



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

CENTRE UNIVERSITAIRE D'AIN-TEMOUCHENT

*Institut des Sciences et de la Technologie*

*Département de Génie de l'eau et de l'environnement*

*BP N°284 RP AIN-TEMOUCHENT, 46000- ALGERIE*



# *Travaux pratiques*

## *De*

# *Mécanique des fluides*

## *(ESP & ESL)*

*(Les écoulements sous pression & Les écoulements à surface libre)*

*Par :*

*Dr GUEMOU Bouabdellah*

*2017/2018*

## **I. Préambule**

La mécanique a toujours fasciné l'homme en même temps qu'elle l'a servi ou qu'il a su y avoir recours. Comme toute discipline ancienne, la mécanique des fluides demande de celui qui s'y intéresse un effort « initiatique » tout à la fois long, puisqu'il y'a beaucoup de choses à assimiler.

La mécanique des fluides est une partie très importante dans la formation en sciences et technologies. La proportionnalité dans le programme de cet apprentissage diffère d'une spécialité à une autre, du génie civil, génie mécanique jusqu'à l'hydraulique, les étudiants disposent d'une formation diversifiée dans le domaine large de la mécanique des fluides selon les besoins de la formation.

Pour terminer, c'est aux étudiants que je voudrais m'adresser. Leurs besoins en formation ont été à l'origine de la conception de cet ouvrage. Sa rédaction a été façonnée par l'expérience acquise à leurs contacts et qui seule permet de dégager la formulation la plus percutante en réponse à leurs interrogations.

Ce travail constitue un support des travaux pratiques destiné aux étudiants de différents départements du centre universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent ayant dans leur formation une matière de mécanique de fluides, d'hydraulique générale, des écoulements à surfaces libre, des écoulements en charge ou même les pompes et stations de pompage.

## **II. Sécurité dans les laboratoires de travaux pratiques**

Le laboratoire d'hydraulique du département de Génie de l'Eau et de l'Environnement du centre universitaire Belhadj BOUCHAIB à Ain Temouchent dispose du matériel divers qui permet de faire des manipulations en mécanique des fluides, traitement des eaux, dessalement des eaux de mer, infiltration, décantation, les pompes, les écoulements à surface libre, les débitmètres, contrôle à distance d'un système hydraulique (avec armoire de commande et écran tactile). Tout le matériel du laboratoire est relativement récent (le plus ancien date de 2013).

### **1. Considérations générales :**

Le travail dans les laboratoires des travaux pratiques est relativement dangereux. Il peut se produire des accidents parfois très graves. Un minimum d'organisation permet souvent de les éviter ou du moins d'en diminuer le risque. Voici quatre règles fondamentales à respecter durant les séances de travaux pratiques.

A. Le Port de la blouse, des chaussures fermées sans talon, des lunettes (dans des cas précis) est obligatoire pendant toute la durée de la séance.

B. Interdiction de toucher au banc d'essais autres que celui qui vous a été destiné.

C. Ne pas commencer les manipulations avant de recevoir les explications nécessaires au bon déroulement des expériences.

D. Interdiction de boire et de manger dans les laboratoires

## 2. Précautions face aux principaux risques

Le risque existe dans les laboratoires des travaux pratiques sous différentes formes telles que l'écrasement, le cisaillement, la chute, l'électrocution (l'eau et l'électricité ne font pas bon ménage).

La paillasse et le banc d'essais doivent être toujours très propres et débarrassée de tout ce qui est inutile pour le travail du moment.

Il est interdit de laisser les pilotes fonctionner sans surveillance.

Le risque lié à la manipulation de produits chimiques existe dans le laboratoire des travaux pratiques en mécanique des fluides.

Le matériel ou bancs d'essais des travaux pratiques sont utilisés par un grand nombre d'étudiants. Comme tout matériel, il est susceptible de se dégrader avec le temps, de s'user, tomber en panne ou de nécessiter des entretiens. Il vous est demandé de manipuler ce matériel avec précaution et de signaler tout défaut nécessitant une intervention technique afin de le garder en bon état.

## III. Protocole de purge du multimanomètre dans toutes les manipulations :

La majorité des manipulations dans le laboratoire d'hydraulique contient des multimanomètres interconnectés de façon à calculer les différences de pression, même si la pression d'air est différente le gradient de pression reste le même.

Alors avant le début de toute expérience, il faut purger les bulles d'air du multimanomètres, la procédure prend quelques minutes mais un étudiant peut l'exécuter seul, les étapes nécessaires à cette opération sont :

- 1- Ouvrir complètement les deux vannes (celle à la sortie du bac d'alimentation et celle qui contrôle la manipulation (B))
- 2- Mettre en marche la pompe de circulation
- 3- Fermer complètement la vanne à la sortie du bac d'alimentation
- 4- Pousser la purge d'air en haut du multimanomètre (A) pour introduire l'air et faire descendre le niveau d'eau dans chaque manomètre (à la fermeture de la vanne, il faut que le niveau soit complètement horizontal, sinon il faut revoir l'installation)
- 5- Ouvrir doucement la vanne a la sortie du bac d'alimentation et faites attention à ne pas sortir des intervalles de pressions minimale et maximale.
- 6- Faites varier le débit et procéder à la manipulation demandée.

