II.15})$$

Théorème de Bernoulli pour un fluide réel (visqueux)

La pression d'un fluide réel diminue tout au long d'un conduit dans lequel il s'écoule, même s'il est horizontal et de section uniforme car des frottements s'opposent au glissement des couches fluides les unes sur les autres dû aux forces de viscosité de celui-ci, créant ainsi des pertes de charges dues à la dissipation de l'énergie mécanique entraînant la diminution de pression. L'équation de Bernoulli devient alors :

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g z_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g z_2 + \Delta P \quad (\text{II.16})$$

Où  $\Delta P$  est l'ensemble des pertes de charge entre (1) et (2).

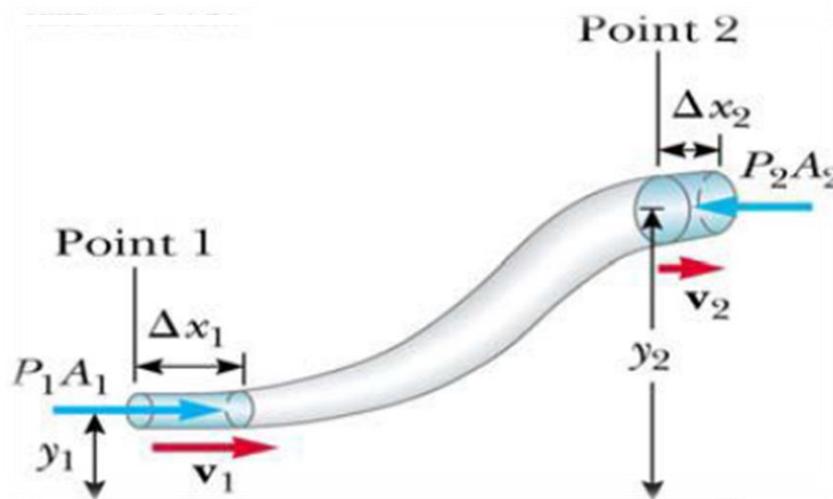


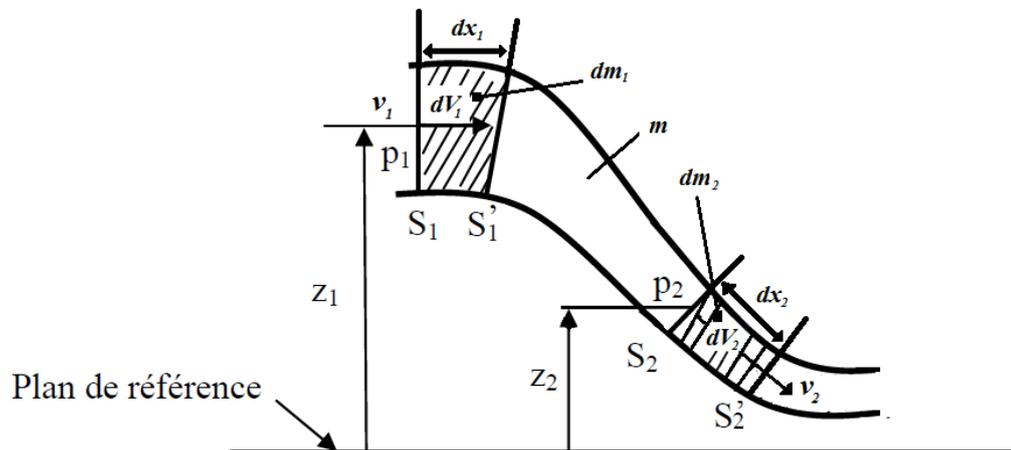
Figure II.5 : Fluide s'écoulant dans une conduite.

### II.6 Equation de continuité :

Considérons un fluide parfait (liquide), qui s'écoule en régime stationnaire dans la canalisation ci-dessous.

On désigne par :

- $S_1$  et  $S_2$  respectivement la section d'entrée et la section de sortie du fluide à l'instant  $t$ ,
- $S'_1$  et  $S'_2$  respectivement les sections d'entrée et de sortie du fluide à l'instant  $t' = t + dt$ ,
- $\vec{V}_1$  et  $\vec{V}_2$  les vecteurs vitesses d'écoulement respectivement à travers les sections  $S_1$  et  $S_2$
- $dx_1$  et  $dx_2$  respectivement les déplacements des sections  $S_1$  et  $S_2$  pendant l'intervalle de temps  $dt$ ,
- $dm_1$  : masse élémentaire entrante comprise entre les sections  $S_1$  et  $S'_1$ ,
- $dm_2$  : masse élémentaire sortante comprise entre les sections  $S_2$  et  $S'_2$ ,
- $m$  : masse comprise entre  $S_1$  et  $S_2$
- $dv_1$  : volume élémentaire entrant compris entre les sections  $S_1$  et  $S'_1$ ,
- $dv_2$  : volume élémentaire entrant compris entre les sections  $S_2$  et  $S'_2$ ,



**Figure II.6 :** Ecoulement d'un fluide parfait dans une canalisation en régime stationnaire

A l'instant  $t$  : le fluide compris entre  $S_1$  et  $S_2$  a une masse égale à  $(dm_1 + m)$ ,

A l'instant  $t + dt$  : le fluide compris entre  $S'_1$  et  $S'_2$  à une masse égale à  $(m + dm_2)$ ,

Par conservation de la masse :

$$dm_1 + m = m + dm_2 \quad (\text{II.17})$$

En simplifiant par  $m$ , on obtient :  $dm_1 = dm_2$

Donc :  $\rho_1 dv_1 = \rho_2 dv_2$

Ou encore :  $\rho_1 S_1 dx_1 = \rho_2 S_2 dx_2$

En divisant par  $dt$  on aboutit à :

$$\rho_1 S_1 \frac{dx_1}{dt} = \rho_2 S_2 \frac{dx_2}{dt} \Leftrightarrow \rho_1 S_1 V_1 = \rho_2 S_2 V_2 \quad (\text{II.18})$$

Puisque le fluide est incompressible :  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$

On obtient l'équation de continuité de la sorte :

$$S_1 V_1 = S_2 V_2 \quad (\text{II.19})$$

Cette relation représente le débit volumique  $Q$  exprimé en ( $\text{m}^3 / \text{s}$ ). L'équation de continuité représente la loi de conservation de masse. [25]

### II.7 Théorème D'Euler :

Une application directe du théorème d'Euler est l'évaluation des forces exercées par les jets d'eau. Celles-ci sont exploitées dans divers domaines : production de l'énergie électrique à partir de l'énergie hydraulique grâce aux turbines, coupe des matériaux, etc. Le théorème d'Euler résulte de l'application du théorème de quantité de mouvement à l'écoulement d'un fluide :

$$\sum \overline{F_{\text{ext}}} = \frac{d\overline{P}}{dt} ; \text{ avec } \overline{P} = m\overline{V_G} \quad (\text{II.20})$$

Ce théorème permet de déterminer les efforts exercés par le fluide en mouvement sur les objets qui les environnent. [26]

### II.8 Pertes de charges :

#### II.8.1 Définition :

Selon l'état de surface intérieur d'une canalisation et la géométrie d'un circuit hydraulique (changement de section, changement de direction, ...) nous pourrions constater des frottements plus ou moins importants exercés par le fluide sur les parois. Cela va se traduire par des pertes de charge plus ou moins importantes.

On distingue deux types de perte de charge :

- la perte de charge linéaire représentant l'énergie perdue entre les deux points,
  - la perte de charge singulière qui intervient lorsque l'écoulement uniforme est localement perturbé.
- [27]

### II.8.2 Pertes de charge singulière :

Quand la conduite subit de brusque variation de section ou de direction, il se produit des pertes de charges dites singulières, elles sont généralement mesurables et font partie des caractéristiques de l'installation.

On les exprime par :

$$J_s = -K_s \frac{V^2}{2} \quad (\text{II.21})$$

Où  $s$  : indice de l'accident de forme de la conduite.

$K_s$  : Coefficient (sans unité) de pertes de charge. Il dépend de la nature et de la géométrie de l'accident de forme.

Les valeurs de  $K_s$  sont données par les constructeurs dans leurs catalogues. [26]

### II.8.3 Pertes de charges linéaires :

Les pertes de charges linéaires, sont des pertes de charge réparties régulièrement le long des conduites. En chaque point d'un écoulement permanent, les caractéristiques de l'écoulement sont bien définies et ne dépendent pas du temps.

La représentation graphique de l'écoulement prend l'allure ci-dessous.

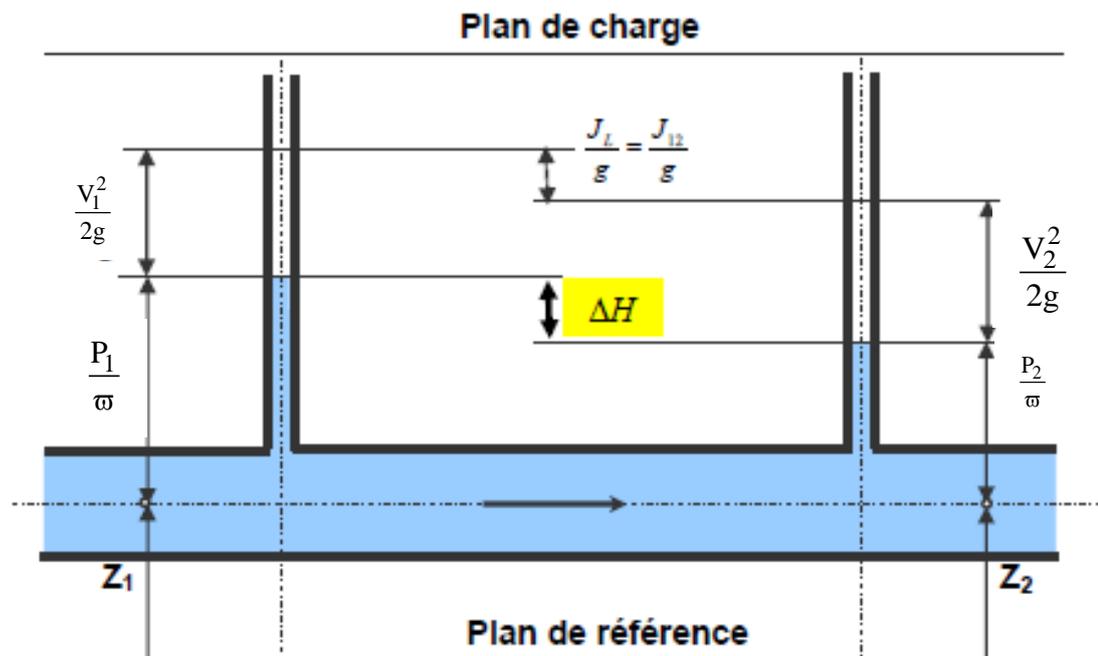


Figure II.7 : ligne de charge, piézométrique et trajectoire d'un écoulement dans une conduite

La vitesse étant constante, la ligne piézométrique et la ligne de charge sont parallèles. La variation de hauteur piézométrique, évaluée en hauteur de liquide est égale à la perte de charge linéaire entre les deux points de mesure.

Les pertes de charge linéaires sont proportionnelles à la longueur  $L$  de la conduite, inversement proportionnelles à son diamètre  $d$ , proportionnelle au carré de la vitesse débitante  $V$  du fluide. [26]

$$J_L = -\lambda \frac{V^2}{2} \left( \frac{L}{D} \right) \quad (\text{II.22})$$

où :

-  $\lambda$  : coefficient de perte de charge linéaire. Il dépend du régime d'écoulement et notamment du nombre de Reynolds  $Re$  .

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

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (\text{Formule de Poiseuille}) \quad (\text{II.23})$$

Dans un régime d'écoulement turbulent lisse :  $2000 < Re < 10^5$

$$\lambda = 0.316 \cdot Re^{-0.25} \quad (\text{Formule de Blasius}) \quad (\text{II.24})$$

#### II.8.4 Diagramme de Moody :

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

- postuler une valeur de  $\lambda$  .
- calculer le terme de droite.
- en déduire une nouvelle valeur de  $\lambda$  à partir du terme de gauche.
- l'intégrer dans le terme de droite, et ainsi de suite.

Généralement, on obtient convergence après 3 ou 4 boucles.

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

Diagramme de Moody-Stanton reliant le coefficient de perte de charge régulière  $\lambda$  au nombre de Reynolds  $Re$  et à la rugosité relative  $\frac{\epsilon}{D}$

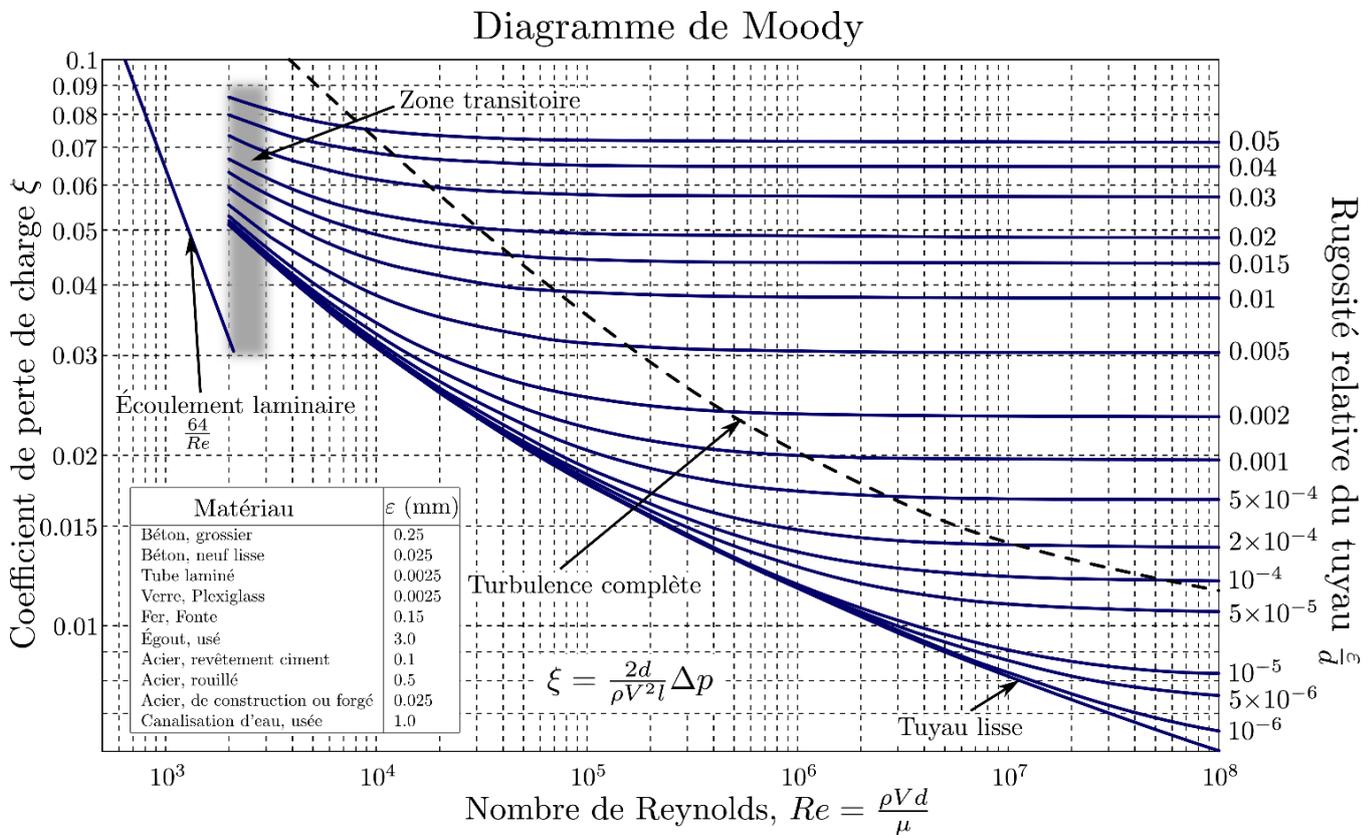


Figure II.8 : Diagramme de Moody [28]

Pour s'en servir, il faut préalablement calculer le nombre de Reynolds et la rugosité relative. Une fois que ces grandeurs sont connues, on peut lire directement le coefficient de perte de charge sur le graphique. [25]

### II.9 Tube de venturi :

Un tube de Venturi est un débitmètre de pression différentielle, composé d'un cylindre d'entrée, d'une section convergente, d'une gorge et d'une section divergente, utilisé depuis de nombreuses années pour mesurer le débit dans une conduite.

Le fluide circulant dans le tuyau passe par une section de contraction vers une gorge, dont la section transversale est inférieure à celle du tuyau, de sorte que la vitesse du fluide dans la gorge est supérieure à celle du tuyau. L'augmentation de la vitesse s'accompagne d'une chute de pression dont l'ampleur dépend du débit. En mesurant la chute de pression, le débit peut être calculé. Au-delà de

la gorge, le fluide est ralenti dans un tuyau de section divergente lentement, la pression augmente au fur et à mesure que la vitesse diminue. [29]

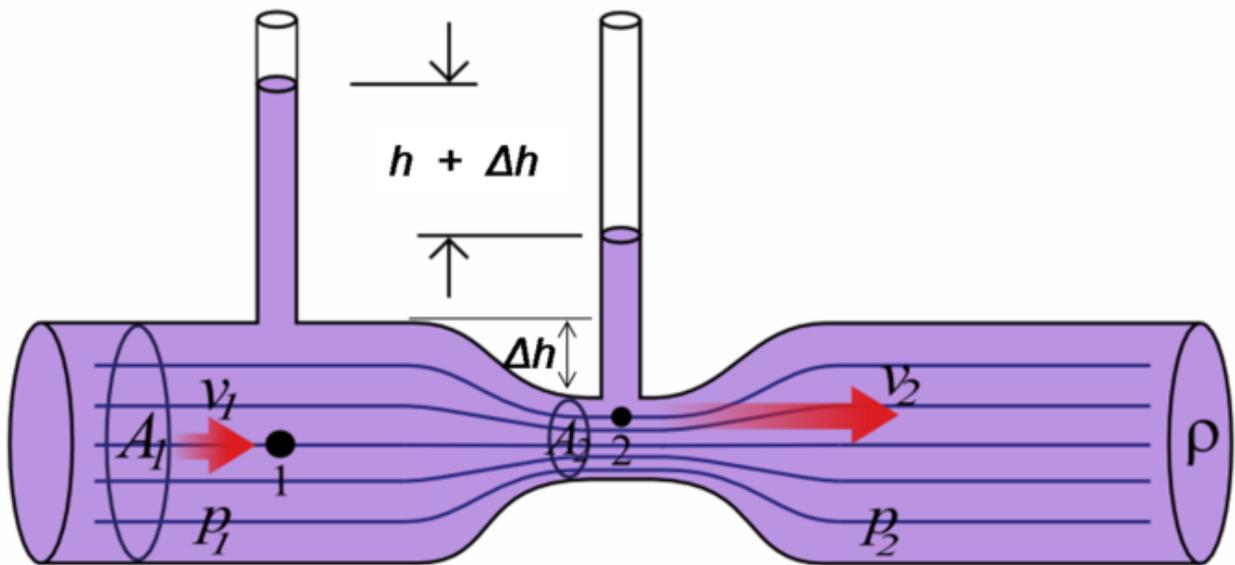


Figure II.9: Schématisation de l'effet Venturi.[30]

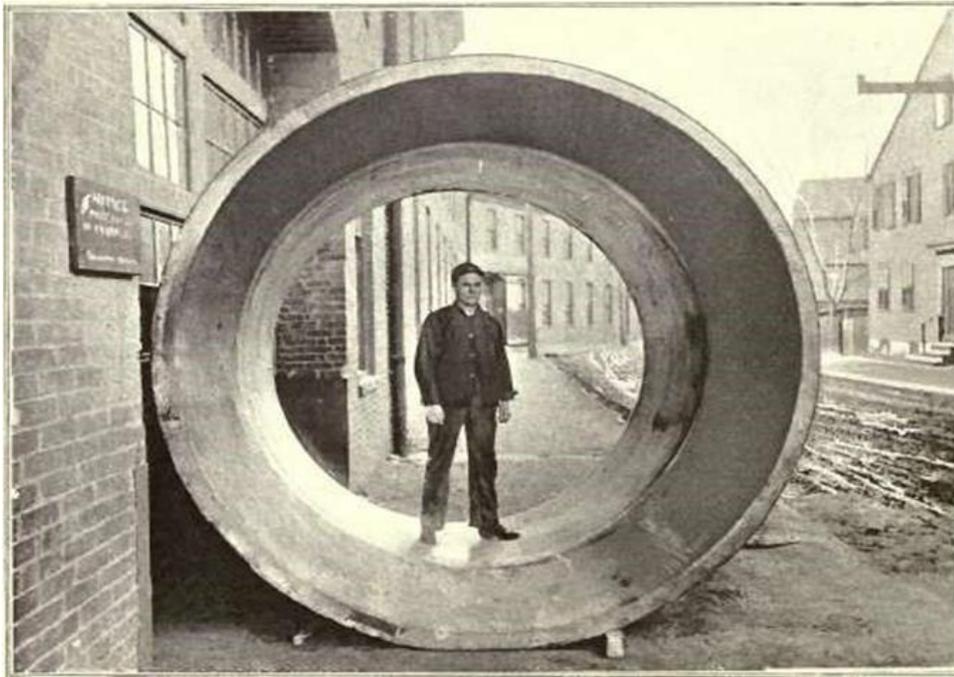
### II.9.1 Historique :

En 1797, Giovanni Battista Venturi, mathématicien et ingénieur d'état, a publié les résultats de travaux expérimentaux montrant que les fluides traversant une section convergente gagnent en vitesse mais perdent en retour une pression statique. À cette occasion, il invente le tube de Venturi, permettant de mesurer la différence de pression entre deux sections de diamètres différents d'un même tube [29].