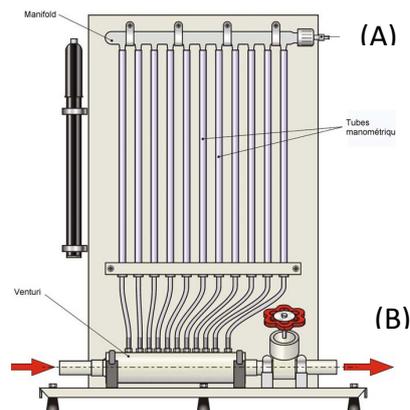


Fig.1 Exemple de purge d'un multimanomètre du tube venturi

## Guide des manipulations

<b>Partie I : Propriétés des fluides</b>	
I. Viscosimètre à Chute de bille .....	05
<b>Partie II : L'hydrostatique</b>	
II. La Poussée hydrostatique (L'intensité & le centre d'application) .....	14
<b>Partie III : Les écoulements en charge</b>	
III.1 Les débitmètres dans les écoulements en charge (Le venturi & le diaphragme) .....	19
III.2 Vérification de l'équation de Bernoulli .....	24
III.3 Pertes de charge singulières .....	29
III.4 Action d'un jet d'eau sur des obstacles .....	34
III.5 L'écoulement à travers un orifice .....	39
<b>Partie IV : Les écoulements à surface libre</b>	
IV.1 Les débitmètres dans les écoulements à surface libre (Les déversoirs) .....	44
IV.2 Vérification de l'équation de Manning strickler .....	50
<b>Partie V : Annexe</b>	
V.1 Les erreurs et les incertitudes .....	59
<b>Références bibliographiques</b> .....	60

## I. Viscosimètre à Chute de bille



### I. But

Le but de cette manipulation consiste à déterminer la viscosité pour différents liquides.

Le but secondaire est de comprendre le principe et savoir mesurer la viscosité d'un fluide donné à l'aide des moyens simples (bouteille, chronomètre, une bille de diamètre et de poids connus).

### II. Théorie

Un fluide est le plus souvent décrit comme un milieu continu, déformable et qui se déplace en s'écoulant.

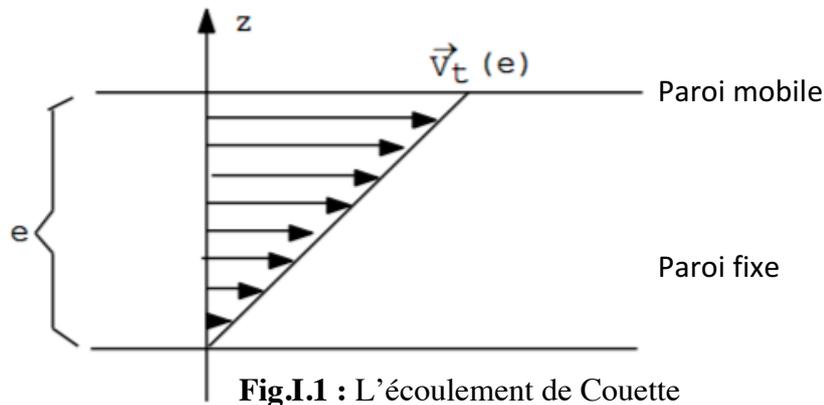
Pratiquement le fluide parfait n'existe pas, les fluides naturels sont constitués par des molécules présentant quelques adhérences entre elles, ce qui tend à gêner leurs mouvements, c'est ce qui constitue la viscosité.

De façon assez intuitive, on peut dire que la notion de viscosité est associée à la résistance qu'oppose tout fluide à sa mise en mouvement.

La viscosité c'est une grandeur qui caractérise les frottements internes du fluide. Elle caractérise la résistance d'un fluide à son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force. Les fluides de grande viscosité résistent à l'écoulement et les fluides de faible viscosité s'écoulent facilement.

Pour schématiser cette propriété de façon plus quantitative, on considère l'expérience de

Couette en écoulement plan :



Cette schématisation concerne un fluide visqueux disposé entre deux plans parallèles distants d'une épaisseur « e ». L'une des deux plaques est fixe par contre l'autre est mobile à une vitesse  $V$  due à l'application d'une force  $F$  sur cette dernière d'une façon permanente dans son propre plan.

En l'absence de toute autre force extérieure (gravité ou pression), le mouvement du fluide résulte exclusivement du déplacement du plan mobile.

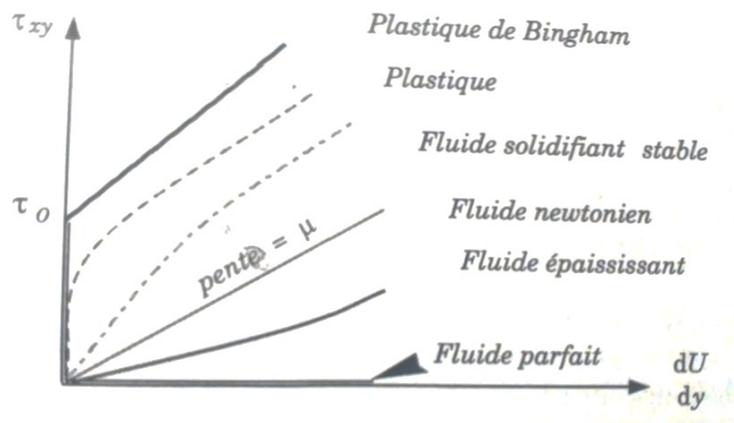
L'expérience a montré que, pour certains fluides, le profil de vitesses qui s'établit entre les deux plaques est linéaire, si la force  $F$  est appliquée sur une aire  $A$ , alors :

$$F/A \text{ est proportionnelle à } V/e$$

En désignant par  $\mu$  (en  $\text{Ns/m}^2$ ) le coefficient de proportionnalité appelé viscosité dynamique du fluide, on écrit :

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V}{e} \quad (\text{I.1})$$

Cette relation s'applique aux fluides ayant un comportement rhéologique que nous qualifierons de Newtonien (l'eau et l'air). Il existe aussi d'autres comportements rhéologiques.



**Fig.I.2** Exemples de comportements rhéologiques indépendants du temps

En plus de la viscosité dynamique  $\mu$ , la viscosité cinématique  $\nu$  (en  $\text{m}^2/\text{s}$ ) est aussi

caractéristique des fluides avec :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ avec } \rho \text{ la masse volumique}$$

**La viscosité dynamique**  $\mu$  s'exprime en :

$$1 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2 = 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 1 \text{ Kg}/\text{m}\cdot\text{s} = 10 \text{ Poise} = 1000 \text{ Centipoise} = 1 \text{ PI (Poiseuille)}$$

**La viscosité cinématique**  $\nu$  s'exprime en :

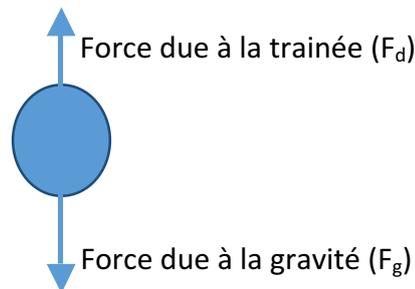
$$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ Stokes} = 10^6 \text{ Centistokes}$$

## II.1 Nombre de Reynolds ( $R_e$ )

Osborne Reynolds a effectué des expériences sur les écoulements. Ses expériences l'ont mené à définir un rapport sans dimension appelé nombre de Reynolds qui permet de connaître la nature du régime d'écoulement.

$$R_e = \frac{\rho_f V_t D}{\mu} \quad (I.2)$$

Dans les expériences de Reynolds, la valeur de  $D$  représente le diamètre d'un tuyau dans lequel le fluide s'écoule à une vitesse  $V$ . Dans le viscosimètre à chute de bille, elle peut être directement substituée par le diamètre de la bille qui traverse le liquide à une vitesse limite de chute  $V_t$  et  $\rho_f$  étant la masse volumique du fluide.



Lorsqu'un objet se déplace dans un liquide et que sa vitesse devient constante du fait de la relation entre la traînée due aux propriétés du fluide et la force poussant l'objet (généralement son propre poids), alors il a atteint sa vitesse limite de chute.

$$F_g = F_d \text{ avec } F_d = C_d \left( \frac{1}{2} \rho \pi V_t^2 r^2 \right) \quad (I.3)$$

$C_d$  étant le coefficient de traînée qui dépend du nombre de Reynolds,  $r$  le rayon de la bille et  $V_t$  c'est la vitesse limite de chute.

## II.2 Équations de Stokes ( $Re < 0.1$ )

George Stokes a réalisé des expériences sur la dynamique des fluides, en donnant son nom aux unités de viscosité cinématique. Il a créé une expression pour calculer la force de traînée due au frottement sur de petites billes traversant des liquides.

$$\text{A faible nombre de Reynolds } C_d = \frac{24}{Re} \text{ donc } F_d = 6\pi r V_t \mu \quad (I.4)$$

La force vers le bas ( $F_g$ ) n'est pas simplement liée à l'action de gravité sur la bille. Elle dépend du poids de la bille et de sa flottabilité dans le liquide (ou force ascendante ou poussée d'Archimède dans le liquide) et la force résistante provoquée par l'écoulement autour de la bille.

À la vitesse limite de chute, les forces vers le bas peuvent également être prédites, en utilisant :

$$F_g = \frac{4}{3}(\rho_b - \rho_f)\pi gr^3 \quad (I.5)$$

Avec  $r$  étant le rayon de la bille et  $\rho_b$ ,  $\rho_f$  sont respectivement les masses volumiques de la bille et du fluide. A partir des équations et, à la vitesse limite de chute :

$$\frac{4}{3}(\rho_b - \rho_f)\pi gr^3 = 6\pi r V_t \mu \quad (I.6)$$

Qui se simplifie en :

$$V_t = \frac{2(\rho_b - \rho_f)}{9\mu} gr^2 \quad (I.7)$$

A partir de cette équation, on obtient :

$$\mu = \frac{2(\rho_b - \rho_f)}{9V_t} gr^2 \quad (I.8)$$

Du fait de la densité relative du liquide et des petites billes, elles atteignent la vitesse limite de chute après quelques centimètres même dans les liquides de viscosité faible tels que l'eau. Les expériences permettent une courte chute de 150 mm à 200 mm dans le liquide avant de pouvoir mesurer la vitesse, nous pouvons donc être certains que la bille est déjà à la vitesse limite de chute lors de vos mesures.

### II.3 Les Équations d'Oseen ( $R_e = 0.2 - 5$ )

Carl Oseen a effectué des expériences sur les écoulements visqueux à de faibles nombres de Reynolds. Il a identifié une équation plus précise pour établir la viscosité pour des nombres de Reynolds compris entre environ 0.2 et 5.

$$C_d = \frac{24}{R_e} \left(1 + \frac{3}{16} R_e\right) \text{ donc } F_d = 6\pi r V_t \mu \left(1 + \frac{3}{16} R_e\right)$$

$$F_d = 6\pi r V_t \mu \left(1 + \frac{3}{16} R_e\right) = 6\pi r V_t \mu + \frac{9}{4} \pi r^2 V_t^2 \rho_f = F_g = \frac{4}{3}(\rho_b - \rho_f)\pi gr^3$$

$$\mu = \frac{2(\rho_b - \rho_f)}{9V_t} gr^2 - \frac{3}{8} r V_t \rho_f \quad (I.9)$$

Pour les grands nombres de Reynolds, vous ne devriez pas trouver une combinaison de billes et de liquides qui excèdent des nombres de Reynolds supérieurs à 100.

### II.4 Correction de la vitesse

Les théories sur les écoulements visqueux de Stokes et d'autres s'appliquent à de petites billes dans de relativement grands volumes de liquide. La littérature indique que le diamètre

du récipient contenant le liquide doit être 100 fois plus grand que celui de la bille tombante, ce qui s'avérerait impraticable pour la plupart des essais. Ce grand rapport devrait permettre au liquide de se développer librement autour de l'objet tombant. Cependant, dans un tube en verre expérimental, le liquide ne peut pas se développer librement aussi bien, celui-ci étant légèrement restreint par le diamètre intérieur du tube. Un tube plus étroit ou un objet de diamètre plus important augmentent cet effet.