Cependant, la conception de Venturi ne fut appliquée à un appareil pratique qu'en 1888, lorsque Clemens Herschel, obtient un brevet pour le premier modèle commercial de tube de Venturi. Après avoir mené plusieurs expériences en 1887, il a été nommé « tube de Venturi » par respect pour les expériences de Venturi de 1797. Le but initial est de mesurer la quantité d'eau utilisée par les moulins individuels dans la zone Holyoke. C'était la première application de ce tube.

Herschel (1887, 1895) a travaillé avec Builders Iron Foundry à Providence, dans le Rhode Island, pour concevoir et vendre des tubes de Venturi [29].

Les tubes de Venturi ont été utilisés dans de nombreuses applications d'eau jusqu'à de très grandes tailles (voir les figures II.10).



**Figure II.10:** Tube de Venturi, aqueduc de Catskill, adduction d'eau à New York [29]

### II.9.2 Application de l'effet venturi :

Dans les domaines scientifiques et industriels, les tubes Venturis sont souvent utilisés pour mesurer le débit d'un fluide en écoulement. Pour ce faire, les manomètres sont attachés à différentes sections du tube pour mesurer la pression. L'effet Venturi peut ensuite être utilisé pour calculer le taux à partir de ces différences de pression mesurées. La différence de pression décrite par effet Venturi est utilisée dans de nombreux dispositifs différents. Les tubes de Venturis disposent d'un centre étroit et d'extrémités plus larges et, comme nous le verrons ensuite, ils peuvent être utilisés dans une variété d'applications. [31]

- Sur les ailes d'avion, le profil bombé au-dessus et creusé en-dessous entraîne une accélération de l'air et une dépression sur la surface supérieure de l'aile, et au contraire un ralentissement et une surpression sur la surface inférieure, qui entraînent une force portante vers le haut,
- Dans les ventilateurs sans pales, la projection d'air à grande vitesse sur un profil d'aile (à l'intérieur de l'anneau), entraîne une dépression qui aspire l'air depuis l'arrière du ventilateur et cause l'effet « multiplicateur d'air »,
- De la même manière, le flux d'air des ventilateurs utilisés par les sapeurs-pompiers lors de la ventilation opérationnelle par pression positive entraîne l'air environnant (jusqu'au double du débit nominal du ventilateur) à travers l'entrant,
- Dans les carburateurs des moteurs à combustion interne,

- Pour diminuer la force de portance et améliorer l'appui aérodynamique pour une voiture de Formule 1,
- Sur certains casques haut de gamme, les fabricants utilisent l'effet venturi pour accélérer la circulation de l'air à l'intérieur du casque et son extraction. Cela permet de rafraîchir plus efficacement le pilote et de désembuer la visière,
- Dans certains détendeurs de plongée sous-marine, le flux d'air moyen pression injecté dans le deuxième étage est orienté de telle manière qu'il participe à l'aspiration de la membrane. Cette membrane appuyant sur le levier qui provoque l'injection d'air, l'effet Venturi réduit alors l'effort inspiratoire,
- Sur certaines cheminées, pour améliorer le tirage,
- Pour mélanger des liquides (un liquide mis en dépression aspire l'autre liquide et permet le mélange), par exemple le mélangeur d'émulseur et d'eau des lances à mousse des sapeurs-pompiers,
- Un venturi (convergent + divergent) permet de limiter le débit à un seuil déterminé et ce quelle que soit la pression amont sur une canalisation,
- Pour réaliser des pompes à vide de faible puissance, comme les trompes à eau montées sur les robinets des paillasses de chimie, ou bien les aspirateurs de mucosité branchés sur les détendeurs des bouteilles de dioxygène médical,
- Comme appareil de mesure de débit, basé sur la chute de pression au niveau du venturi,
- Dans les pistolets à peintures, alimentés par le biais d'une turbine basse pression ou d'un compresseur,
- Pour administrer dans les alvéoles pulmonaires des médicaments au travers d'aérosols liquides (principe de l'aérosolthérapie, venturi pneumatique),
- Certains pommeaux de douche à économie d'eau (50 %), mitigeurs sur robinetterie,
- Pour la préadmission d'entrée d'air nécessaire au fonctionnement d'une turbine à gaz dans la propulsion notamment des rames à turbine à gaz,
- Pour la gazéification de liquides (jus de pomme, eau, cidre...),
- Pour l'injection d'ozone gazeux dans de l'eau,
- En sonorisation (chambres de compression),
- Pour vider l'eau à travers une trappe (vide-vite) située dans le fond d'embarcations Légères (dériveurs, bateaux pneumatiques),

- Dans le traitement des rhumes ou rhinopharyngites, l'aspirateur nasal pour dégager les cavités nasales de l'enfant,
- Dans certaines éoliennes de toit horizontales. [31]

### II.9.3 Installation :

L'installation d'un Venturi est essentielle à la précision de la mesure de pression différentielle. Des tourbillons dans l'écoulement qui affectent la précision du compteur peuvent être générés par un joint d'étanchéité en saillie, un désalignement ou une bavure sur une prise de pression.

La venturi doit être installé avec son axe horizontal et le fluide entrant dans le tube avec un profil de vitesse pleinement développé, exempt de tourbillons et de vortex. Dans une installation horizontale, les raccords des orifices de pression ne doivent pas être placés dans la partie inférieure, car ils pourraient être obstrués, ni dans la partie supérieure, dans lesquels des bulles d'air pourraient être emprisonnées. L'emplacement préféré est sur le côté dans le plan horizontal de la ligne médiane. Les deux lignes de pression de même longueur doivent être installées et acheminées de manière à empêcher toute accumulation d'air ou de solides dans la tuyauterie de raccordement au dispositif de mesure de pression différentielle [29].

### II.9.4 Avantages :

Les principaux avantages de tube de Venturi sont les suivants : [29]

- La durée de vie d'un corps de Venturi, à l'exclusion de l'instrumentation, peut être supérieure à 50 ans.
- Simplicité de construction et pas de pièces mobiles.
- Pas de changement de contour soudain, pas de coins coupants.
- Récupération de pression relativement élevée dans le cône de sortie, entraînant une perte de charge faible et des économies d'énergie substantielles pour les débits importants.
- Leur performance est bien comprise,
- Ils peuvent être utilisés pour la plupart des gaz et des liquides,
- Ils ont généralement de bonnes normes et les types les plus courants ne nécessitent généralement pas d'étalonnage.
- Caractérisés par un coefficient de décharge élevé.
- Fortement documenté dans la littérature comme type de débitmètre acceptable.

### II.9.5 Inconvénients :

Leurs principaux inconvénients sont : [29]

- Les unités plus grandes sont coûteuses à l'achat et à l'installation.
- Le plus grand et le plus lourd des débitmètres à pression différentielle.
- La pression différentielle n'est pas linéaire avec le débit et nécessite une extraction de la racine carrée, ce qui réduit la capacité de stockage.
- Une perte de pression importante peut se produire.
- Le coefficient et la précision peuvent être affectés par la configuration de la canalisation ou par la nature de l'écoulement, et peuvent également subir des effets de vieillissement, tels que l'accumulation de dépôts ou l'érosion des arêtes vives.
- Possibilité de colmatage des lignes statiques avec des fluides encrassés ou de gel des lignes statiques en cas d'exposition à des températures ambiantes froides

### II.10 Diaphragme :

Le diaphragme est le l'organe déprimogène débitométrique le plus répandu. Il consiste en une plaque de métal mince dont le centre est percé. Sur un côté, une languette donne les caractéristiques du diaphragme. Le côté amont du diaphragme est habituellement en biseau. [32]

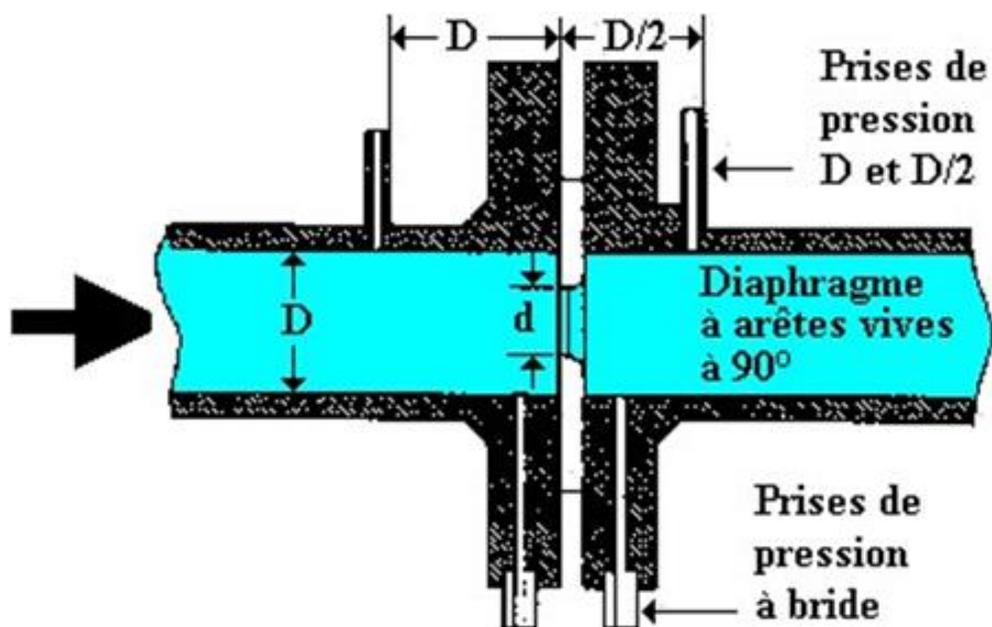
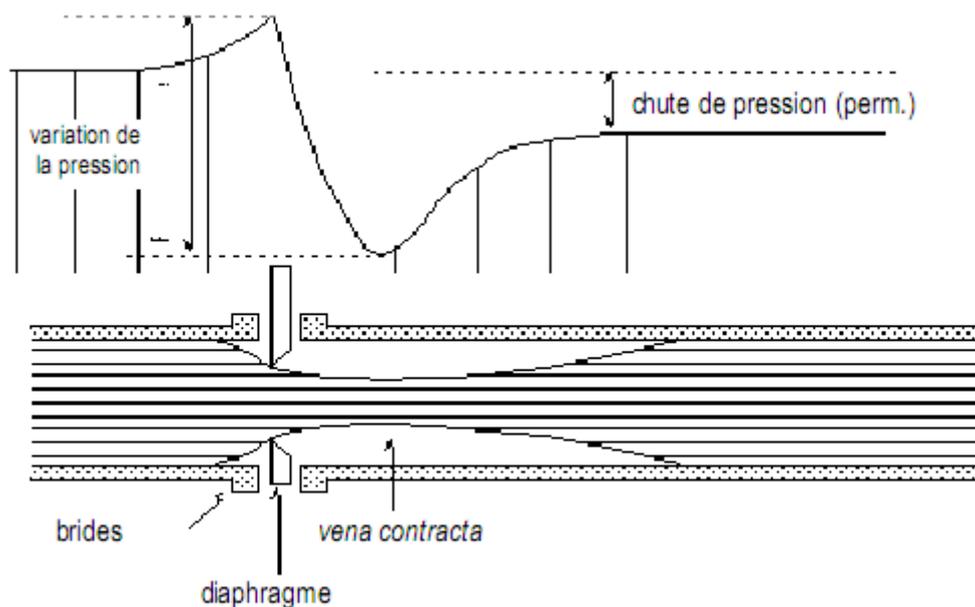


Figure 11.11 : Schéma d'un diaphragme [33]

Quand on installe un diaphragme dans une conduite (en général entre deux brides), l'augmentation du débit dans l'étranglement génère une pression différentielle de part et d'autre du diaphragme. Cette pression différentielle varie en fonction du débit.

La présence d'un diaphragme dans la tuyauterie cause une augmentation légère de la pression statique du liquide en amont de l'étranglement (par contre pression), puis, au passage de l'ouverture, une diminution brusque de la pression qui atteint son minimum à un point appelé « section contractée » ou vena contracta où le débit est maximum. À partir de ce point, la valeur de la pression statique commence à remonter et le débit ralentit. Toutefois, à cause du diaphragme, la pression statique en aval est toujours inférieure à celle en amont. En outre, une partie de l'énergie associée à la pression est transformée en ondes sonores et en chaleur, à cause de la friction et de la turbulence causées par le diaphragme. On peut voir en (figure II.12), l'évolution de la pression d'un liquide traversant un diaphragme. [32]



**Figure II.12:** Evolution de la pression d'un fluide traversant un diaphragme

Le lecteur remarquera à partir de la (figure II.12) que la mesure de la pression différentielle due au diaphragme dépend de la position des points de mesure de la pression ou prises de pression. [32]

### II.10.1 Prises de pression à la bride :

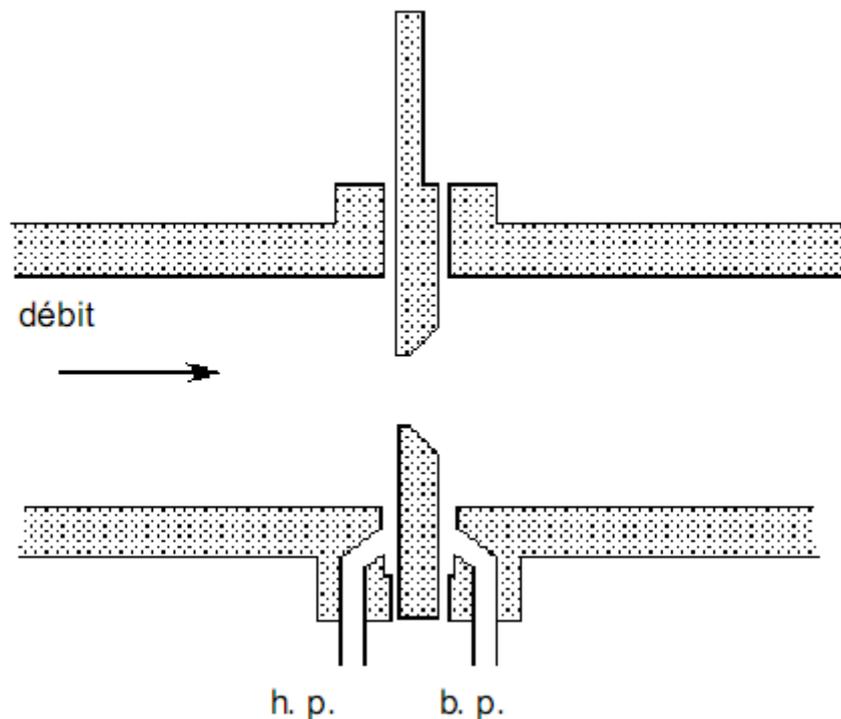
Le type de conduite de détection le plus fréquemment utilisé pour la mesure du débit est la prise de pression à la bride. Elle est constituée de trous percés dans la bride, à un pouce en amont et un pouce en aval du diaphragme. Les branches en amont et en aval du diaphragme sont reliées aux côtés haute

pression et basse pression d'un transmetteur de pression différentielle. Un transmetteur de pression installé pour mesurer le débit s'appelle un transmetteur de débit. Tout comme dans le cas de la mesure de la hauteur d'un liquide, la pression statique dans les conduites peut être plusieurs fois supérieure à la différence de pression créée par le diaphragme.

Pour permettre l'utilisation d'une capsule sensible à une faible pression différentielle, on doit installer une claviature à trois vannes pour la protéger des surpressions. On discutera plus longuement de cette claviature dans la section sur la mesure de la hauteur des liquides. [32]

### II.10.2 Prises de pression dans les angles :

Les prises de pressions dans les angles sont placées directement sur les faces amont et aval d'un diaphragme. [32]



**Figure II.13:** Diaphragme avec prise de pression dans les angles

h p : haute pression

b p : basse pression

### II.10.3 Prises sur le tuyau :

Les prises sur le tuyau sont placées, en aval, à deux diamètres et demi, et en amont à huit diamètres internes.

L'utilisation avec un diaphragme de prises espacées par les distances normalisées, nous évite l'étalonnage local du débitmètre. En effet, une fois fixés le rapport et le type de prise de pression, on peut utiliser des nomogrammes et des tableaux empiriques pour faciliter l'étalonnage. [32]

### II.10.4 Avantages et désavantages des diaphragmes :

Les diaphragmes présentent des avantages certains :

- Ils produisent une pression différentielle élevée.
- On dispose de données exhaustives sur leur utilisation.
- Leur coût d'achat et d'installation est peu élevé.
- Il est facile de les remplacer.

Mais ils souffrent de certains désavantages :

- La baisse élevée et permanente de pression augmente les frais de pompage.
- On ne peut les utiliser pour des liquides sales, des mélanges semi-liquides ou les vapeurs humides puisque l'érosion affectera la pression différentielle produite par l'orifice. [32]

### II.11 Tube de Pitot :

Le tube de Pitot est utilisé dans plusieurs applications industrielles pour indiquer la vitesse d'écoulement d'un fluide en mesurant la différence entre la pression dynamique et la pression statique.

Le capteur de Pitot est composé de deux tubes coaxiaux ; le tube interne mesure la pression totale tandis que le tube extérieur mesure la pression statique. Bien que diverses formes de têtes existent, le choix du design est généralement basé sur le rapport « performance de mesures / coût de production ». Le modèle actuel de tube de Pitot résulte d'une évolution continue du modèle basique développé par [Henri Pitot, 1732]. Cette évolution a été réalisée à travers des travaux théoriques et expérimentaux visant à optimiser les performances de l'instrument et l'extension de son utilité. [34]

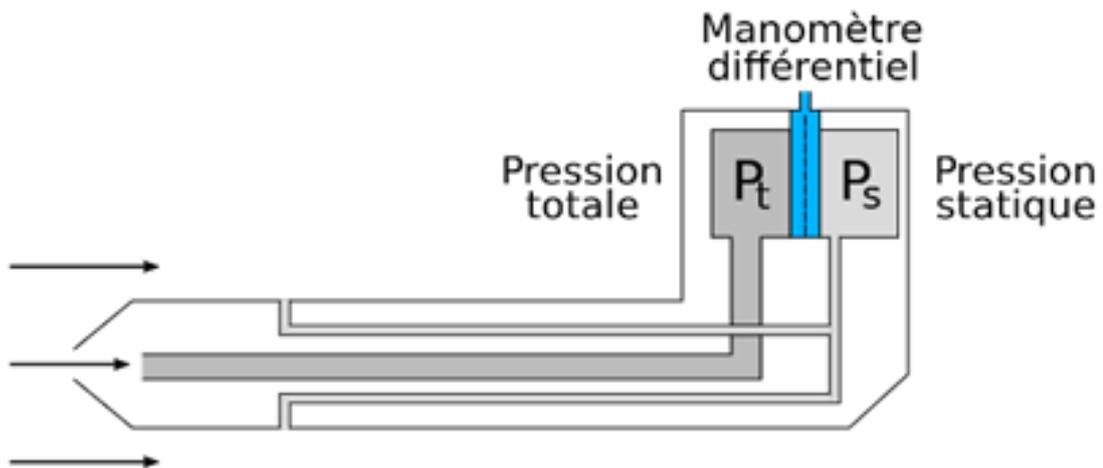


Figure II.14: tube de Pitot [35]

### II.11.1 Evolution du tube de Pitot :

La première description d'un instrument de mesure du gradient de la pression dans un écoulement a été introduite par [Henri Pitot, 1732], les tubes de Pitot lui doivent leurs noms. En effet, il a proposé un tube pour résoudre un problème pratique. Il s'agissait de déterminer si la vitesse de l'eau dans une rivière était plus importante au fond que celle à la surface. [Darcy et al, 1857] proposèrent des améliorations au fonctionnement du tube de Pitot en optimisant les performances de ses propriétés mécaniques. [Airey et al, 1913] et [Guy et al, 1913] élaborèrent un état de l'art de l'histoire des tubes qui existaient déjà en 1910. Entre 1900 et 1915, plusieurs travaux ont été réalisés pour établir l'équation de base permettant de décrire le fonctionnement des tubes. Ainsi, les travaux de [Gregory et al, 1904] peuvent être cités dans ce contexte.