Pour corriger ce problème, vous pouvez multiplier votre vitesse moyenne obtenue expérimentalement par un facteur de correction qui tient compte du diamètre de la bille et des dimensions de tube. Cela vous donnera la valeur corrigée de la vitesse ( $V_{corr}$ ) et une valeur plus précise pour  $V_t$  :

$$V_{corr} = V_m \left( 1 + 2.105 \frac{D_b}{D_t} + 1.95 \frac{D_b}{l} \right) \quad (I.10)$$

Avec  $V_m$  c'est la vitesse moyenne de chute (mesurée expérimentalement)

$D_b$  : diamètre de la bille

$D_t$  : diamètre du tube d'essai

$l$  : la hauteur de chute

### III. Matériels utilisés

Un viscosimètre à chute de bille se monte verticalement sur la paroi plate d'un mur adapté afin de réaliser des expériences sur la mesure du coefficient de trainée de différentes billes dans différents fluides. Il comprend des billes d'essai de différentes dimensions et densités et fonctionne avec une gamme de liquides appropriés.

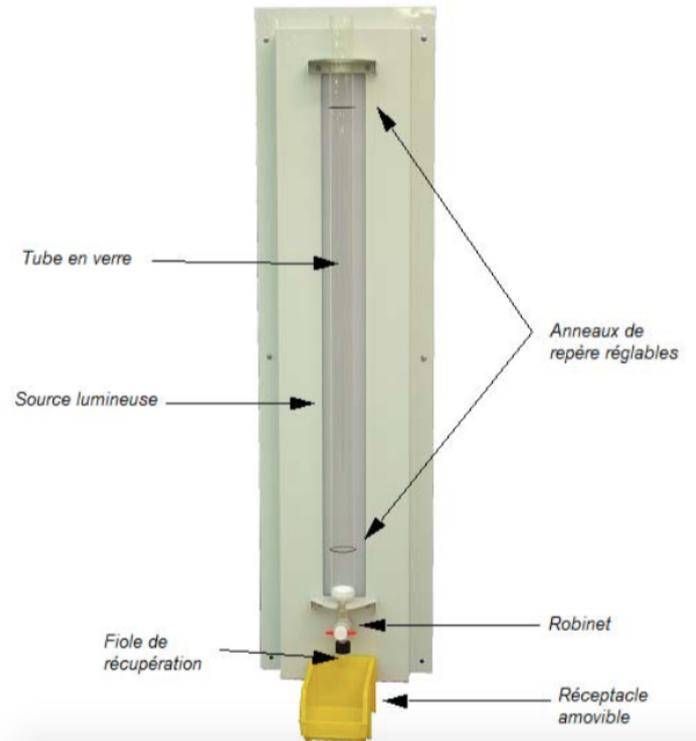


Fig. I.3 Description du matériel

Ces expériences permettront de déterminer la viscosité d'un fluide à l'aide des équations citées dans la partie théorique. On dispose de plusieurs billes de tailles et de matières différentes selon le fluide étudié.

**Tableau.I.1** Nature, densité et dimension des billes(Référence)

Matériau	Densité Kg/m <sup>3</sup>	Les Diamètres (mm)			
		3.96	5	6	
Duralumin	2700	3.96	5	6	
Delrin	1400	5	6	7	8
Nylon	1150	3		4	
Acier inoxydable	8000	1.587	2	3	3.5
		4	4.5	5	6
		7	7.5	8	

#### IV. Protocole expérimental

Il existe plusieurs appareils et des techniques pour la détermination de la viscosité. Le viscosimètre capillaire permet de mesurer la viscosité d'un fluide en mesurant le temps d'écoulement d'un certain volume de fluide à une température fixe dans un tube capillaire où le régime est laminaire et la viscosité du fluide est proportionnelle à la durée d'écoulement.

Une autre manière de mesure de la viscosité consiste à étudier la résistance d'un fluide à la chute d'une bille de taille fixe, cette méthode fait l'objet de cette manipulation.

##### IV.1 Réglage des marqueurs et de la hauteur de chute

Avant le début des manipulations, un réglage des marqueurs et de la hauteur de chute s'impose

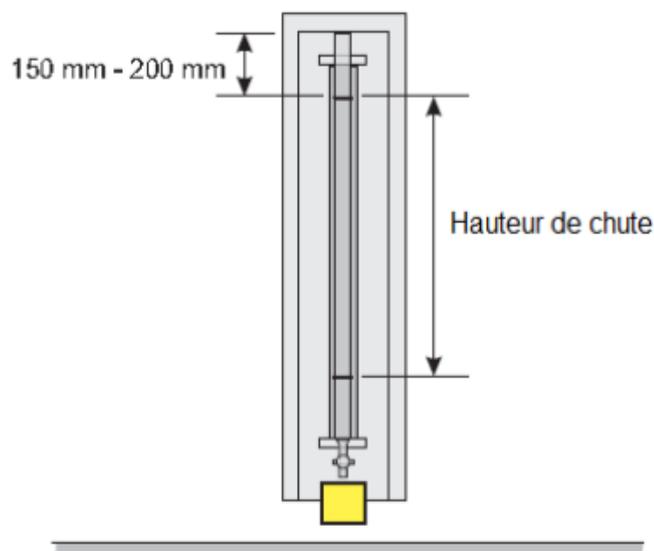


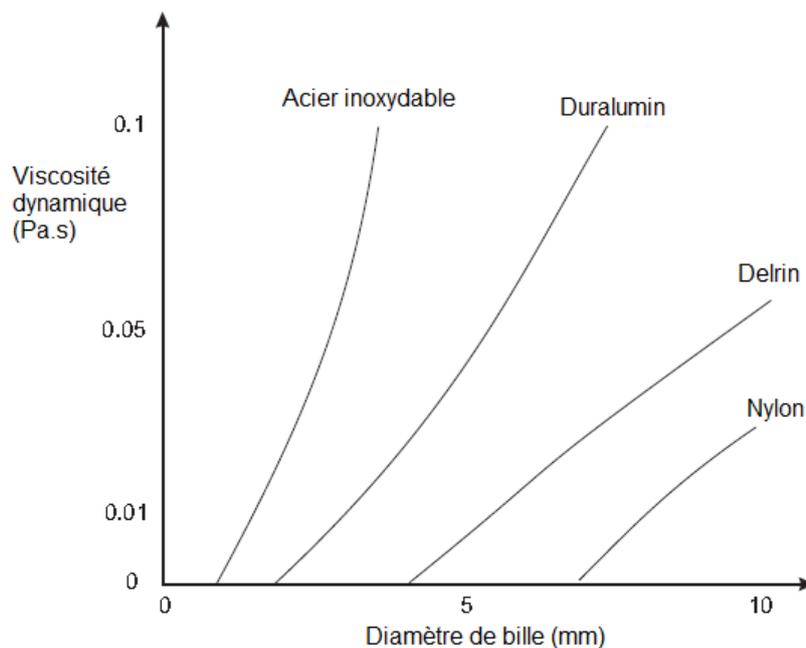
Fig.I.4 Réglage des marqueurs et de la hauteur de chute

Réglez l'anneau du marqueur supérieur à environ 150 mm à 200 mm vers le bas du tube. Cela permet à votre bille d'essai d'atteindre la vitesse limite de chute avant que vous commenciez à mesurer la chute.

Utilisez la règle fournie pour régler l'anneau du marqueur inférieur à une distance de chute convenable, par exemple 1 mètre.

#### IV.2 Correspondance entre les billes et les types de liquides

Durant les essais, quelques erreurs pourront être dues à votre capacité à chronométrer précisément les temps de chutes. Pour obtenir de meilleurs résultats, vous aurez donc besoin d'une combinaison bille / liquide qui vous donne un temps de chute raisonnable, en améliorant votre précision de chronométrage et réduisant les erreurs de chronométrage. Les liquides de faible viscosité peuvent donner des temps de chute de moins de cinq secondes, qui peuvent être trop courts pour procéder à un chronométrage précis et les liquides de viscosité importante peuvent donner des temps de chute supérieurs à 20 minutes, qui peuvent être trop long pour des raisons pratiques.



**Fig.I.5** Correspondance entre les billes et les types de liquides(Reference)

La procédure à suivre afin de déterminer la viscosité d'un fluide à l'aide d'une chute de bille est la suivante :

1. Créez un tableau de résultats vierge similaire au tableau I.2 ci dessous.
2. Raccordez l'alimentation électrique au secteur pour alimenter la lampe à basse tension.
3. Assurez-vous que la bille que vous avez choisie correspondant à peu près à la viscosité attendue du liquide pour de meilleurs résultats.
4. Relevez la température ambiante à l'endroit où vous vous situez.

5. Préparez au moins trois billes d'essai identiques pour vous aider à déterminer une bonne vitesse moyenne et mesurer précisément le diamètre frontal des billes.

**Tableau I.2** : Tableau de résultats vierge

Bille d'essai		Liquide d'essai
Matériau :		Description :
Diamètre $D_b$ :		Température :
Densité $\rho_b$ :		Densité $\rho_f$ :
Essai	Temps de chute (s)	Vitesse ( $m \cdot s^{-1}$ )
1	.	
2		
3		
Moyennes :	.	

6. Réglez les marqueurs à une hauteur de chute convenable - par exemple un mètre.

7. Maintenez la bille d'essai directement au-dessus du centre du tube aussi près que possible de la surface de votre liquide d'essai. Cela permet d'éviter que la bille ne vienne heurter la paroi intérieure du tube et affecter vos résultats et réduit l'accélération de la chute libre dans l'air avant que la bille n'entre en contact du liquide.

8. Préparez votre chronomètre et libérez délicatement la bille, en faisant attention à ne pas lui permettre de tourner sur elle-même. Démarrez votre chronomètre lorsque la bille franchit l'anneau du premier marqueur, arrêtez-le lorsqu'elle franchit le deuxième marqueur.

9. Répétez l'opération au moins trois fois et déterminez un temps moyen correct et donc une vitesse moyenne ( $V_m$ ).

10. Répétez l'opération pour différentes dimensions et densités de billes dans différents liquides.

11. Finalement vous pouvez récupérer les billes à l'aide du robinet du dessous du tube.

## V. Exploitation des résultats

- Multipliez votre vitesse moyenne par le facteur de correction pour obtenir une vitesse plus précise (voir le paragraphe de correction de la vitesse).
- Utilisez cette vitesse pour déterminer laquelle des équations de Stokes ou d'Oseen s'appliquent en calculant le nombre de Reynolds
- Utilisez l'équation adaptée pour déterminer la viscosité
- Comparez vos valeurs calculées de viscosité avec les valeurs théoriques issues de la littérature.

**Tableau.I.3 : La viscosité de quelques fluides**

Liquide	Densité (kg.m <sup>-3</sup> )	Viscosité dynamique (Pa.s ou N.s/m <sup>2</sup> )	Viscosité cinématique $\nu$ (m <sup>2</sup> .s)
Eau à 20°C	998.2	0.001002	0.000001004
Huile de moteur (SAE 40)	900	0.319	0.0003544

## IV. La Poussée hydrostatique (L'intensité & le centre d'application)



### I. But

Le but de cette manipulation est de déterminer la valeur et le point d'application de la poussée hydrostatique dans un système équilibré par le moment résultant du poids des masses et un volume d'eau.