Dans les années 1920, les travaux se sont concentrés sur l'étude des différentes formes de tube et de leurs limites d'utilisation. Le développement intense du secteur aéronautique a constitué un milieu fructueux pour l'application de ce genre d'instrument. Le développement du domaine des mécaniques du fluide a conduit également à des études plus approfondies sur le mécanisme interne des systèmes de mesure des caractéristiques d'un fluide.

Dans les années 1930, les chercheurs ont manifesté un intérêt particulier pour l'étude du mécanisme de fonctionnement des tubes dans différents écoulements. Les travaux de [Allen et al, 1932] et [Hubbard et al, 1939] peuvent être cités comme références dans ce domaine.

À partir des années 1940, l'utilisation de ces tubes s'est étendue à l'étude des fluides compressibles, incompressibles dans des environnements subsoniques ou supersoniques. Cette extension a permis d'étendre les fonctionnalités du tube de Pitot avec de nouvelles mesures telles que l'étude de la pression dans des fluides multi-phases et plusieurs autres problèmes scientifiques. Ces nouvelles

utilisations ont montré le besoin d'une compréhension plus précise du mécanisme des tubes et des fluides alentour.

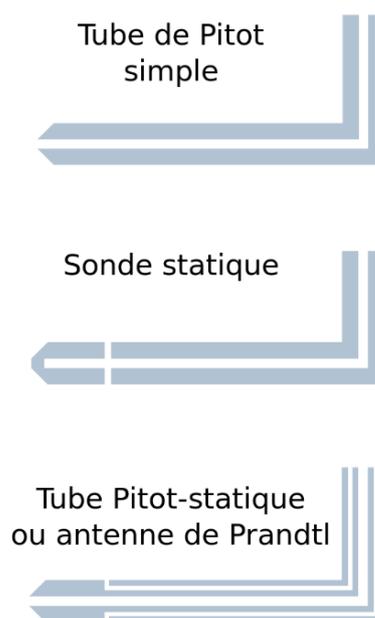
La sonde de Pitot ou tout autre instrument de mesure de la vitesse est constitué de trois parties : la tête de la sonde, l'indicateur de la mesure et les lignes de connexion de la pression entre la tête et l'indicateur de la mesure.

Concernant la tête de la sonde, différentes formes géométriques ont été proposées pour l'amélioration de ces tubes de Pitot. Ces différentes formes ont été étudiées intensivement pour dégager les formes optimales en se basant sur plusieurs critères d'optimisation, tels que le coût de fabrication, la complexité de la forme, la précision de la mesure, etc.

Plusieurs types d'écoulement peuvent être rapprochés d'écoulements unidimensionnels. Généralement, la direction de l'écoulement est connue ; les tubes de Pitot ont donc pour unique rôle de déterminer la valeur de la vitesse. Ces tubes de Pitot sont généralement classés en deux groupes :

- Tube de Pitot : tube cylindrique avec une extrémité ouverte en amont pour mesurer la pression totale.
- Tube de Pitot statique ou tube de Prandtl : tube coaxial qui combine un tube de Pitot et une sonde de mesure de la pression statique. La différence entre les deux pressions, statique et totale, désigne la pression dynamique.

L'équation de Bernoulli est souvent appliquée pour calculer la vitesse locale moyenne qui correspond à l'hypothèse de l'uni-dimension de l'écoulement dans lequel la sonde est plongée. La vitesse est déduite à partir de la mesure du gradient de la pression. [34]



**Figure II.15:** Différentes sondes de mesure de pression

## II.11.2 Principaux types de tubes de Pitot et leurs applications :

### II.11.2.1 Tube de Kiel :

La détermination de la pression totale nécessite l'utilisation d'instruments insensibles à l'inclinaison de l'angle d'incidence, même si la correction des mesures erronées, dues aux déviations de l'angle, est désormais possible. Par contre, l'opération d'étalonnage est coûteuse et souvent peu concluante, en raison des caractéristiques propres à chaque fluide dans lequel l'instrument est émergé. Ainsi, en 1935, Kiel introduit la notion de tube blindé pour répondre aux besoins d'insensibilité de la mesure aux déviations de l'angle d'incidence. [34]

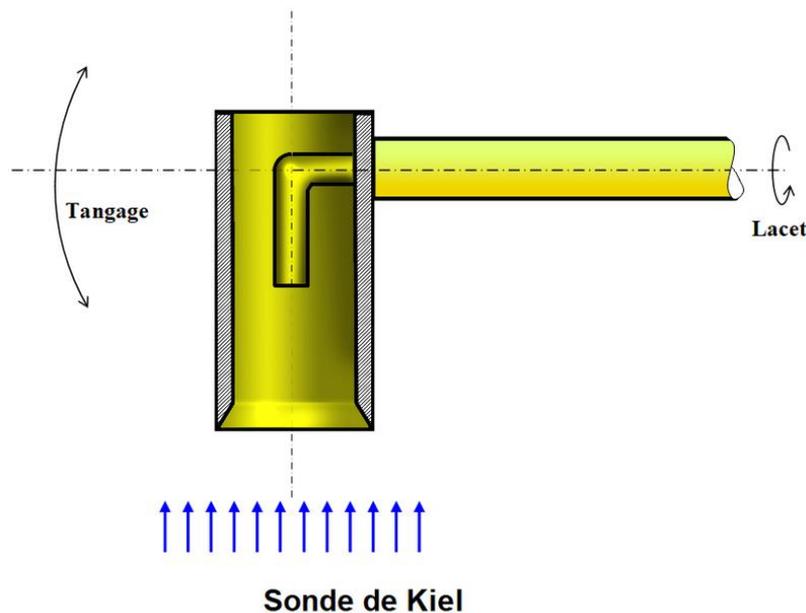


Figure II.16 : Sonde de pression totale Kiel. [36]

### II.11.2.2 Sonde avec une forme sphérique :

La détermination de la valeur de la vitesse et la direction à un point précis d'un écoulement sont souvent réalisées avec une sonde renvoyant 5 mesures de la pression totale. À ce titre, la forme sphérique est la forme la plus adéquate pour ce genre d'écoulement, en raison de la présence d'un orifice central et de quatre autres orifices répartis uniformément autour de la sphère et équidistants de l'orifice central. À travers des opérations d'étalonnage et des valeurs obtenues sur les cinq orifices, la vitesse d'un écoulement tridimensionnel peut être déterminée. Les performances de ce type de sondes peuvent être déterminées en réalisant des études expérimentales sur les distributions de pression quand la sonde est émergée dans un écoulement uniforme. [34]

### II.11.2.3 Sonde avec une forme spéciale :

Pour répondre à des besoins particuliers, les tubes standards sont parfois légèrement modifiés. Ainsi, plusieurs industries ont participé à l'évolution des tubes de Pitot pour des applications bien spécifiques, telles que dans les compresseurs, les turbines, etc.

Le choix de la sonde adéquate pour une application industrielle particulière dépend de plusieurs facteurs. Parmi ces facteurs, on trouve l'ordre de grandeur de la valeur à mesurer, l'intervalle d'incertitude exigé, la linéarité de la mesure et d'autres facteurs environnementaux, comme, par exemple, la température.

Dans le domaine aéronautique, les tubes de Pitot sont largement utilisés en raison de leur robustesse et de leur simplicité de conception par rapport à d'autres capteurs de pression. Cependant, le tube de Pitot se caractérise par une grande sensibilité aux conditions de givre et aux mauvaises conditions environnementales inhérentes à son principe de mesure. Cette sensibilité impacte directement les performances et la qualité de la mesure de la sonde. Ainsi, plusieurs accidents aériens résultent d'une mauvaise qualité des mesures de la vitesse, renvoyées par les sondes de Pitot.

Dans le présent document, nous nous focaliserons sur les sondes de Pitot. Ces sondes, très utilisées dans le domaine aéronautique pour mesurer la vitesse de l'avion pendant le vol, sont soumises à des processus de détérioration qui affectent la précision de leurs mesures, pouvant ainsi mener à des situations catastrophiques. [34]

### II.11.3 Applications de tube de Pitot :

#### II.11.3.1 Marine :

Le tube de Pitot est un des systèmes de loch utilisé sur les navires. Il est souvent placé sous la quille et est calibré lors d'un essai de vitesse. La mesure de la vitesse d'un bateau utilisant une mesure de pression peut remonter aux expériences de Charles Grant, vicomte de Vaux (1807), plus tard amélioré par le révérend Edward Lyon Berthon (1849), qui combine dans un seul système la mesure statique et dynamique.

#### II.11.3.2 Aéronautique :

En aéronautique, le système Pitot-statique (antenne de Prandtl, mesurant la différence de pression entre la prise statique et la prise dynamique) est utilisé pour les appareils dont la vitesse est très inférieure à la vitesse du son à leur altitude. Pour les appareils se déplaçant à un nombre de Mach s'approchant de 1, les deux prises de pression sont séparées (tube de Pitot d'une part et prise statique d'autre part).

Les tubes de Pitot sont situés soit sur le nez de l'appareil (en particulier pour les avions de chasse), soit sous les ailes.

### **II.11.3.3 Designs particuliers :**

Dans le cas des avions de chasse, les vitesses élevées et les angles auxquels l'avion peut se déplacer font que des formes spéciales de tubes ont été développées, soit présentant plusieurs ouvertures, soit présentant un tube élargi et un tube plus fin au centre, ce dernier seulement servant à la mesure de la pression dynamique.

Par principe, les systèmes à tubes de Pitot ne fournissent de mesure que s'ils sont placés en face de l'écoulement. Pour les cas où la vitesse perpendiculaire au plan de l'appareil doit être mesurée, des sondes anémométriques peuvent être utilisées ; certains modèles sont basés sur un tube de Pitot, présentant plusieurs ouvertures (5 ou 7). La comparaison des pressions provenant de chaque tube permet de déterminer l'angle et la vitesse de l'écoulement.

### **II.11.3.4 Automobile :**

Le tube de Pitot est utilisé dans l'automobile, dans les cas où la vitesse ne peut pas être déduite uniquement de la vitesse de rotation des pneus.

### **II.11.4 Autres applications :**

Le tube de Pitot peut être utilisé comme anémomètre, pour application à la météorologie. En effet, sa mesure est en réalité celle du vent relatif. Si le dispositif est fixe, il mesure alors la vitesse du vent. Le tube de Pitot présente en outre l'avantage d'être un système très robuste, comportant peu de pièces mécaniques en mouvement susceptibles d'être endommagées. [37]

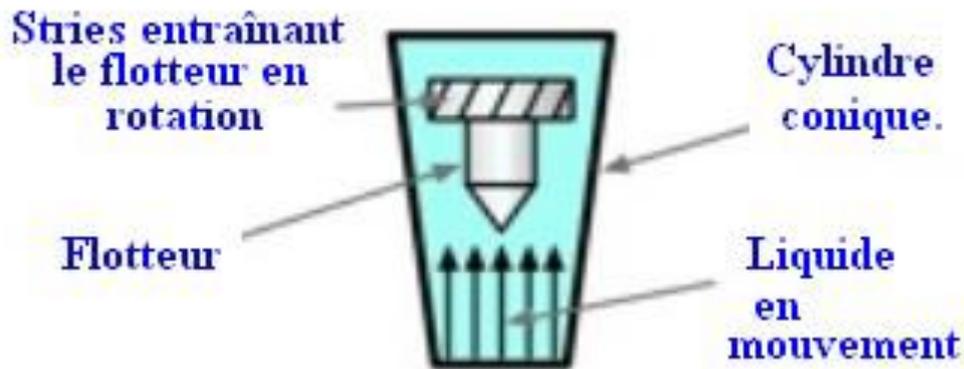
### **II.12 Rotamètre :**

Parmi toute une gamme d'appareils de mesure des débits d'un fluide ou d'un gaz figure le rotamètre, ou débitmètre à flotteur.

Ce débitmètre permet une mesure simple visuelle d'un débit gazeux, liquide ou vapeur. Constitué d'un tube conique et d'un flotteur, le débitmètre à section variable est monté verticalement sur la tuyauterie et ne requière pas d'électricité. [38]

**II.12.1 Présentation :**

Les débitmètres à section variable (rotamètres) sont habituellement constitués d'un tube en verre conique, disposé verticalement dans l'écoulement de fluide ; un flotteur de même diamètre que la base du tube en verre s'élève en fonction de l'ampleur du débit, le diamètre du tube en verre étant plus important en haut qu'en bas ; le flotteur reste en suspension au point où la différence de pression entre les surfaces supérieure et inférieure en équilibre le poids. Dans la plupart des utilisations des rotamètres, le débit est affiché directement sur une échelle graduée, sur le verre. [38]



**Figure II.17 :** Schéma d'un rotamètre.

Dans certains cas, un système automatique mesure le niveau du flotteur et transmet un signal de débit. Ces rotamètres transmetteurs sont souvent réalisés en acier inoxydable ou autres matériaux permettant de les utiliser avec différents fluides et à des pressions plus élevées.

**II.12.2 Caractéristiques métrologiques :**

- Mesure des débits de liquides et de gaz.
- Etendue de mesure de 0.3 à 300 000 litres/heure (gaz).
- Etendue de mesure de 0.1 à 25000 litres/heure (liquide).
- Sensible aux variations de masse. [38]

**II.12.3 Avantages et Inconvénients :****II.12.3.1 Avantages :**

- Peu d'entretien
- Intéressant pour les faibles débits
- Maintenance facile
- Coût faible
- Convient pour les gaz, les liquides, la vapeur

**II.12.3.2 Inconvénients :**

- Perte de charge résiduelle importante
- Veiller à la verticalité de l'appareil car le fluide se déplace de bas en haut
- La valeur de la graduation dépend de la masse volumique du fluide pour lequel le rotamètre est conçu ou étalonné.
- Dépendance vis-à-vis de la nature du fluide
- Dépendance à la pression et à la température pour les gaz
- Fragile
- En fonction des modèles, nécessité de fluides transparents. [39]



***Chapitre III : Étude  
expérimentale-résultats  
et discussions***

Dans ce chapitre nous avons étudié expérimentalement la mesure de débit, en utilisant des méthodes indirectes toutes basées sur l'application du théorème de Bernoulli, à l'exception, du débitmètre « rotamètre ». Les méthodes utilisées sont : le tube de Venturi, le diaphragme, le rotamètre, le tube de Pitot fixe, et le tube de Pitot mobile.

Les résultats trouvés par ces méthodes ont été comparés avec ceux déterminés par la méthode directe, qui représente la plus simple et la plus juste, elle est donnée par le rapport *volume/temps*.

### III.1 Description de l'installation expérimentale :

Les connaissances sur l'écoulement dans des systèmes de tuyauterie trouvent des applications dans de nombreux domaines. Lorsque de l'eau s'écoule au travers d'un système de tuyauterie, des pertes de charge se produisent suite au frottement interne et au frottement du tuyau. Les pertes de charge dans le fluide est dépendent de manière directe des résistances installées et de la vitesse d'écoulement.

Le banc d'essai HM<sup>1</sup> 112<sup>2</sup> permet de réaliser une grande diversité d'expériences sur la mesure du débit et de la pression ainsi que sur la détermination des pertes de charge et des évolutions de la pression sur différents éléments de tuyauterie. L'évaluation des valeurs de mesure se fait à l'aide du logiciel GUNT, qui permet d'enregistrer facilement les caractéristiques de l'écoulement et de les évaluer directement sur le PC.

Le banc d'essai, de dimension  $L \times l \times h = 2220 \times 280 \times 1980$ mm et de poids de 250 kg, comprend six sections de tuyaux différents disposées horizontalement. Ceci, permet d'étudier l'influence sur la perte de charge du matériau, du diamètre ainsi que de la section et des changements de direction du tuyau. Une seconde section de tuyau permet d'y installer des objets de mesure comme : les soupapes, le collecteur d'impuretés, le tube de Venturi, le tube de Pitot, l'orifice de mesure ou tuyère de mesure. Les objets de mesure sont transparents de manière à pouvoir visualiser les différentes fonctions. Un jeu d'objets de mesure supplémentaire (HM 110.01)<sup>3</sup> est disponible, ce qui permet de faire beaucoup d'expériences.

Le banc d'essai fonctionne indépendamment du réseau d'alimentation en eau et est équipé d'une pompe et d'un réservoir d'eau. Un rotamètre se trouvant sur le banc d'essai permet de déterminer le débit. Des points de mesure de la pression se trouvent juste avant et après les objets de mesure, qui ont la forme de Chambres annulaires. Cela permet d'assurer la mesure précise de la pression. Cinq appareils de mesure de la pression avec affichages analogiques ou numériques sont prévus pour

---

<sup>1</sup> HM : HAMBURG

<sup>2</sup> 112 : Numéro de banc d'essai

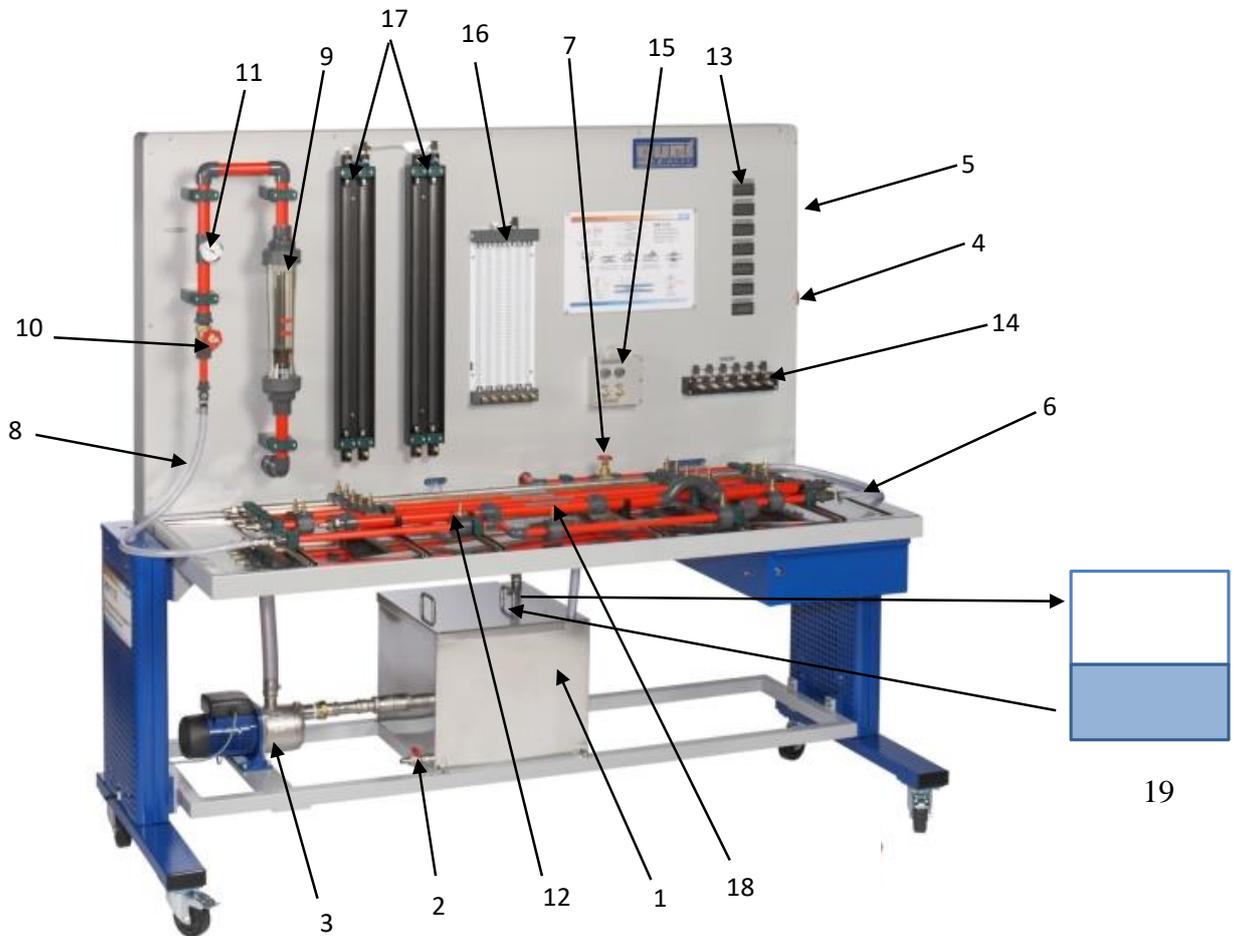
<sup>3</sup> HM 110.01 : Jeu d'objets de mesure, laiton

mesurer la Pression. Selon le procédé de mesure, les valeurs de mesure peuvent être lues soit de manière analogique sur le Manomètre, soit sur des affichages numériques. Les valeurs de mesure sont transmises vers un PC afin d'y être évaluées à l'aide d'un logiciel qui permet de donner la valeur de la pression et du débit accompagnée des graphes de leur variation. La transmission des données au PC se fait par une interface USB.