Le but secondaire est de comprendre les contraintes appliquées aux ouvrages de stockage d'eau (barrages, réservoirs, etc.)

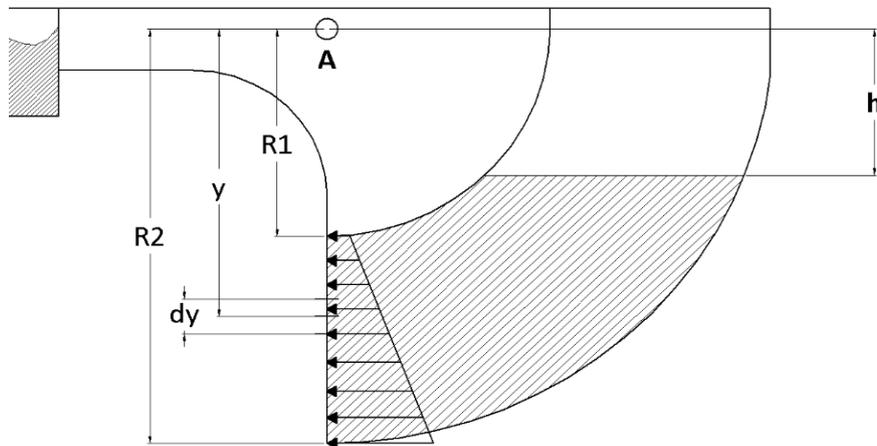
### II. Théorie

Le centre de poussée peut être défini comme le point d'application de la poussée totale du liquide perpendiculairement à une surface plane.

En fonction de sa force de pesanteur, une pression se forme dans les liquides au repos, appelée pression hydrostatique, pression liée à la gravité ou pression gravitationnelle. Cette pression exerce sur toutes les surfaces en contact avec le liquide une force proportionnelle à la taille de la surface.

L'action de la pression hydrostatique a une grande importance dans de nombreux domaines d'engineering (pour l'industrie navale, le génie hydraulique (dimensionnement des écluses et des barrages), et également pour les installations urbaines de stockage d'eau.

Afin de mettre la lumière sur la poussée hydrostatique on utilise l'appareil d'essai sur la figure ci-dessous, il est possible de réaliser des essais typiques de l'étude de la pression hydrostatique dans des liquides au repos. Cet appareil permet de mesurer les forces de pression sur une surface plane pour différents niveau d'eau et angles d'inclinaison.



**Fig. II.1** : principales dimensions du récipient

Les axes des parois cylindriques de ce quart de cercle coïncident avec le centre de rotation du récipient, ainsi la pression du fluide agissant sur ces surfaces exerce un moment nul sur ce centre de poussée. Le moment mesuré correspond uniquement à la pression du liquide exercée sur la surface plane.

### II.1 La poussée hydrostatique :

La force élémentaire appliquée sur une surface  $dA = b \cdot dy$  est :

$$dF_p = p \cdot dA \quad (\text{II.1})$$

$F_p$  : La poussée hydrostatique en [N].

$b$  : La largeur du récipient.

A partir de la loi d'hydrostatique :

$$p = \rho \cdot g \cdot (y - h)$$

Et donc :

$$dF_p = \rho \cdot g \cdot (y - h) \cdot b \cdot dy \quad (\text{II.2})$$

Dans notre application, on étudie l'effet de la force hydrostatique appliqué sur la plaque plane. Cette force va changer en fonction de profondeur de la plaque ainsi qu'avec son surface. Donc il existe deux phases dans ce problème, lorsque la surface est émergée partiellement ( $h > R_1$ ) et lorsque la surface est émergée totalement ( $h \leq R_1$ ).

**a) Premier cas :  $h > R_1$**

La poussée hydrostatique est l'intégration de l'équation (II.2) entre les deux bornes  $R_2$  et  $h$  :

$$F_p^1 = \int_{R_2}^h \rho \cdot g \cdot (y - h) \cdot b \cdot dy$$

La solution de cette intégrale est :

$$F_p^1 = \rho \cdot g \cdot A^{emr} \cdot (h_G^{emr} - h) \quad (II.3)$$

Avec :

$A^{emr}$  : La surface émergée de la plaque plane est égale :

$$A^{emr} = b \cdot (R_2 - h) \quad (II.4)$$

$b$  : Largeur de réservoir ( $b = 75mm$ ) .

$R_2$  : Rayon extérieur ( $R_2 = 200mm$ ) .

$h_G^{emr}$  : La distance entre le pivot de rotation et le centre de gravité de la partie émergée de la plaque plane.

$$h_G^{emr} = \frac{R_2 + h}{2} \quad (II.5)$$

**b) Deuxième cas :  $h \leq R_1$**

La poussée hydrostatique est l'intégration de l'équation 1 entre les deux bornes  $R_2$  et  $R_1$  :

$$F_p = \int_{R_2}^{R_1} \rho \cdot g \cdot (y - h) \cdot b \cdot dy$$

La solution de cette intégrale est :

$$F_p = \rho \cdot g \cdot A^{emr} \cdot (h_G^{emr} - h) \quad (II.6)$$

Avec :

$$A^{emr} = A_p = a \cdot b = b \cdot (R_2 - R_1) \quad (II.7)$$

Et :

$$h_G^{emr} = AC = \frac{R_2 + R_1}{2} \quad (II.8)$$

$A_p$  : La surface de la plaque plane.

$AC$  : La distance entre le pivot de rotation et le centre de gravité de la plaque plane.

$R_1$  : Rayon intérieur ( $R_1 = 100mm$ ) .