Le banc d'essai est une boucle fermée, qui comporte :

- Un réservoir d'eau (1) de capacité 55 litres, muni d'un robinet de vidange (2),
- Une pompe (3), liée au réservoir (1), qui permet de mettre l'eau en écoulement dans le circuit, nécessitant une puissance absorbée de 0,3 kW, refoulement un débit maximal  $Q_v = 4,5 \text{ m}^3 / \text{heure}$  avec une hauteur de refoulement (ou hauteur manométrique ou hauteur utile) maximale  $H_{\text{man,max}} = 28,5 \text{ m}$ ,
- Un interrupteur principal (4) permettant l'alimentation en électricité le banc d'essai (230V, 50Hz, 1 phase),
- Un interrupteur de mise en marche de la pompe (5),
- Un tuyau flexible (6) auquel est liée vanne (7) permettant le retour de l'eau vers le réservoir,
- Un tuyau flexible d'alimentation ou de refoulement (8) provenant de la pompe vers le débitmètre à corps flottant « rotamètre » (9) gradué en mètre cubes par heure. La variation du débit d'écoulement se fait à l'aide de la vanne (10),
- Un thermomètre (11) mesurant la température de l'eau en écoulement, ce qui permet de déterminer la viscosité cinématique ou dynamique de l'eau et donc la valeur du nombre de Reynolds. La température de l'eau maximale que peut supporter le banc d'essai est de 60°C.
- Divers tronçons de mesure (12),
- Des afficheurs numériques pour la pression (13) lié aux capteurs de pression électronique (14),
- Un capteur de pression différentielle (15),
- Un manomètre (16) à 6 tubes piézométriques,
- Deux manomètres (17), comportant chacun deux tubes piézométriques,
- Un tronçon de mesure interchangeable (18) : débitmètre : à corps flottant « rotamètre », tube de Venturi, diaphragme, tube de Pitot fixe et tube de Pitot mobile. Ce dernier a été ajouté au banc d'essai, il fait partie d'un autre banc d'essai de mécanique de fluides,

- Un réservoir de mesure de volume (19) est adjoint au banc d'essai. Rappelons que ce réservoir ne fait pas partie du banc d'essai.



**Figure III.1 :** HM 112 Installation expérimentale de mesure de débit

- |   |   |
|---|---|
| 1) Réservoir d'eau                          | 11) Thermomètre   |
| 2) Robinet de vidange                       | 12) Divers tronçons de mesure                           |
| 3) Pompe                                    | 13) Afficheurs numériques pour la pression              |
| 4) Interrupteur principal                   | 14) Capteur de pression électronique                    |
| 5) Interrupteur de pompe (masqué)           | 15) Capteur de pression différentielle                  |
| 6) Tuyau flexible de retour                 | 16) Manomètre à 6 tubes                                 |
| 7) Vanne de retour                          | 17) Manomètre à 2 tubes                                 |
| 8) Tuyau flexible d'alimentation            | 18) Objets de mesure interchangeables                   |
| 9) Débitmètre à corps flottant ou rotamètre | 19) réservoir de mesure de débit par la méthode directe |
| 10) la vanne                                |   |

### III.1.1 Différentes mesures possibles du banc d'essai :

En plus des différentes méthodes de mesure de débit utilisées dans ce banc d'essai, on peut aussi l'utiliser (banc d'essai) pour mesurer :

- Les pertes de charge linéaires dans des tuyaux rectilignes, de longueur 1000mm et différents matériaux : ½, acier galvanisé, en cuivre 18×1 mm, en PVC 20×1,5 mm
- Les pertes de charges singulières dans les coudes à 90° : de diamètre 20 mm et d'épaisseur 1,5 mm (20x1,5mm), les changements de section (élargissement 20x1,5....32x1,8mm, rétrécissement 20x1,5.....16x1,2mm), les robinets, vannes etc.
- Le coefficient de la perte de charge linéaire coefficient de frottement traînée, etc.

### Plages de mesure :

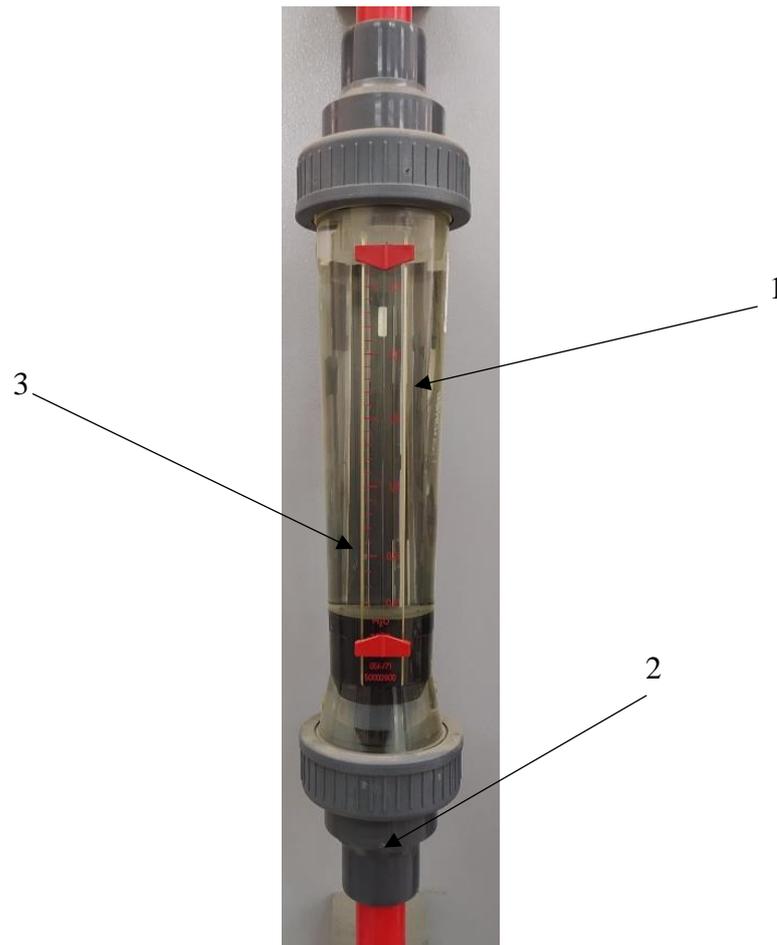
- Pression différentielle : 0 .....200mbar
- Pression :  
0.....390mmCA  
0..600mmCA
- Débit : 0, 2...2,5 m<sup>3</sup> / h
- Température :0.....60 °C

### III.2 Résultats expérimentaux et interprétation :

La variation du débit se fait à l'aide de la vanne (10) pour les différentes méthodes de mesure de débit. Pour fixer le débit volumique nous avons jugé utile de prendre comme référence les graduations du débitmètre « rotamètre » qui va jusqu'à un débit de 2,5 m<sup>3</sup>/heure.

Pour la mesure du débit utilisant la méthode directe, nous avons utilisé un réservoir de mesure (19) de volume 64 litres et un chronomètre pour mesurer le temps de remplissage partiel ou total. Ce bac est lié directement au banc d'essai à partir de la conduite de retour vers le réservoir (1).

## III.2.1 Débitmètre « le rotamètre » : [40]



**Figure III.2** : Rotamètre : 1) tube transparent, 2) flotteur, 3) graduation

**Bilan des forces :**

Le fluide circule du bas (faible section) vers le haut (forte section) du rotamètre. Le ludion ou flotteur est soumis à trois forces :

- son poids  $\vec{P}$  (vers le bas)
- la poussée d'Archimède  $\vec{\pi}_A$  (vers le haut)
- la traînée  $\vec{F}$  (vers le haut)

Le bilan, en régime permanent (c-à-d flotteur à l'équilibre) s'exprime par :

$$\vec{P} + \vec{\pi}_A + \vec{F} = \vec{0} \quad (\text{III.1})$$

En notant «  $\rho_L$  » la masse volumique du ludion, «  $v_L$  » le volume du ludion, et «  $\rho$  » la masse volumique du fluide ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ) :

$$P = \pi_A + F$$

Ou :

$$\rho_L v_L g = \rho v_L g + F \quad (III.2)$$

à ce stade, nous devons donner l'expression de la traînée, qui résulte des différentes forces de frottement s'exerçant sur le ludion (sans démonstration ...) :

$$F = C_x \rho \frac{V^2}{2} S_L \quad (III.3)$$

avec :

$C_x$  : coefficient de traînée qui est quasiment constant pour  $100 \leq R_e \leq 200000$

$S_L$  : section de ludion équivalente (section du ludion projetée sur un plan  $\perp$  à  $V$ )

$$V = \sqrt{2 \frac{v_L g (\rho_L - \rho)}{C_x \rho S_L}} \quad (III.4)$$

Dans cette expression, tous les termes sont constants,  $V = cste$  autour du ludion

« Le profil des vitesses au voisinage du ludion étant constant, le ludion va se positionner en conséquence, à condition que la section du tube soit variable »

Précisons :

Appelons «  $D_L$  » le plus grand diamètre du ludion, et «  $D(h)$  » le diamètre du tube à la hauteur «  $h$  ».

Alors, la section par laquelle circule le fluide, appelée section de passage «  $S_p$  » s'obtient par :

$$S_p = \frac{\pi}{4} (D^2(h) - D_L^2) \quad (III.5)$$

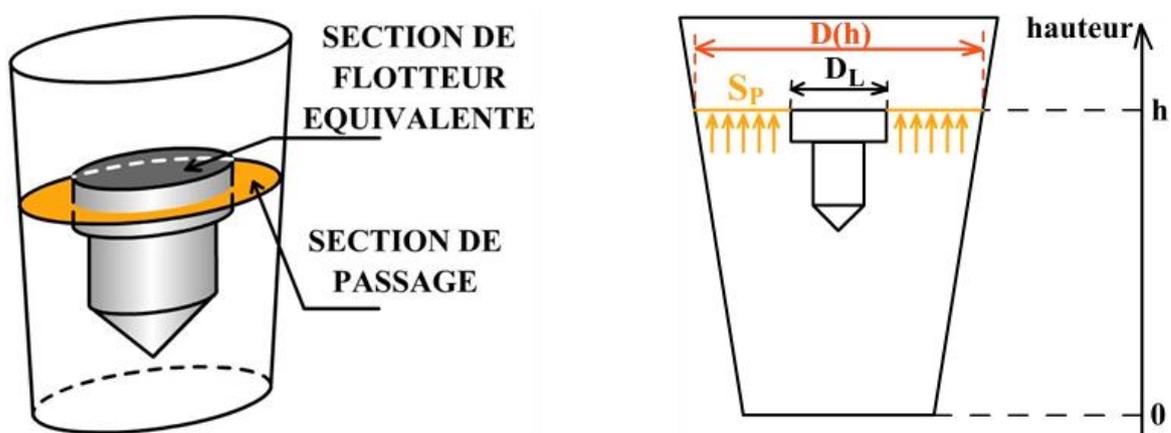


Figure III.3 : Schéma du débitmètre « rotamètre »

Cette section de passage dépend bien évidemment de la hauteur « h » du ludion.

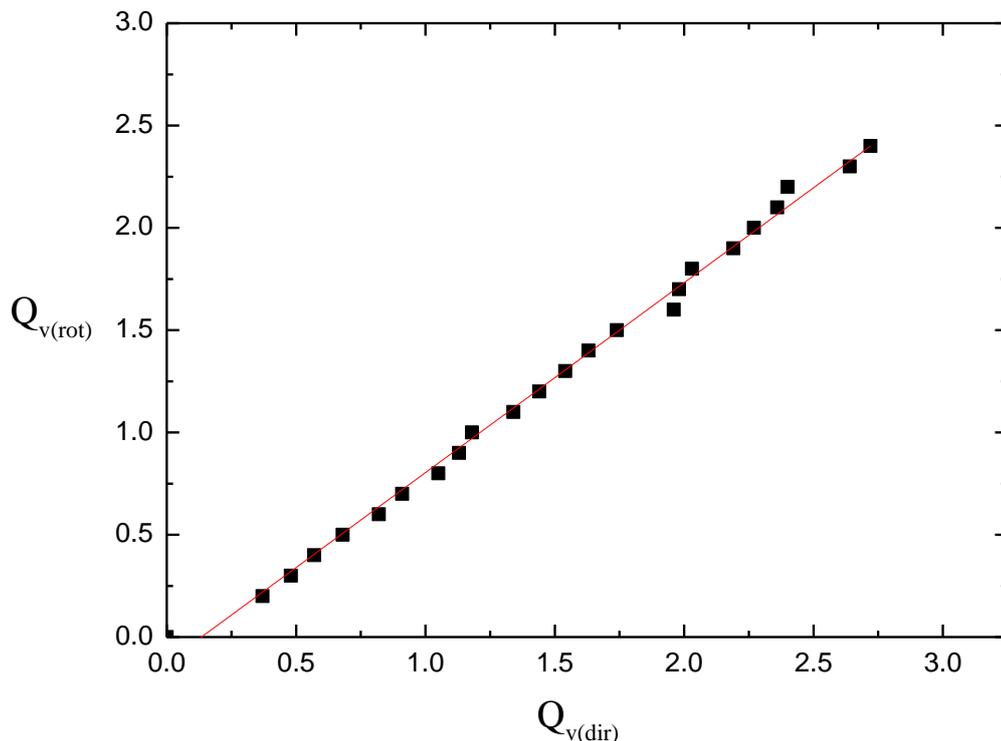
Pour finir :

$$Q_v = S_p V = \frac{\pi}{4} (D^2(h) - D_L^2) \sqrt{2 \frac{V_L g}{C_x \rho S_L} (\rho_L - \rho)} \quad (\text{III.6})$$

La figure III.4 montre la variation du débit mesuré par le rotamètre et celui déterminé la méthode directe.

On remarque, que cette variation qui est linéaire passe par l'origine et a pour pente  $a = 0,928$  et pour ordonnée à l'origine  $b = -0,124$ . Ce résultat montre que le rotamètre ne peut mesurer les faibles débits à l'inverse de la méthode directe qui est simple (Volume/temps).

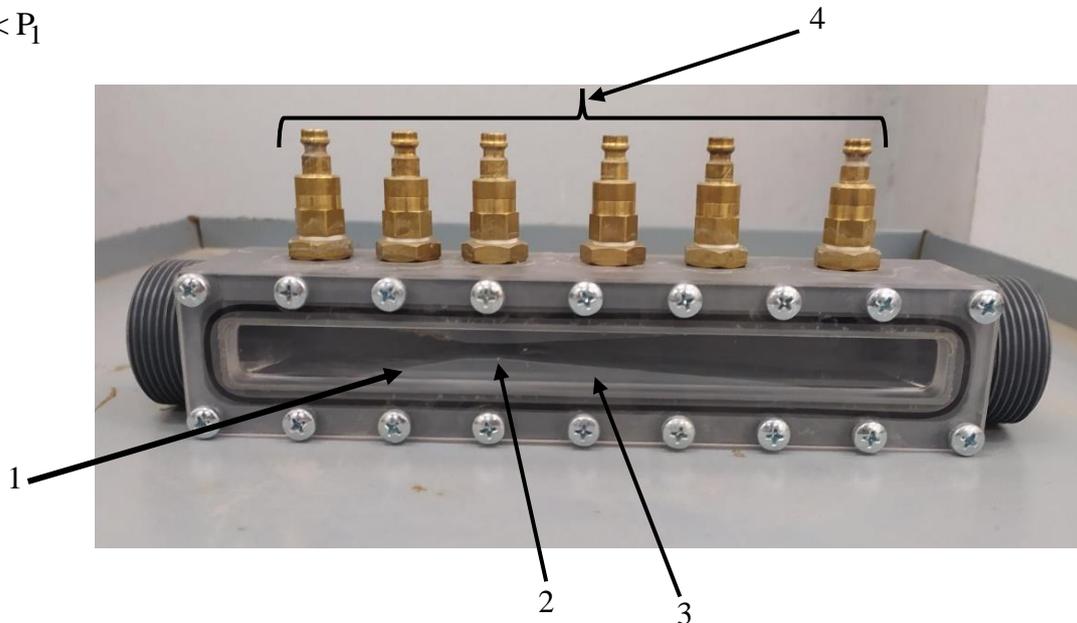
Ceci, s'explique par le fait que : Pour les faibles débits, les forces exercées par l'eau sur le flotteur sont inférieures à son poids, et ne peuvent donc le soulever. Il garde donc la même position de mesure exacte, ce qui ne correspond pas à la valeur déterminée directement par la méthode directe.



**Figure III.4 :** Variation du débit volumique mesuré à l'aide du rotamètre  $Q_{v(\text{rot})}$  en fonction de celui déterminé par la méthode directe  $Q_{v(\text{dir})}$ .