**II.2 Point d'application théorique de la poussée**

L'état d'équilibre des moments donne l'équation suivante :

$$AG \cdot F_p = M_p$$

$AG$  : La distance entre le pivot de rotation et le point d'application de la poussée hydrostatique.

$M_p$  :le moment de la force de poussée hydrostatique.

$$dM_T = \rho. g. (y - h). y. b. dy \quad (\text{II.9})$$

Et donc :

$$M_T = \int \rho. g. (y - h). y. b. dy \quad (\text{II.10})$$

La solution de cette intégrale est :

$$M_T = \rho. g. A^{emr} \cdot \left( \frac{(A^{emr})^2}{12.b^2} + h_G^{emr} \cdot (h_G^{emr} - h) \right) \quad (\text{II.11})$$

Et donc le point d'application est :

$$AG_T = \frac{M_T}{F_p} \quad (\text{II.12})$$

Dans les deux cas :

$$AG_T = h_G^{emr} + \frac{I_G^{emr}}{A^{emr} \cdot (h_G^{emr} - h)} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$I_G^{emr}$  : Le moment d'inertie de la surface mouillée.

$$I_G^{emr} = \frac{(A^{emr})^3}{12.b^2} \quad (\text{II.14})$$

### 1. Point d'application expérimentale de la poussée :

En pratique, le moment réel de la force hydrostatique égale à :

$$M_R = AB. g. m$$

Et donc, le point d'application est calculé par :

$$AG_R = \frac{AB. g. m}{F_p}$$

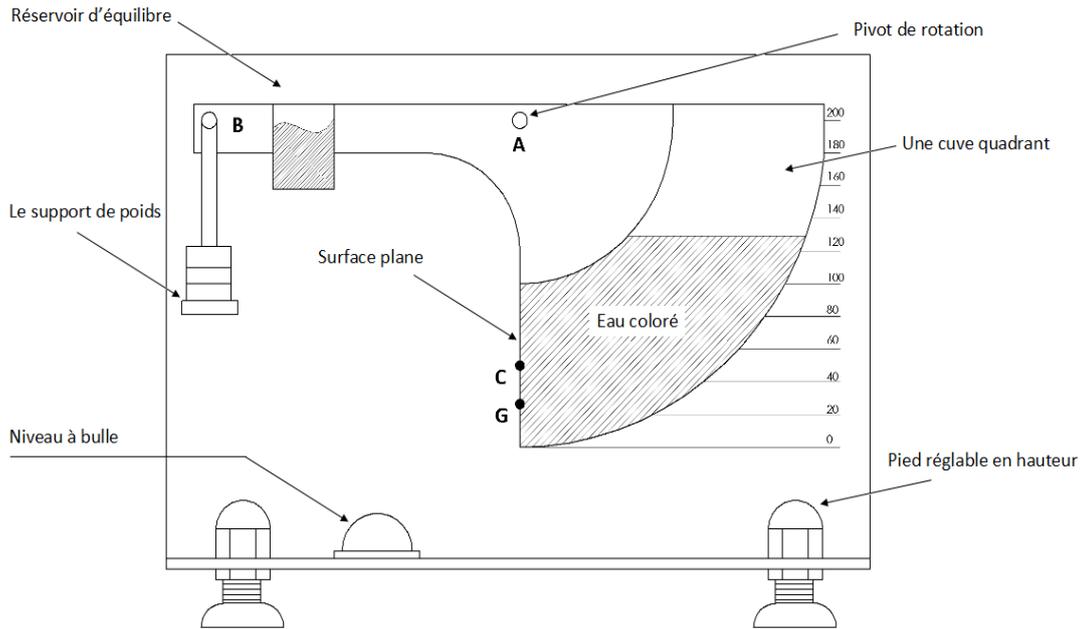
$$AG_R = \frac{AB.m}{\rho.A^{emr} \cdot (h_G^{emr} - h)} \quad (\text{II.15})$$

$m$  : La masse d'équilibre en [kg].

$AB$  : La distance entre le pivot de rotation et le support des points (Fig.II.2) égale à 203mm.

### III. Matériels utilisés

L'appareil d'essai est composé d'un réservoir d'eau transparent inclinable avec une échelle graduée pour la détermination du volume. Une seconde échelle graduée permet d'ajuster l'angle d'inclinaison du réservoir d'eau. À l'aide de différents poids, on fait la tare de l'appareil au moyen d'un bras de levier, puis on détermine la force d'équilibre.



**Fig. II.2:** Description de l'appareil.

#### IV. Protocole expérimental

1. Réglez l'appareil horizontalement à l'aide du niveau à bulle en utilisant les pieds de réglage.
2. Accrochez les deux crochets de poids (vide) au support et ajoutez de l'eau au réservoir d'équilibrage jusqu'à ce que le réservoir soit de niveau et que la surface plane immergée soit en conséquence verticale. La ligne horizontale derrière le réservoir devrait être alignée avec la ligne droite située à 0 mm sur le panneau arrière. Le crochet de poids à vide correspond à un poids d'équilibrage de 10 g. Vous n'avez pas besoin de noter le poids d'équilibrage ou la quantité d'eau dans le réservoir d'équilibrage, puisqu'ils servent simplement à équilibrer le réservoir à vide à 0 degré.
3. Accrochez le premier poids (connu) et versez votre eau colorée dans le réservoir à quadrant jusqu'à ce qu'il revienne à la position de 0 °. Notez le poids et la valeur de la hauteur d'eau ( $h$ ) par rapport à la position 0 mm
4. Ajoutez le poids en le mettant sur le crocher et ajoutez de l'eau pour équilibrer ce poids.
5. Notez ces quantités et la nouvelle valeur de  $h$  dans le tableau II.1 ci-dessous.
6. Répétez ceci jusqu'à ce qu'il ne reste plus de poids.
7. Enlevez les poids avec le crochet et vider l'appareil.