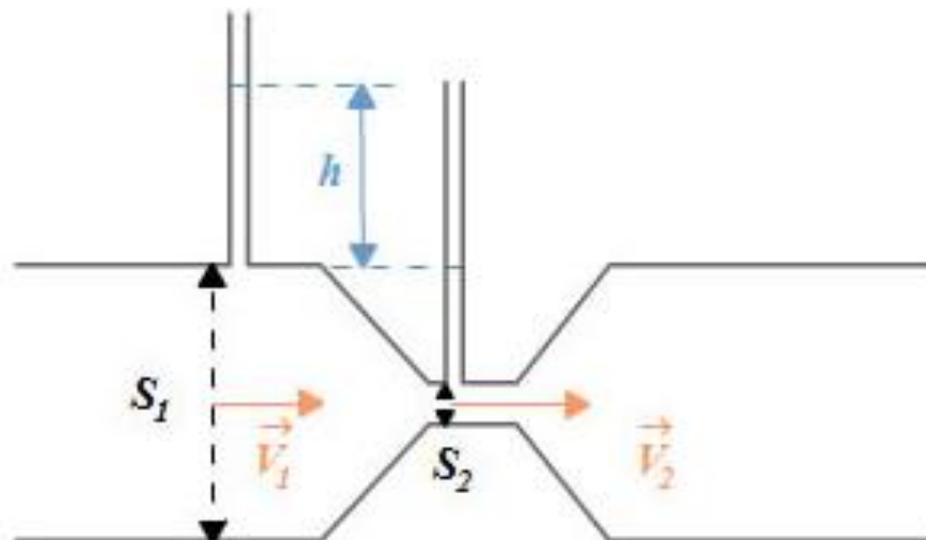
### III.2.2 Débitmètre « tube de Venturi » : [41]

Une venturi est un étranglement de conduit, limité par les sections  $S_1$  et  $S_2$  où les pressions sont respectivement  $P_1$  et  $P_2$ . Un tel appareil permet de mesurer le débit volumique d'un fluide. La vitesse du fluide circulant dans la conduite augmente dans l'étranglement et sa pression diminue  $V_2 > V_1$  ;  $P_2 < P_1$



**Figure III.5 :** Tube de venturi : 1) tube de Venturi, 2) col, 3) divergent, 4) prises de pression

En appliquant le théorème de Bernoulli sur une ligne de courant entre les deux points (1) et (2), on obtient :



**Figure III.6 :** Représentation schématique de tube de venturi

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (\text{III.7})$$

Ici  $z_1 = z_2$  (écoulement horizontal), soit :

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \quad (\text{III.8})$$

L'équation de continuité permet d'écrire :

$$Q_v = S_1 V_1 = S_2 V_2 \Rightarrow V_1 = \frac{S_2}{S_1} V_2 \quad (\text{III.9})$$

En tenant compte de l'équation (III.9), l'équation (III.8) donne :

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{1}{2g} \left[ V_2^2 - \left( \frac{S_2}{S_1} V_2 \right)^2 \right] \quad (\text{III.10})$$

Où :

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} \left[ 1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right] \quad (\text{III.11})$$

Soit :

$$P_1 - P_2 = \rho \frac{V_2^2}{2} \left[ 1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right] \quad (\text{III.12})$$

$S_1$  et  $S_2$  sont connues (caractéristiques géométriques du venturi),  $P_1$  et  $P_2$  sont mesurées en lisant les hauteurs du liquide manométrique dans le manomètre ou dans les tubes piézométriques, on détermine donc la vitesse  $V_2$ .

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[ 1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right]}} \quad (\text{III.13})$$

Le débit a pour équation :

$$Q_v = S_2 V_2 \quad (\text{III.14})$$

Avec :

$$S_1 = 338,6 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = 84,6 \text{ mm}^2$$

Soit en définitif :

$$Q_v = S_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left( 1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right)}} \quad (\text{III.15})$$

Ce débit est considéré comme un débit théorique, car le fluide est supposé parfait. Le débit réel est obtenu en multipliant le débit théorique par un coefficient correcteur qui prend en considération la perte d'énergie dans le venturi, ce coefficient est appelé coefficient de débit  $C_d$ . Ce coefficient qui est sans dimension ( $C_d < 1$ ), est fonction de la géométrie du tube et du nombre de Reynolds  $Re$  de l'écoulement, il est donné par le rapport :

$$C_d = \frac{\text{débit réel}}{\text{débit théorique}} = \frac{Q_{\text{réel}}}{Q_{\text{th}}} \quad (\text{III.16})$$

Généralement pour le débitmètre « tube de Venturi », la valeur du coefficient de débit est prise généralement  $C_d = 0.953$ .

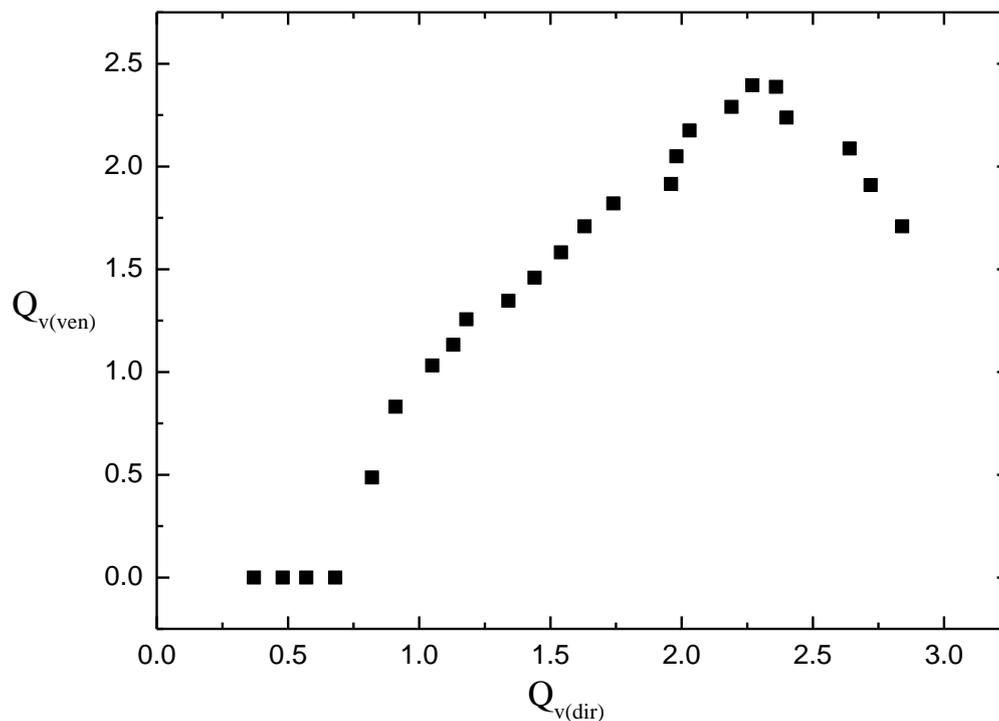
$$Q_v = C_d S_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left( 1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right)}} \quad (\text{III.17})$$

### III.2.2.1 Mesure de débit :

La figure III.7 montre la variation du débit déterminé à l'aide du débitmètre de Venturi en fonction de celui mesuré par la méthode directe.

On remarque, que pour des débits allant de  $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$  à  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , et des débits supérieurs à  $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ , la variation du débit mesuré à l'aide du tube de Venturi, en fonction du débit mesuré par la méthode directe, n'est plus linéaire.

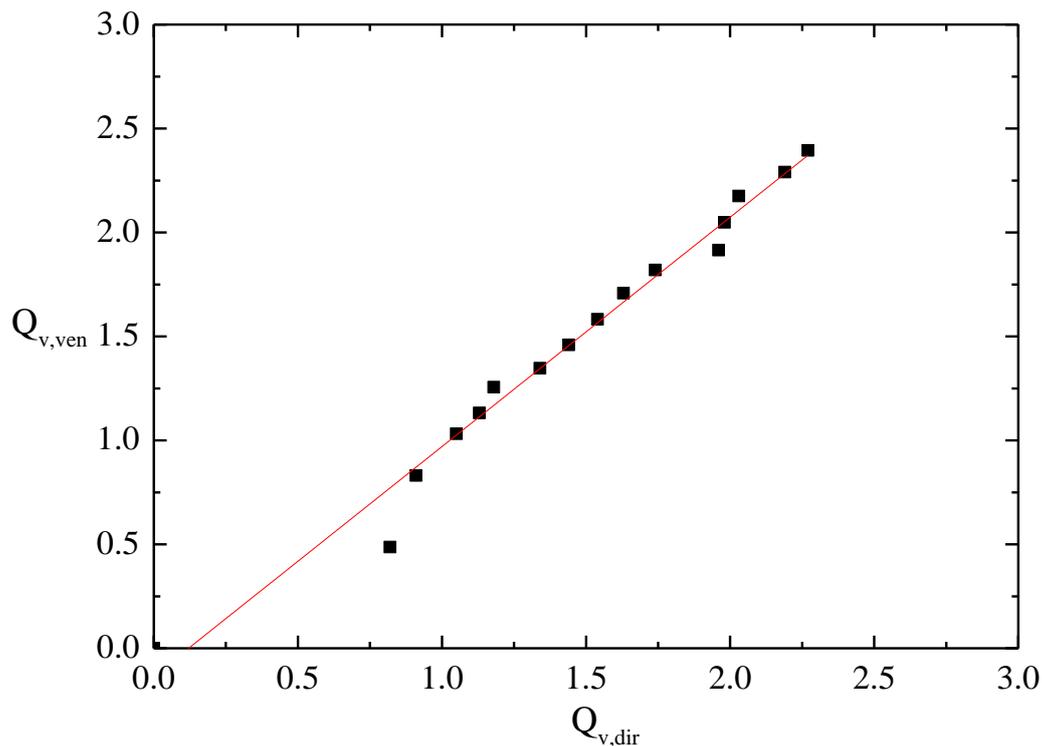
Ce résultat montre que le tube de venturi ne peut pas être utilisé pour mesurer les débits inférieurs à  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$  et supérieurs à  $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ , à la différence de la méthode directe.



**Figure III.7 :** Variation du débit volumique mesuré à l'aide du tube de Venturi  $Q_{v(ven)}$  en fonction de celui déterminé par la méthode directe  $Q_{v(dir)}$  en tenant compte de toutes les mesures.

Pour obtenir une variation linéaire entre ces deux débits, nous avons considéré uniquement l'intervalle  $0,5 \text{ m}^3/\text{h} \leq Q_v \leq 2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ . La figure III.8 montre la variation du débit déterminé à l'aide du débitmètre de Venturi et celui déterminé la méthode directe. On remarque, que cette variation est linéaire ne passant pas par l'origine et d'équation :

$$Q_{v,ven} = 1,103Q_{v,dir} - 0,1331 \quad (\text{III.18})$$



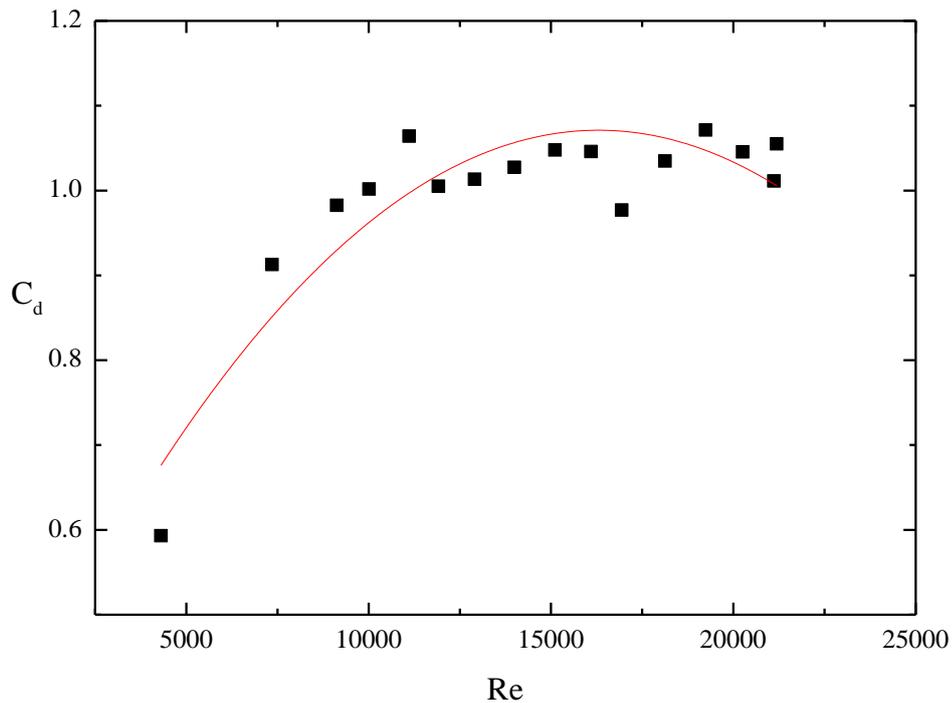
**Figure III.8 :** Variation du débit volumique mesuré à l'aide du tube de Venturi  $Q_{v(ven)}$  en fonction de celui déterminé par la méthode directe  $Q_{v(dir)}$ , cas d'une variation linéaire.

### III.2.2.2 Variation du coefficient de débit en fonction du nombre de Reynolds dans le cas du débitmètre de Venturi :

La figure III.9 montre la variation du coefficient de débit en fonction du nombre de Reynolds. Le coefficient de débit augmente avec le nombre de Reynolds jusqu'à atteindre une valeur maximale pour un nombre de Reynolds aux environs de 15000, pour diminuer par la suite. La variation du coefficient de débit est parabolique d'équation :

$$C_d = 0,34 + 8,94Re - 2,74Re^2 \quad (III.19)$$

elle n'est pas donc linéaire, ce qui a pour conséquence : une erreur sur le nombre de Reynolds (erreur sur la viscosité ou masse volumique) entraîne une grande erreur sur le calcul du coefficient de débit en fonction du nombre de Reynolds.



**Figure III.9 :** Variation du coefficient de débit en fonction du nombre de Reynolds dans le cas du débitmètre de Venturi.

Le tableau 1, montre que la valeur du coefficient de débit trouvée, n'est pas loin de celles données par le tableau suivant. En effet dans notre cas, le rapport des diamètres est  $d/D = 0.5$  et le nombre de Reynolds est  $10^4$

Coefficient de décharge ( $C_d$ )				
Rapport de diamètre	Nombre de Reynolds			
$\frac{d}{D}$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$
0,2	0,968	0,988	0,994	0,995
0,4	0,957	0,984	0,993	0,995
0,6	0,95	0,981	0,992	0,995
0,7	0,94	0,978	0,991	0,995

**Tableau III.1 :** Quelques valeurs standard du coefficient de débit en fonction du rapport des diamètres et du nombre de Reynolds [42]

Le coefficient de débit peut être aussi donné par :

$$C_d = C \times E \tag{III.20}$$

Le coefficient de décharge  $C$  dépend de la géométrie de la conduite et du débitmètre, donc du coefficient  $\beta = d/D$ , et du nombre de Reynolds,  $Re$ . Le nombre de Reynolds caractérise la nature du régime de l'écoulement et permet de voir si l'écoulement est laminaire ou turbulent. Il est important de noter que les débitmètres à organe déprimogène sont beaucoup plus adaptés pour mesurer les écoulements turbulents. Leur précision devient moins bonne au régime laminaire

Les valeurs du coefficient de décharge  $C$  des divers éléments primaires ont été obtenues par expérimentation sur banc d'essai et sont disponible dans la norme ISO 5167. Des formules empiriques telles que la formule de Stolz ou de celle de Reader Harris/Galagher qui a été adoptée récemment par la norme ISO 5167 (1998) permettent le calcul du coefficient  $C$ . [43]

Le coefficient de vitesse d'approche  $E$  :

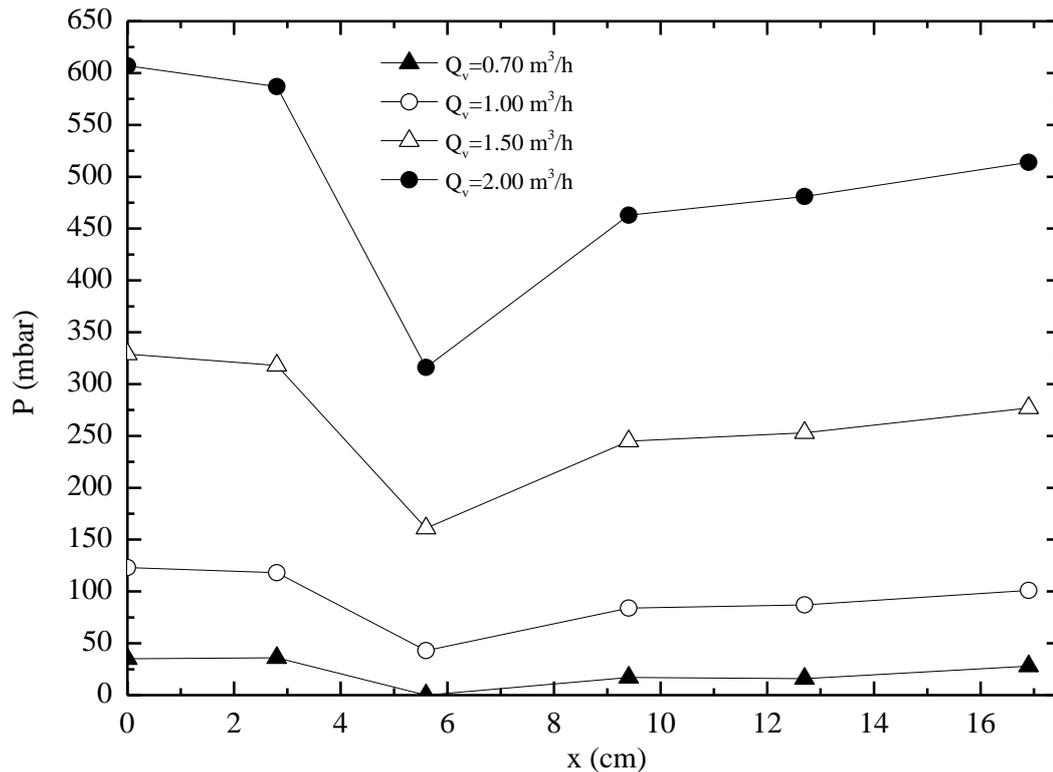
$$E = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{V_1^2}{V_2^2}\right)}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (\text{III.21})$$

La relation III.21 fait apparaître que le signal primaire de la pression différentielle  $\Delta P = P_1 - P_2$  et par conséquent les erreurs de mesure sur le débit se trouvent multipliées par le coefficient de vitesse d'approche  $E$  ; Donc, et afin de réduire cette erreur on doit éviter que le coefficient  $\beta$  ne soit proche de 1, c'est à dire  $V_1$  proche de  $V_2$  .

### III.2.2.3 Variation de la pression le long du tube de Venturi :

La figure III.10, montre la variation de la pression le long du tube venturi pour différentes valeurs du débit. On remarque que la variation a la même allure et ce que quel que soit le débit. La pression diminue à partir de la partie divergent pour atteindre sa valeur minimale au col ( $x=5,6$  cm) pour augmenter par la suite dans la partie divergente. Cette variation confirme la conservation de l'énergie mécanique totale donnée par l'équation de Bernoulli, où la pression augmente avec la section contrairement à la vitesse.

Rappelons que dans la partie divergente du tube de Venturi, il peut y avoir apparition de tourbillons (perte de charge) qui peuvent influencer sur la mesure du débit. Nous pensons que la différence entre le débit déterminé par le tube de venturi et celui mesuré par la méthode directe peut être dû à cette perte de charge.



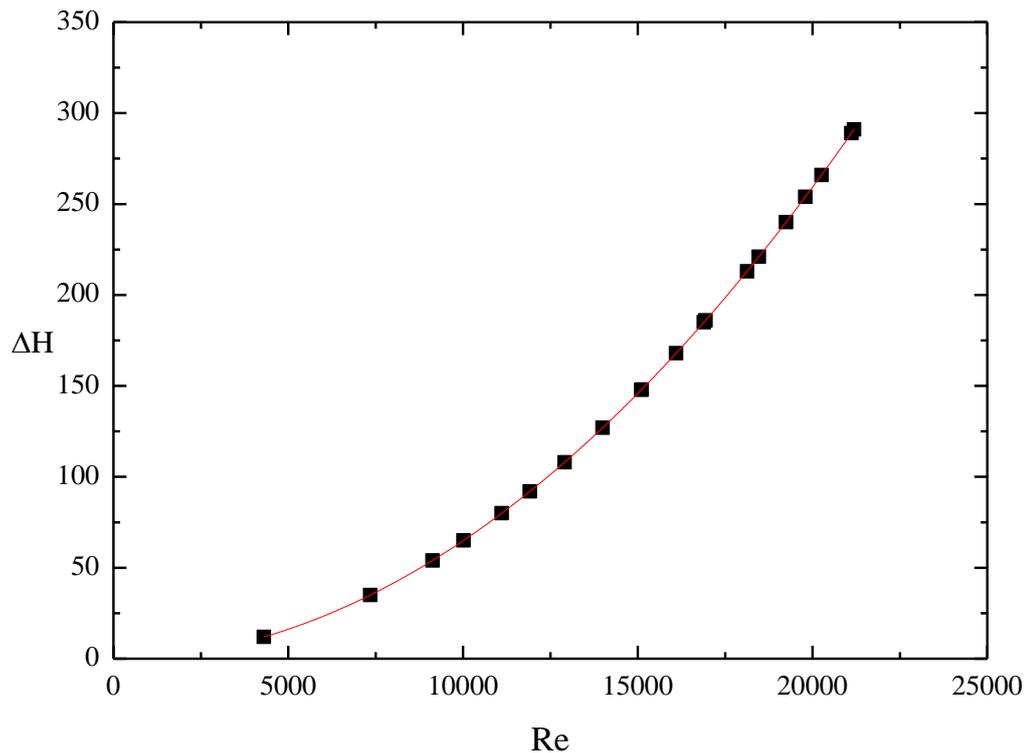
**Figure III.10 :** Variation de la pression le long du tube de Venturi pour différentes valeurs du débit volumique.

#### III.2.2.4 Variation de la perte de charge dans le tube de venturi en fonction du nombre de Reynolds :

La figure III.11, montre que la perte de charge singulière varie d'une façon parabolique en fonction du nombre de Reynolds. Cette figure est en bonne concordance avec les données du tableau III.1, en effet, nous pensons qu'il y a une relation entre le coefficient et la perte de charge singulière.

La perte de charge est donnée par l'équation :

$$\Delta H = -4,79 \times 10^{-7} \text{ Re} + 6,48 \times 10^{-7} \text{ Re}^2 \quad (\text{III.22})$$



**Figure III.11:** Variation de la perte de charge singulière en fonction du nombre de Reynolds

### III.2.3 Comparaison entre le débit déterminé par le débitmètre « diaphragme » et le débit mesuré par la méthode directe :

Un diaphragme est une plaque mince percée d'un orifice circulaire, que l'on place dans la conduite, perpendiculairement au sens d'écoulement du fluide. Comme dans le tube de venturi, le débit du fluide étant constant, on observe logiquement au passage de l'orifice, une augmentation de la vitesse et une diminution de la pression. De même, deux prises de pression, en amont et en aval du diaphragme, permettent de mesurer la différence de pression et donc d'en déduire le débit volumique. Ce système, crée néanmoins des pertes de charges plus importantes que le tube de venturi. Des pertes de charges caractéristiques créées au niveau de l'orifice et qui dépendent du débit.

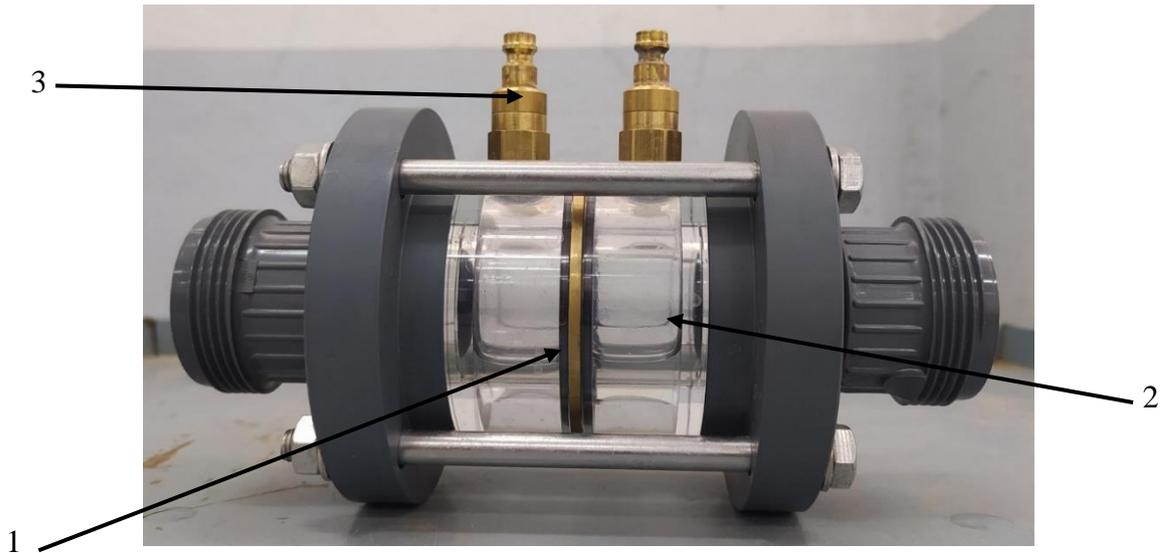


Figure III.12 : Débitmètre Diaphragme : 1) diaphragme, 2) tube en verre, 3 prise de pression

Entre les deux sections du diaphragme, l'application de l'équation de Bernoulli donne :

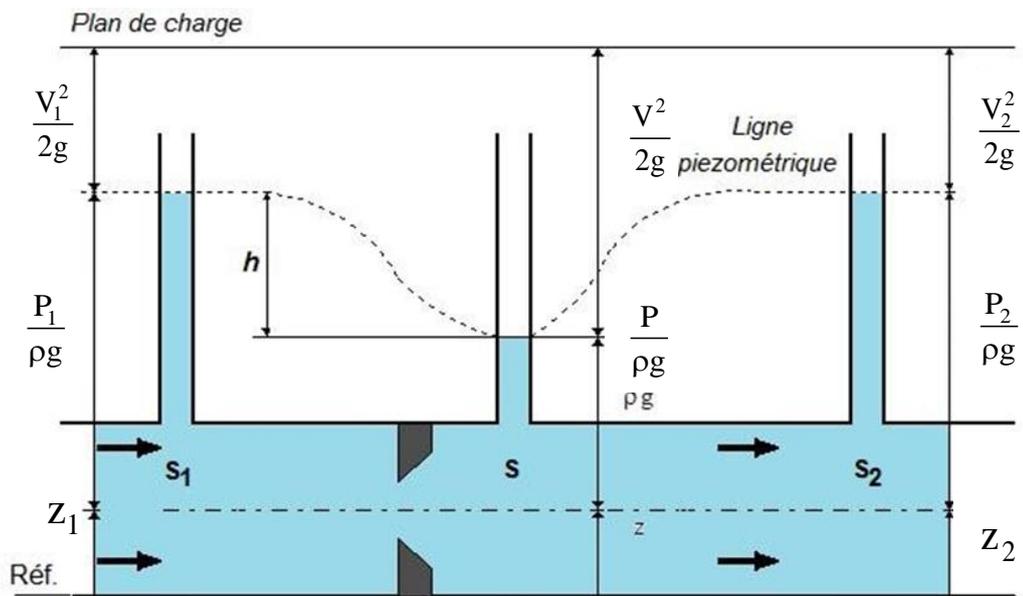


Figure III.13 : Allure de la répartition de la ligne piézométrique et la ligne de charge dans une conduite munie d'un débitmètre « diaphragme »

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \tag{III.23}$$

$z_1 = z_2$  (écoulement horizontal)

En tenant compte de l'équation de continuité :

$$Q_v = S_1 V_1 = S_2 V_2 \quad (\text{III.24})$$

L'équation de Bernoulli devient :

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \quad (\text{III.25})$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{1}{2g} \left[ V_2^2 - \left( \frac{S_2}{S_1} V_2 \right)^2 \right] \quad (\text{III.26})$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{V_2^2}{2g} \left[ 1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right] \quad (\text{III.27})$$

$$P_1 - P_2 = \rho \frac{V_2^2}{2} \left[ 1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right] \quad (\text{III.28})$$

Soit :

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[ 1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right]}} \quad (\text{III.29})$$

Le débit théorique s'écrit donc :

$$Q_{th} = S_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left( 1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right)}} \quad (\text{III.30})$$

Avec :

$$S_2 = 268,8 \text{ mm}^2$$

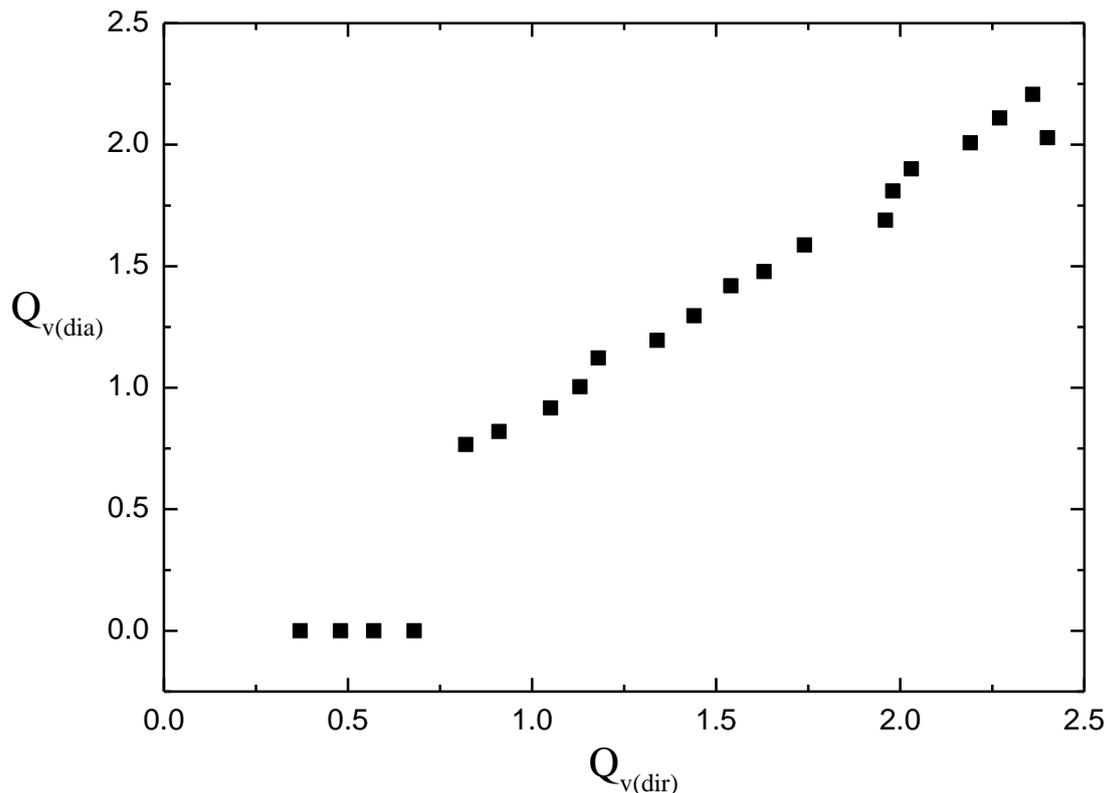
En tenant compte de  $C_d$  (coefficient de débit du diaphragme, ( $C_d = 0.67$ )), l'équation (III.30) donne :

$$Q_{réel} = C_d S_2 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (\text{III.31})$$

La figure III.14 montre la variation du débit déterminé à l'aide du débitmètre « diaphragme » en fonction du débit mesuré par la méthode directe.

On remarque, que pour un débit allant de  $0,2 \text{ m}^3 / \text{h}$  à  $0,5 \text{ m}^3 / \text{h}$ , la variation entre le débit déterminé à l'aide du diaphragme et celui mesuré par la méthode directe, n'est plus linéaire. Ceci est dû aux débits aux premières valeurs du débit déterminé par le diaphragme et qui sont nuls à la différence de ceux mesurés par la méthode directe.

Ce résultat montre que le diaphragme ne peut pas être utilisé pour mesurer les débits inférieurs à  $0,5 \text{ m}^3 / \text{h}$  et supérieurs à  $2,4 \text{ m}^3 / \text{h}$ .

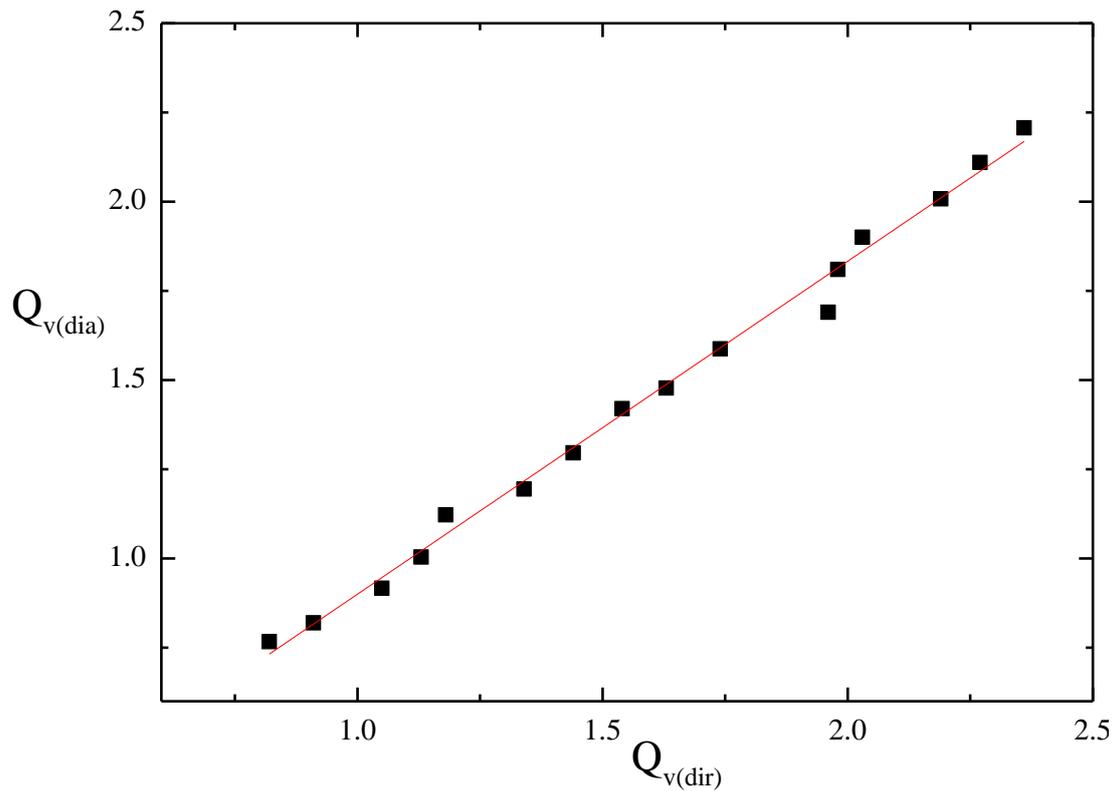


**Figure III.14 :** Variation du débit volumique déterminé à l'aide du débitmètre de diaphragme  $Q_{v(\text{dia})}$  en fonction de celui mesuré par la méthode directe  $Q_{v(\text{dir})}$  en tenant compte de toutes les mesures.

Pour obtenir une variation linéaire entre ces deux débits, nous avons considéré uniquement l'intervalle  $0,5 \text{ m}^3 / \text{h} \leq Q_v \leq 2,4 \text{ m}^3 / \text{h}$ .

La figure III.15 montre la variation du débit déterminé à l'aide du débitmètre du diaphragme et celui déterminé la méthode directe. On remarque, que cette variation est linéaire ne passant pas par l'origine et d'équation :

$$Q_{v,\text{dia}} = 0,9335Q_{v,\text{dir}} - 0,03302 \quad (\text{III.32})$$

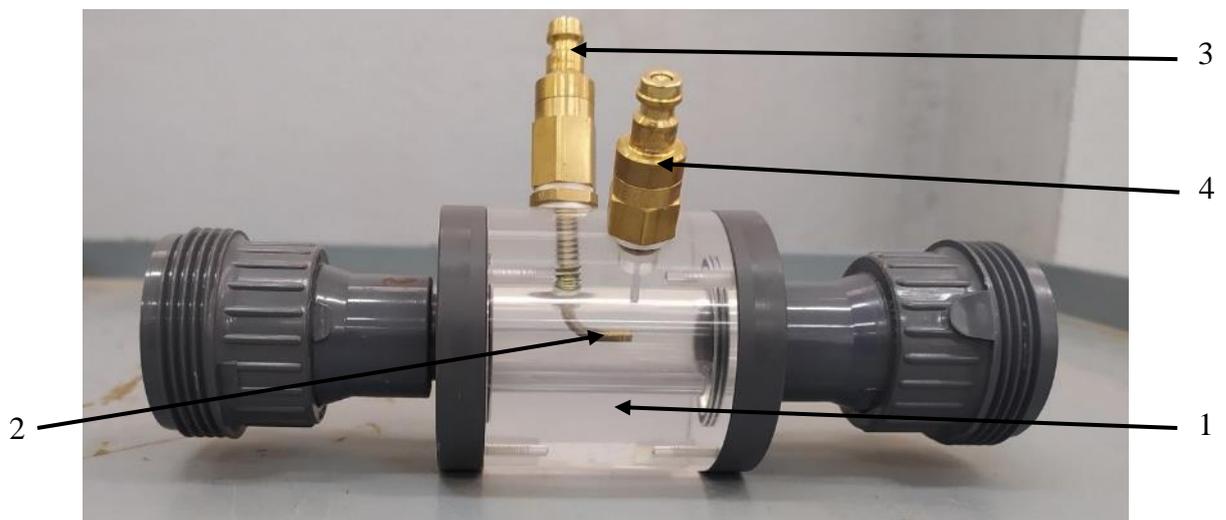


**Figure III.15 :** Variation du débit volumique déterminé à l'aide du débitmètre de diaphragme  $Q_{v(\text{dia})}$  en fonction de celui mesuré par la méthode directe  $Q_{v(\text{dir})}$ , cas d'une variation linéaire.

Il faut rappeler que le débitmètre « diaphragme », nous avons procédé à des corrections qui sont ...

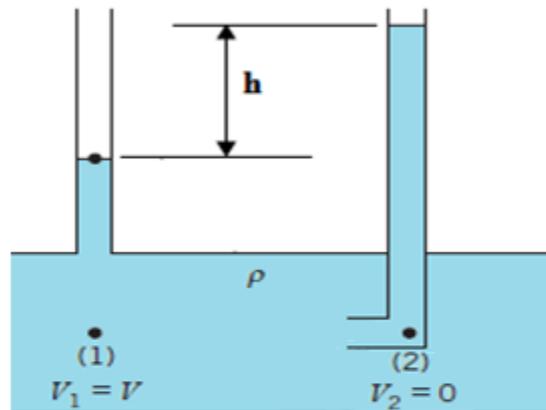
### III.2.4 Comparaison entre le débit déterminé par le tube de Pitot fixe et le débit mesuré par la méthode directe :

Un tube de Pitot, souvent simplement appelé (Pitot) est l'appareil le plus couramment utilisé pour faire des mesures de vitesse dans divers écoulements.



**Figure III.16 :** Tube de Pitot

1) tube ou conduite en verre, 2) tube de Pitot fixe, 3) prise de pression totale, 4) prise de pression statique.



**Figure III.17** : Représentation schématique de tube de Pitot

Le principe est basé sur la mesure de la pression statique et de la pression dynamique en un point d'un écoulement.

L'équation de Bernoulli entre 1 et 2 s'écrit :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (\text{III.33})$$

On a :

$$z_1 = z_2 \text{ (même niveau)}$$

$$V_2 = 0 \text{ (point 2 est un point d'arrêt c-à-d est un obstacle)}$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 \quad (\text{III.34})$$

$$V_1 = \sqrt{2 \frac{P_2 - P_1}{\rho}} \quad (\text{III.35})$$

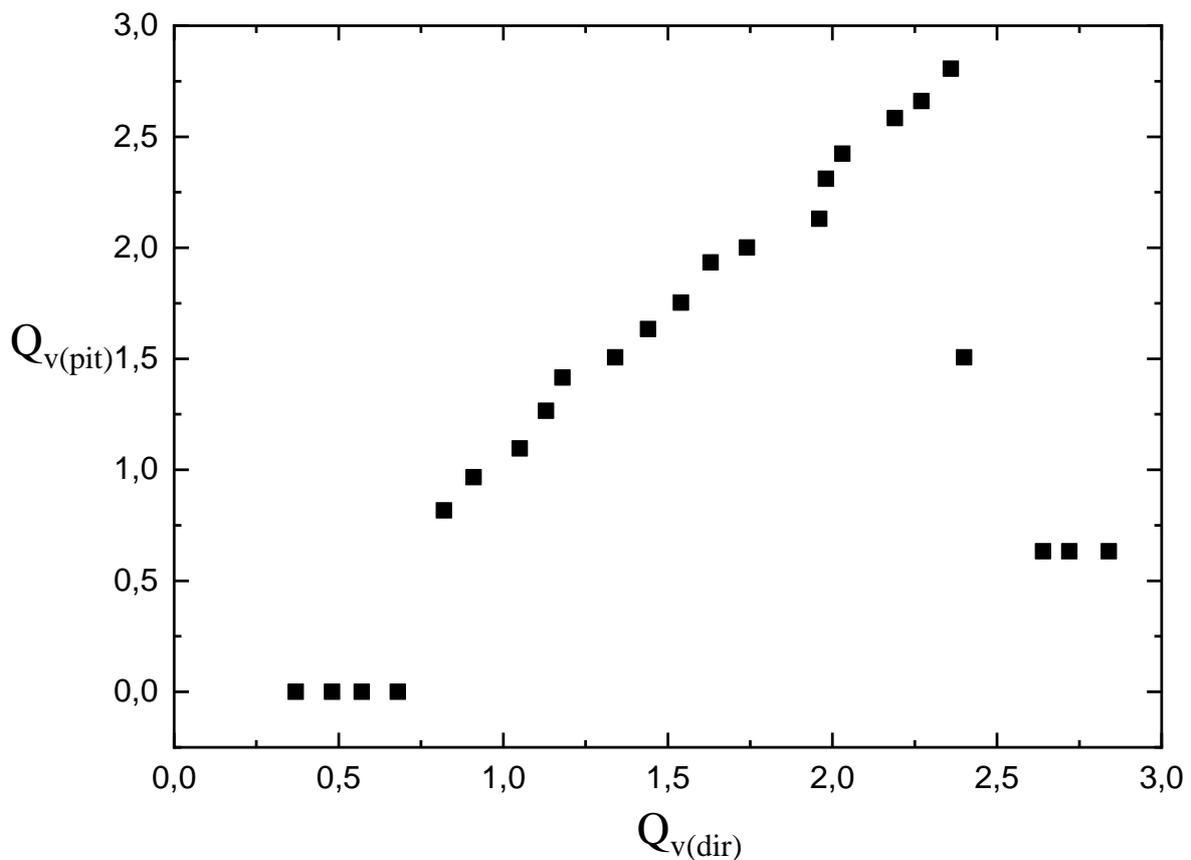
Le débit devient :

$$Q_v = S \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{\rho}} \quad (\text{III.36})$$

$$\text{Avec : } S = 226,90 \text{ mm}^2$$

La figure III.18 montre la variation du débit déterminé à l'aide du débitmètre de Pitot fixe et le débit mesuré par la méthode directe.

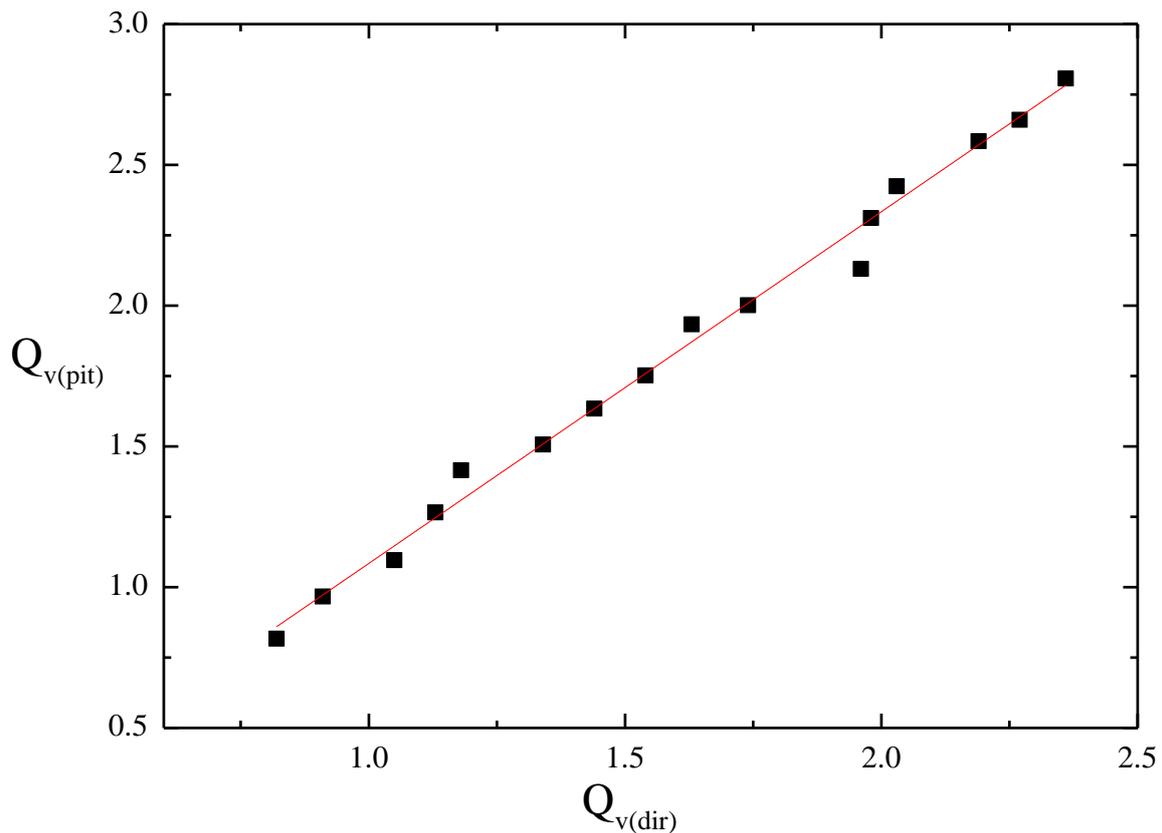
On remarque, que pour un débit déterminé par la méthode directe et allant de  $0,37 \text{ m}^3/\text{h}$  à  $0,68 \text{ m}^3/\text{h}$ , le débit mesuré par le tube de Pitot fixe est nul. Ceci est dû au fait que, dans le tube de Pitot et pour les faibles débits, la pression totale est presque égale à la pression statique. À partir d'un débit  $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ , il n'y a aucune linéarité entre les deux débits, on pense que ceci est dû à ce que le tube de Pitot fixe ne peut pas être utilisé pour mesurer des débits supérieurs à  $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$ .



**Figure III.18 :** Variation du débit volumique déterminé à l'aide du tube de Pitot fixe  $Q_{v(\text{Pitot fixe})}$  en fonction de celui mesuré par la méthode directe  $Q_{v(\text{dir})}$ .

La figure III.19 montre la variation du débit déterminé à l'aide du débitmètre de Pitot fixe et celui déterminé la méthode directe, en ne tenant compte que des points permettant d'avoir une variation linéaire. Cette dernière ne passe pas par l'origine et a pour équation :

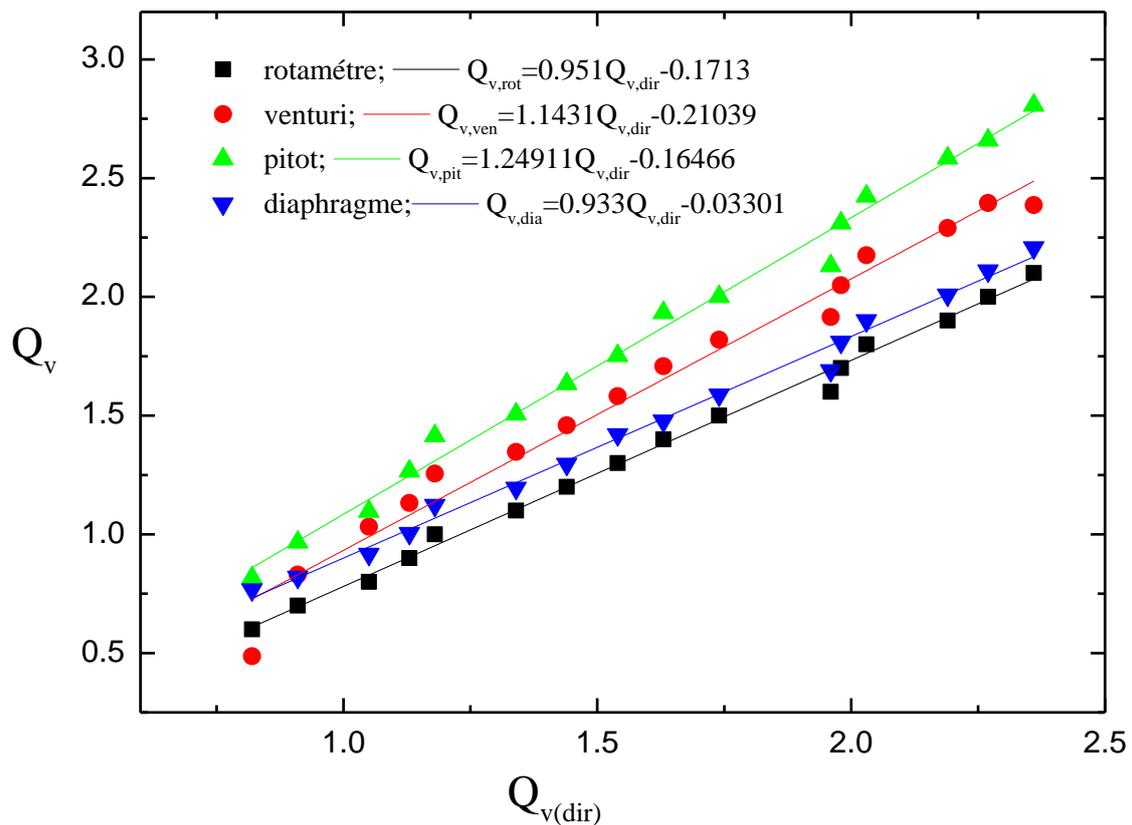
$$Q_{v,\text{pit}} = 1.2491Q_{v,\text{dir}} - 0.1646 \quad (\text{III.37})$$



**Figure III.19 :** Variation du débit volumique déterminé à l'aide du tube de Pitot fixe  $Q_{v(\text{Pitot fixe})}$  en fonction de celui mesuré par la méthode directe  $Q_{v(\text{dir})}$ , cas d'une variation linéaire.

### III.2.5 Comparaison entre le débit mesuré par la méthode directe et le débit déterminé les autres méthodes :

La figure III.20 montre la comparaison entre les quatre méthodes indirectes de mesure de débit (rotamètre, tube de Venturi, diaphragme et tube de Pitot fixe) et la méthode directe. On remarque que la méthode de mesure de débit qui se rapproche le plus de la méthode directe est celle du rotamètre, et ce à cause de la valeur de la pente de l'équation de la droite (0,95193) et du coefficient de corrélation (0,99514).



**Figure III.20 :** Comparaison entre les différentes méthodes de mesure de débit.

### III.2.6 Mesure de débit à l'aide du tube de Pitot mobile :

Une autre méthode de mesure de débit, est d'utiliser le tube de Pitot double mobile. Ce dernier permet d'obtenir le profil de vitesse en fonction du rayon dans une section droite de la conduite. On détermine ensuite, à partir par une méthode numérique, la surface du profil de vitesse qui représente le débit selon la définition cinématique du débit volumique.



**Figure III.21 :** Tube de Pitot mobile

**Définition :** le débit volumique à travers une surface  $S$  est égale aux flux du vecteur vitesse  $\vec{V}$  à travers cette même surface, soit :

$$Q_v = \int_S \vec{V} \cdot \vec{n} dS \quad (\text{III.38})$$

Où  $\vec{n}$  est la demi-normale dirigée vers l'extérieur.

Comme il s'agit d'un écoulement à une seule direction horizontale, il vient :

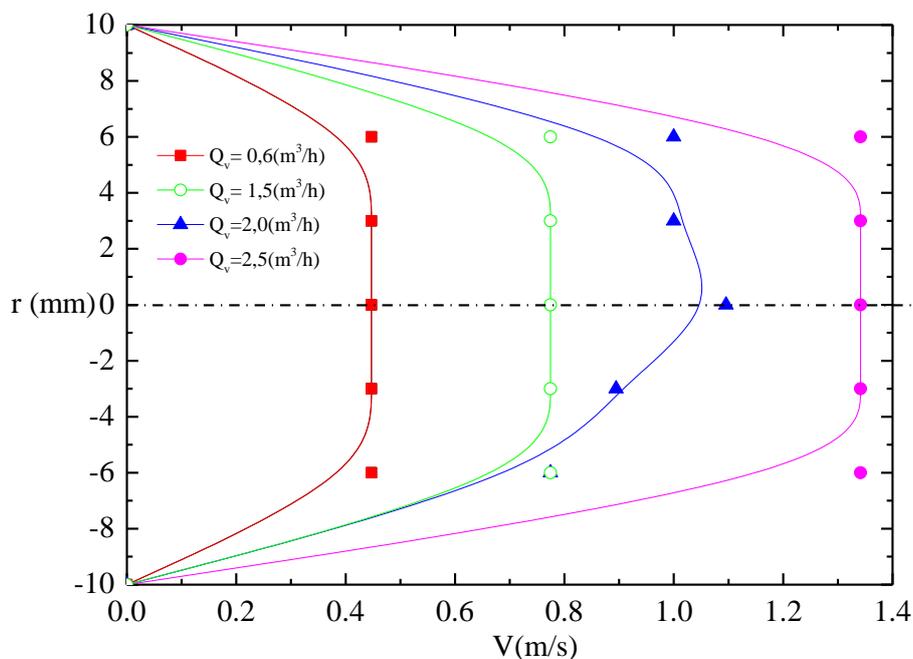
$$Q_v = \int_S u(r) dS \quad (\text{III.39})$$

Rappelons que ce type de tube de Pitot ne fait pas partie des accessoires du banc d'essai, il a été ajouté.

La figure III.22, présente le profil de vitesses obtenus par le tube de Pitot double mobile, pour différentes valeurs du débit volumique ( $Q_v = 0,6; 1,5; 2,0; 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) donné par la méthode directe.

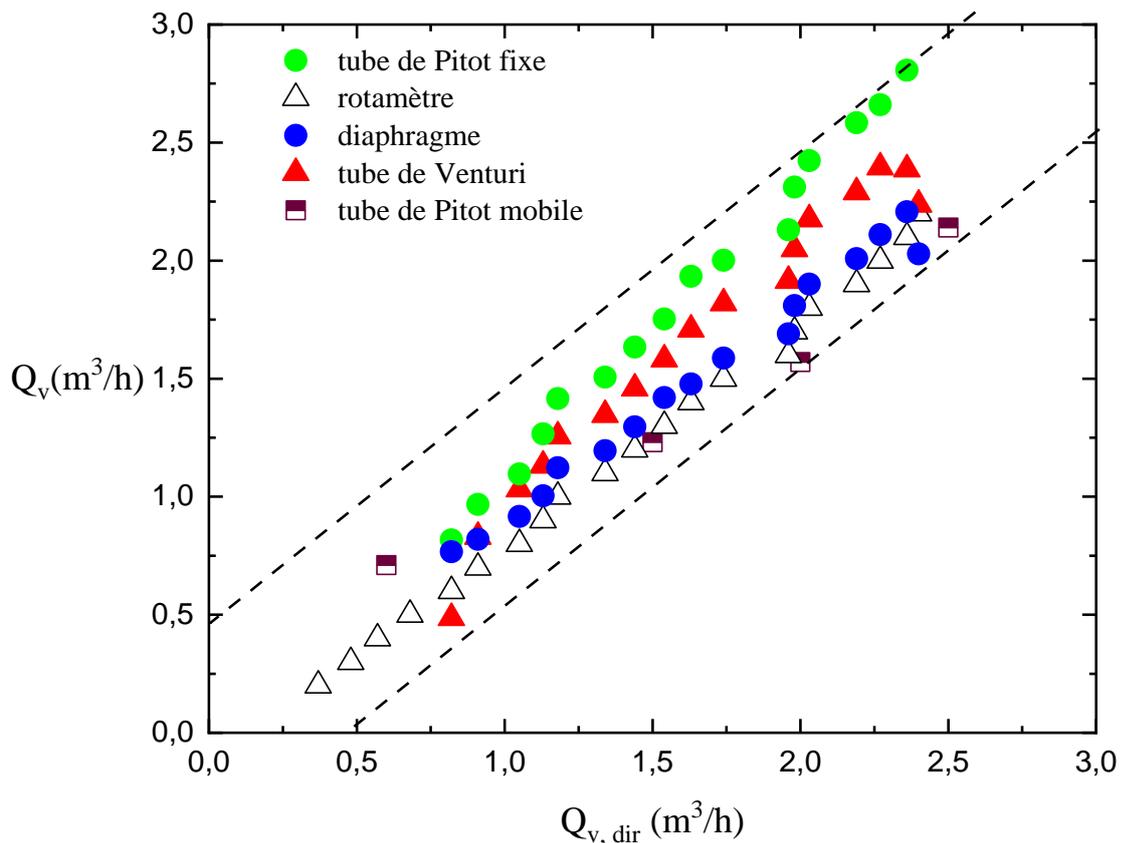
On remarque que la taille du profil de vitesse augmente avec l'augmentation du débit déterminé par la méthode directe.

Le débit donné par le tube de Pitot double mobile est déterminé en calculant la surface du profil. Cette dernière est calculée en déterminant l'équation du profil de vitesses, puis, l'intégrer (équation 39).



**Figure III.22 :** Profil de vitesse mesuré à l'aide d'un tube de Pitot double mobile.

La figure III.23, montre la comparaison entre la méthode du tube de Pitot double mobile avec les autres méthodes. On remarque que, même si le nombre de points obtenus dans le cas du tube de Pitot mobile n'est pas grand, ces points sont situés dans le nuage de points formées par les points expérimentaux obtenus par les autres méthodes de mesure de débit. Le nuage de points est limité par les deux droites de pente l'unité, ce qui normalement doit être obtenu, c.à.d., que tous les débits mesurés par la méthode directe doivent égaux à ceux obtenus par les autres méthodes.



**Figure III.23 :** comparaison entre la méthode du tube de Pitot double mobile avec les autres méthodes.



***Conclusion Générale***

### Conclusion générale :

Dans ce projet de fin de cycle, nous avons présenté différentes méthodes de mesure de débit et de vitesses et des processus de mesure expérimentale, et les méthodes indirectes utilisées qui sont : le rotamètre, le tube de Venturi, le diaphragme, le tube de Pitot fixe et le tube de Pitot mobile. Les résultats expérimentaux obtenus à l'aide de ces méthodes indirectes sont comparés à ceux de la méthode directe (volume/temps).

Les différents résultats obtenus, à savoir la comparaison entre le débit mesuré à l'aide de la méthode directe et le débit déterminé à l'aide des différentes méthodes indirectes, montre une variation linéaire de pente égale presque à l'unité. Cependant, cette linéarité est absente pour les trois ou les quatre premières et dernières valeurs expérimentale, et ce pour le diaphragme, le tube de Venturi et le tube de Pitot fixe.

Pour le débitmètre « diaphragme », les résultats obtenus montrent une très bonne linéarité entre le débit mesuré par la méthode directe et celui déterminé à partir du diaphragme.

La mesure de la perte de charge dans le tube de Venturi, a permis de voir que cette dernière (perte de charge) n'est pas négligeable, et nous pensons qu'elle peut expliquer la déviation entre le débit mesuré par la méthode directe et celui déterminé par le tube de venturi.

La mesure de la répartition de la pression, le long du tube de Venturi, a été faite pour comprendre l'idée de Venturi à appliquer le théorème de Bernoulli, et ce en procédant un changement de section.

Les résultats ont montré aussi, que le coefficient de débit, donné par le rapport entre le débit réel mesuré à l'aide de la méthode directe et le débit théorique déterminé par la méthode indirecte, dépend du nombre de Reynolds. Ce résultat est valable pour le diaphragme.

L'utilisation du tube de Pitot mobile, a permis de déterminer le profil de vitesses dans une section transversale droite. À partir de ce profil, le débit volumique est déterminé en utilisant la définition cinématique. Les résultats obtenus par ce dernier débitmètre, appartiennent à la plage de ceux des autres décimètres utilisés dans cette étude expérimentale.

Nous espérons que cette étude expérimentale sert de référence pour d'autres études.



***Références bibliographie***

- [1] MORSLI Mohamed Abd El Wahab et BOUICH Mohamed, Techniques de Mesure et d'Etalonnage des Débitmètres au niveau de l'Usine de Dessalement d'Eau de Mer de Mostaganem, mémoire de Master en Electrotechnique Industrielle Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem 2019/2020.
- [2] Amina Bekraoui, Développement d'un compteur thermique à gaz Transactionnel. Université m'hamed bougara-boumerdes 2019 / 2020
- [3] Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, Cahier 7 – Méthodes de mesure du débit, 3e édition.
- [4] Amina Bekraoui, Etude Théorique et Simulation des Compteurs Thermiques de Gaz, mémoire de Magistère en physique énergétique Université d'Adrar 2014 / 2015
- [5] International Standard ISO 5167-1, « Measurement of fluid flow by means of pressure différentiel devices », third edition 2003.
- [6] <https://www.smartmeasurement.com/fr/positive-displacement-measuring-principle/> consulté le 15\03\2022 10:15
- [7] Mouloud guemana, mesure des gros débits de gaz contribution des venturis-tuyeres a col sonique, mémoire de magister maintenance et tribologie, université m'hamed bouguerra boumerdes 2002
- [8] <https://www.omega.fr/prodinfo/debitmetre-section-variable.html> consulté le 19/03/2022 09:20
- [9] DAOULI Abdelmadjid et BAALLALI Abdelhakim, Etude et réglage par PI analogique d'un système de comptage dynamique mémoire de master commande électrique, UNIVERSITE Ahemed Draïa Adrar 2017/2018
- [10] Yunus A Cengel, John M Cimbala. Mécanique des fluides : fondements et applications, livre, septembre 2017.
- [11] <https://sitelec.org/cours/dereumaux/mesurdebit.htm> consulté le 06/04/2022 09:20
- [12] [https://www.researchgate.net/publication/315842637\\_Velocimetrie\\_laser\\_Doppler](https://www.researchgate.net/publication/315842637_Velocimetrie_laser_Doppler) consulté le 08/04/2022 14:20
- [13] [http://gatt.fr/CIRA/Cours/Instrum/CIRA1%20-%205\)%20Debit.pdf](http://gatt.fr/CIRA/Cours/Instrum/CIRA1%20-%205)%20Debit.pdf) consulté le 05/03/2022 10:30
- [14] <https://www.franceenvironnement.com/sous-rubrique/debitmetre-a-piston#:~:text=Les%20d%C3%A9bitm%C3%A8tres%20%C3%A0%20piston%20sont%20%C3%A9quip%C3%A9s%20d'un%20piston%20rotatif,selon%20l'effet%20de%20Hall> consulté le 10\04\2022 13:50
- [15] <http://edmond.peulot.pagesperso-orange.fr/kobold%2024.jpg> consulté le 15\04\2022 11:20
- [16] [http://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/bendjerad\\_adel/files/cour\\_captur\\_13\\_chapitres\\_7\\_univ\\_batna\\_2\\_bendjerad.pdf](http://staff.univbatna2.dz/sites/default/files/bendjerad_adel/files/cour_captur_13_chapitres_7_univ_batna_2_bendjerad.pdf) consulté le 28\03\2022 10:12
- [17] [https://www.gunt.de/images/datasheet/845/HM-286-Essais-sur-une-pompe--engrenages-gunt-845-zeichnung\\_einzelheit\\_1.jpg](https://www.gunt.de/images/datasheet/845/HM-286-Essais-sur-une-pompe--engrenages-gunt-845-zeichnung_einzelheit_1.jpg) consulté le 18\04\2022 15:20

- [18] Amor Gharsalli, Mesures et Instrumentations « Mesure de Débit », Ministère de l'Enseignement Supérieur de la Recherche Scientifique, Université Virtuelle de Tunis, 4 pages.
- [19] BOUGUENOUS SARAH, Modélisation des pertes de charges linéaires et singulières dans les conduites cylindriques (Mécanique des Fluides), Master en Physique, Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem 2016/2017
- [20] BOUNOUA, ABDELKADER, « Hydraulique générale », Extrait de cours, Université de Poitiers, France, 1992.
- [21] CHERNAOUT, Redhouane. « Mecanique des Fluides et Hydraulique », Livre, Alger : 1, Université, Ben Aknoun, 2010.
- [22] [http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/krimil\\_farida/files/chapitre\\_i\\_hg.pdf](http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/krimil_farida/files/chapitre_i_hg.pdf) consulté le 21/05/2022 11:20
- [23] Mr YOUSFI Noureddine et Mr YAHIAOUI Hakim, Etude des pertes de charge singulières dans les conduites élastiques, Mémoire de Master en Electromécanique, universite abderahmane mira bejaia 2017/2018
- [24] HIMEUR Rania Majda et DJEMA Anissa , dimensionnement optimal d'un systeme de comptage transactionnel et evaluation de l'incertitude sur la mesure de debit par simulation de monte carlo, Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara 2016-2017
- [25] Khalida BEKRENTCHIR, MECANIQUE DES FLUIDES, Cours et exercices corrigés, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf-Oran Faculté de Chimie,
- [26] Riadh BEN HAMOUDA, NOTIONS DE MECANIQUE DES FLUIDES, cours et exercices corrigés
- [27] Dr BENTALHA Chakib ET Pr HABI Mohammed, polycopié Mécanique des fluides cours et exercices corrigés, Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen –
- [28] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b7/Moody\\_FR.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b7/Moody_FR.png) consulté le 15/05/2022 14:30
- [29] BENNADIR Hicham et OULAD HADDAR Djamel, CONTRIBUTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE DE L'ECOULEMENT DE FLUIDE A TRAVERS UN TUBE DE VENTURI, UNIVERSITE DE GHARDAIA, Génie des procédés 2018/2019
- [30] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/54/Venturifixed2.PNG/700px-Venturifixed2.PNG> consulté le 26/04/2022 10:35
- [31] TAZOUTA Abdelhakim et BOUGHRARA Abdelhakim, Simulation numérique de l'écoulement Cavitant dans le Tube de Venturi, université Aboubekr Belkaid Tlemcen, GENIE MECANIQUE 2018/2019
- [32] <https://canteach.candu.org/Content%20Library/20070400.pdf> consulté le 06/05/2022 09:30
- [33] Dr ELGURRI Mohamed, MECANIQUE DES FLUIDES THEORIE ET APPLICATION , UNIVERSITE IBN KHALDOUN DE TIARET, 2014/2015
- [34] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01777404> consulté le 09/04/2022 11:00
- [35] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/16/Pitot\\_tube\\_with\\_Bernoullis\\_law\\_fr.svg/1280px-Pitot\\_tube\\_with\\_Bernoullis\\_law\\_fr.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/16/Pitot_tube_with_Bernoullis_law_fr.svg/1280px-Pitot_tube_with_Bernoullis_law_fr.svg.png) consulté le 15/05/2022 14:30

[36] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/75/Kiel\\_probe.png/800px-Kiel\\_probe.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/75/Kiel_probe.png/800px-Kiel_probe.png) consulté le 15/04/2022 14:30

[37] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Tube-de-Pitot-page-3.html> consulté le 10/04/2022 14:25

[38] ASSAF RYMA, DRIF AMINA et BOUSSAID AMINE, Etudes développement d'une commande SCADA pour le contrôle et le comptage de débits de gaz, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU 2008

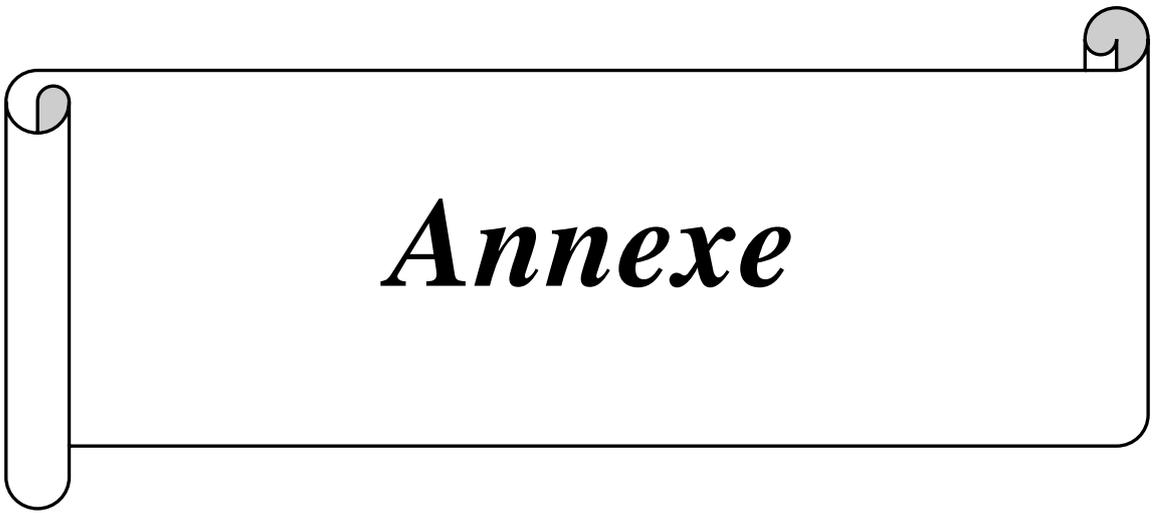
[39] [https://www.cetiat.fr/data/medias/790/style/default/guide\\_comptiaa\\_technologies\\_mesure.pdf](https://www.cetiat.fr/data/medias/790/style/default/guide_comptiaa_technologies_mesure.pdf) consulté le 05/05/2022 10:30

[40] <http://cira-couffignal.fr/archives/archives2013-2014/documents-coursTS1/mesure-debit.pdf>

[41] Dr YUCEFI Sarra, MECANIQUE DES FLUIDES I (cours et application), UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF ORANE, 2016/2017

[42] Journal of Physics: Conference Series, Estimation Optimal Value of Discharge Coefficient in a Venturi Tubes

[43] Chapitre 2 Technique de mesure des débits des fluides industriels



***Annexe***

## Annexe :

Tableau 1 : Mesures expérimentales obtenues par la méthode directe :

$Q_{v,rot}$ ( $m^3/h$ )	t(s)	v(l)	$Q_{v,dir}$ ( $m^3/h$ )	V(m/s)	$R_e$
0.2	48.29	5	0.37	0.16009	4578.5739
0.3	37.27	5	0.48	0.2076843	5939.7715
0.4	31.36	5	0.57	0.2466251	7053.4787
0.5	26.27	5	0.68	0.2942195	8414.6764
0.6	21.9	5	0.82	0.354794	10147.11
0.7	19.63	5	0.91	0.3937349	11260.817
0.8	16.98	5	1.05	0.4543094	12993.25
0.9	15.91	5	1.13	0.4889235	13983.212
1	15.2	5	1.18	0.5105573	14601.938
1.1	13.37	5	1.34	0.5797854	16581.862
1.2	12.47	5	1.44	0.623053	17819.315
1.3	11.66	5	1.54	0.6663205	19056.767
1.4	11	5	1.63	0.7052613	20170.474
1.5	10.31	5	1.74	0.7528557	21531.672
1.6	9.18	5	1.96	0.8480443	24254.067
1.7	9.09	5	1.98	0.8566978	24501.558
1.8	8.85	5	2.03	0.8783316	25120.284
1.9	8.21	5	2.19	0.9475597	27100.208
2	8.11	5	2.27	0.9821738	28090.17
2.1	7.61	5	2.36	1.0211146	29203.877
2.2	7.49	5	2.4	1.0384216	29698.858
2.3	6.79	5	2.64	1.1422638	32668.744
2.4	6.6	5	2.72	1.1768778	33658.705
2.5	6.32	5	2.84	1.2287989	35143.648

Tableau 2 : Mesures expérimentales obtenues par la méthode in directe « tube de Venturi » :

$Q_{v,rot}$ (m <sup>3</sup> /h)	$P_1$ (mbar)	$P_2$ (mbar)	$Q_{v,ven}$ (m <sup>3</sup> /h)	$R_e$
0,2	0	0	0	0
0,3	0	0	0	0
0,4	0	0	0	0
0,5	0	0	0	0
0,6	12	0	0.48635987	16591.1152
0,7	35	0	0.8306176	28334.7234
0,8	62	8	1.03172508	35195.0701
0,9	90	25	1.13194099	38613.7191
1	123	43	1.25577578	42838.0752
1,1	153	61	1.34666949	45938.7177
1,2	193	85	1.4590796	49773.3455
1,3	235	108	1.58222764	53974.2747
1,4	283	135	1.70803972	58266.0816
1,5	329	161	1.81979199	62078.2686
1,6	372	186	1.91480071	65319.2857
1,7	431	218	2.04907054	69899.6106
1,8	488	248	2.17506745	74197.7227
1,9	547	281	2.2898547	78113.4417
2	607	316	2.39504458	81701.767
2,1	631	342	2.3868	81420.5209
2,2	631	377	2.23760779	76331.1514
2,3	631	410	2.08719605	71200.18
2,4	631	446	1.90964646	65143.4596
2,5	631	483	1.70803972	58266.0816

Tableau 3 : Mesures expérimentales obtenues par la méthode indirecte « diaphragme » :

$Q_{v,rot}$ ( $m^3/h$ )	$P_1$ (mbar)	$P_2$ (mbar)	$Q_{v,dia}$ ( $m^3/h$ )	$R_e$
0,2	0	0	0	0
0,3	0	0	0	0
0,4	0	0	0	0
0,5	0	0	0	0
0,6	16	9	0.76713286	21889.4952
0,7	36	28	0.82009952	23400.8547
0,8	59	49	0.91689914	26162.9509
0,9	83	71	1.00441268	28660.0768
1	112	97	1.12296752	32042.9399
1,1	139	122	1.19549022	34112.3145
1,2	175	155	1.2966912	37000
1,3	212	188	1.42045404	40531.4693
1,4	251	225	1.47845544	42186.4907
1,5	292	262	1.5881159	45315.5602
1,6	332	298	1.69067848	48242.0978
1,7	385	346	1.81073072	51667.6882
1,8	432	389	1.90132253	54252.6497
1,9	481	433	2.00882537	57320.1535
2	535	482	2.11086034	60231.6362
2,1	590	532	2.20818554	63008.7296
2,2	631	582	2.02964277	57914.1606

Tableau 4 : Mesures expérimentales obtenues par la méthode indirecte « tube de Pitot fixe » :

$Q_{v,rot}$ ( $m^3/h$ )	$P_1$ (mbar)	$P_2$ (mbar)	$Q_{v,pit}$ ( $m^3/h$ )	$R_e$
0,2	0	0	0	0
0,3	0	0	0	0
0,4	0	0	0	0
0,5	0	0	0	0
0,6	2	7	0.81705924	16999.4832
0,7	21	28	0.96675753	20114.0598
0,8	43	52	1.0962	22807.2
0,9	68	80	1.26578273	26335.4861
1	94	109	1.41518811	29443.9686
1,1	124	141	1.5065828	31345.4982
1,2	157	177	1.63411848	33998.9664
1,3	195	218	1.75239684	36459.8296
1,4	232	260	1.93351506	40228.1195
1,5	272	302	2.00137823	41640.0597
1,6	314	348	2.13062982	44329.2287
1,7	362	402	2.31099251	48081.7994
1,8	409	453	2.4237894	50428.6166
1,9	457	507	2.58376818	53757.0859
2	509	562	2.66015215	55346.3074
2,1	560	619	2.80669066	58395.1424
2,2	617	634	1.5065828	31345.4982
2,3	631	634	0.63289137	13167.7431
2,4	631	634	0.63289137	13167.7431
2,5	631	634	0.63289137	13167.7431

Tableau 5: Mesures expérimentales obtenues par la méthode directe « tube de Pitot mobile » :

$$Q_{v,rot} = 0.6 \text{ (m}^3 \text{ / h)}$$

r(mm)	P <sub>1</sub> (mbar)	P <sub>2</sub> (mbar)	V(m/s)	R <sub>e</sub>
10	4	4	0	0
6	4	3	0.4472136	8944.27191
3	4	3	0.4472136	8944.27191
0	4	3	0.4472136	8944.27191
-3	4	3	0.4472136	8944.27191
-6	4	3	0.4472136	8944.27191
-10	4	3	0.4472136	8944.27191

$$Q_{v,rot} = 1.5 \text{ (m}^3 \text{ / h)}$$

r(mm)	P <sub>1</sub> (mbar)	P <sub>2</sub> (mbar)	V(m/s)	R <sub>e</sub>
10	225	229	0.89442719	17888.5438
6	225	230	1	20000
3	225	230	1	20000
0	225	231	1.09544512	21908.9023
-3	226	230	0.89442719	17888.5438
-6	226	229	0.77459667	15491.9334
-10	226	229	0.77459667	15491.9334

$$Q_{v,rot} = 2 \text{ (m}^3 \text{ / h)}$$

r(mm)	P <sub>1</sub> (mbar)	P <sub>2</sub> (mbar)	V(m/s)	R <sub>e</sub>
10	412	420	1.26491106	25298.2213
6	411	420	1.34164079	26832.8157
3	411	420	1.34164079	26832.8157
0	410	419	1.34164079	26832.8157
-3	409	418	1.34164079	26832.8157
-6	410	419	1.34164079	26832.8157
-10	410	416	1.09544512	21908.9023

$$Q_{v,rot} = 2.5 \text{ (m}^3 \text{ / h)}$$

r(mm)	P <sub>1</sub> (mbar)	P <sub>2</sub> (mbar)	V(m/s)	R <sub>e</sub>
10	631	634	0.77459667	15491.9334
6	631	634	0.77459667	15491.9334
3	631	634	0.77459667	15491.9334
0	631	634	0.77459667	15491.9334
-3	631	634	0.77459667	15491.9334
-6	631	634	0.77459667	15491.9334
-10	631	634	0.77459667	15491.9334

## Résumé :

La mesure de débit est devenue très importante dans nombreux domaines, il existe de nombreuses méthodes pour la mesuré.

Le présent travail a pour but l'étude théorique et expérimentale des certaines méthodes indirectes de mesure de débit : rotamètre, tube de venturi, diaphragme, tube de Pitot fixe et tube de Pitot mobile. Les résultats expérimentaux trouvés, sont comparés à ceux de la méthode directe (volume/temps). Cette étude expérimentale, a été menée au sein du hall de technologie en utilisant le banc d'essai (GUNT) HM 112.

Toutes les méthodes indirectes de mesure de débit, utilisent le théorème de Bernoulli et l'équation de continuité, à l'exception du rotamètre. Les résultats expérimentaux obtenus par les méthodes indirectes sont proches de ceux de la méthode directe. Le coefficient de débit pour le tube de Venturi et le diaphragme dépend du nombre de Reynolds et donc de la perte de charge. Le rotamètre présente une bonne linéarité par rapport au tube de Pitot fixe et mobile.

**Mots clés :** Débitmètre ; rotamètre ; tube de venturi ; diaphragme ; tube de Pitot.

## ملخص:

أصبح قياس التدفق مهمًا جدًا في العديد من المجالات، وهناك طرق عديدة لقياسه الغرض من هذا العمل هو الدراسة النظرية والتجريبية لبعض الطرق غير المباشرة لقياس التدفق: مقياس الدوران وأنبوب الفنتوري والحجاب الحاجز وأنبوب بيتو الثابت والمتحرك تمت مقارنة النتائج التجريبية التي تم العثور عليها مع تلك الخاصة بالطريقة المباشرة (الحجم / الوقت). أجريت هذه الدراسة التجريبية في قاعة التكنولوجيا باستخدام منصة الاختبار (GUNT) HM 112 تستخدم جميع الطرق غير المباشرة لقياس التدفق نظرية برنولي ومعادلة الاستمرارية، باستثناء مقياس الدوران. النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها بالطرق غير المباشرة قريبة من تلك الخاصة بالطريقة المباشرة. يعتمد معامل التدفق لأنبوب فنتوري والحجاب الحاجز على رقم رينولدز وبالتالي على انخفاض الضغط. يتميز مقياس الدوران بخطية جيدة مقارنة بأنبوب بيتو الثابت والمتحرك

**الكلمات المفتاحية:** مقياس التدفق. مقياس الدوران. أنبوب فينتوري الحجاب الحاجز؛ نظام تصريف

## Abstract:

Flow measurement has become very important in many fields, there are many methods for measuring it.

The purpose of this work is the theoretical and experimental study of certain indirect methods of flow measurement: rotameter, venturi tube, diaphragm, fixed Pitot tube and mobile Pitot tube. The experimental results found are compared with those of the direct method (volume/time). This experimental study was conducted in the technology hall using the test bench (GUNT) HM 112.

All indirect flow measurement methods use Bernoulli's theorem and the continuity equation, with the exception of the rotameter. The experimental results obtained by the indirect methods are close to those of the direct method. The flow coefficient for the Venturi tube and the diaphragm depends on the Reynolds number and therefore on the pressure drop. The rotameter has good linearity compared to the fixed and moving Pitot tube.

**Keywords:** Flow meter; rotameter; venturi tube; diaphragm; Pitot tube.