**Tableau II.1 :** résultats et exploitations

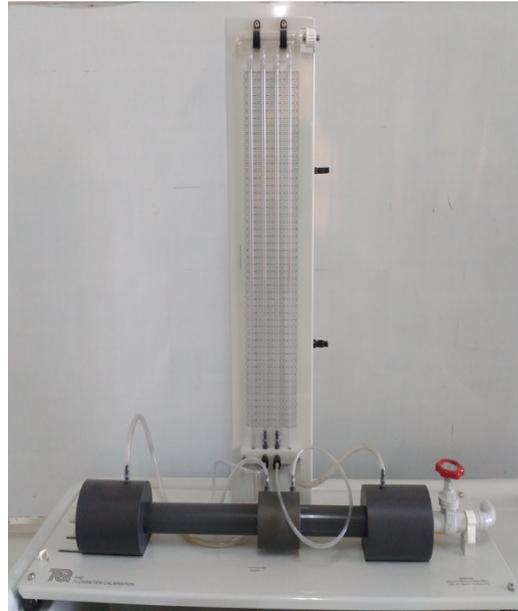
$m$ [g]	$h$ [mm]	$F_p$ [N]	$M_T$ [Nm]	$M_R$ [Nm]	$AG_T$ [mm]	$AG_R$ [mm]
20						
40						

60						
80						
100						
120						
140						
160						
180						
200						
220						
240						
260						
280						
300						
320						
340						
360						
380						
400						
420						
440						
460						
480						
500						

**V. Exploitation des résultats**

1. Remplissez le tableau des résultats expérimentaux.
2. Tracez la variation de niveaux d'eau en fonction de la valeur de masse d'équilibre.
3. Tracez la valeur du centre de poussé hydrostatique réel en fonction du point d'application théorique.
4. Interprétez les résultats.

### III.1 Les débitmètres dans les écoulements en charge (Le venturi & Le diaphragme)



#### III.1.1 But

Le but de cette manipulation est de mesurer le débit d'eau dans le cas d'un écoulement en charge en utilisant le venturi et le diaphragme

Le but Secondaire est de comprendre le principe et savoir concevoir un débitmètre à partir d'une singularité quelconque.

#### III.1.2 Théorie

Au fur et à mesure de son écoulement un fluide perd de son énergie (perte de charges linéaire ou singulière), On appelle singularité tout équipement installé sur une conduite et responsable d'une "variation de vitesse" et par conséquent une variation brusque de l'énergie qui se manifeste par une diminution de la pression totale avant et après la singularité.

Le venturiet le diaphragme représentent une réduction de la section suivie d'une augmentation du diamètre sur une courte distance, installés sur une canalisation et dans le cas d'un écoulement de fluide incompressible (eau), ils peuvent être utilisés pour mesurer le débit dans la conduite.

Le fluide circulant dans la conduite passe dans un convergent avant d'atteindre un col de section inférieure à celle de la conduite. La vitesse de l'écoulement augmente dans ce convergent. Cette augmentation de vitesse correspond par ailleurs à une diminution de pression.

En mesurant cette diminution de pression il est possible de déterminer la valeur du débit de l'écoulement. Toute singularité peut constituer un débitmètre à condition de l'étalonner et de trouver son coefficient de débit.

Pour la déduction des équations nécessaires au calcul de débit sur la base de la diminution de pression, on aura besoin de l'équation de Bernoulli pour les écoulements des fluides parfaits sous sa forme la plus simple, avec :

- ✓ Ecoulement Incompressible  $\text{div } \vec{V} = 0$
- ✓ Ecoulement stationnaire (indépendant du temps)
- ✓ Ecoulement irrotationnel  $\text{rot } \vec{V} = \vec{0}$

Donc le théorème de Bernoulli s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (\text{III.1.1})$$

En considérant en plus que le dispositif est horizontal ( $z = \text{cte}$ ), la relation de Bernoulli s'écrit:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{III.1.2})$$

Pour un écoulement dans une conduite de section  $S$  variable, en faisant l'hypothèse qu'il y a une répartition uniforme des vitesses dans chaque section droite, c'est-à-dire que les lignes de courant sont rectilignes et parallèles (ce qui n'est pas tout à fait le cas dans les zones convergentes et divergentes), la conservation de la masse s'écrit :

$$V_1 S_1 = V_2 S_2 = V_3 S_3 = \dots = V_N S_N$$

Où  $V_i$  sont les vitesses dans les différentes sections  $S_i$ .

la différence de pression ( $p_i - p_{(i+1)}$ ) est mesurée par la différence des hauteurs d'eau  $h_i$  et  $h_{(i+1)}$  lues dans les tubes  $i$  et  $(i+1)$  du manomètre différentiel. D'où la relation:

$$\frac{P_i}{\rho g} - \frac{P_{i+1}}{\rho g} = h_i - h_{i+1} \quad (\text{III.1.3})$$

Finalement, la combinaison de toutes les équations précédentes donne :

$$\begin{aligned} h_i - h_{i+1} &= \frac{V_{i+1}^2}{2g} - \frac{V_i^2}{2g} \\ h_i - h_{i+1} &= \frac{Q^2}{2g} \left( \frac{1}{S_{i+1}^2} - \frac{1}{S_i^2} \right) \\ h_i - h_{i+1} &= \frac{Q^2}{2g S_{i+1}^2} \left( 1 - \frac{S_{i+1}^2}{S_i^2} \right) \\ Q_{th} &= S_{i+1} \sqrt{\frac{2g(h_i - h_{i+1})}{\left(1 - \frac{S_{i+1}^2}{S_i^2}\right)}} \quad (\text{III.1.4}) \end{aligned}$$

En pratique, le fluide n'est pas parfait. C'est pourquoi les valeurs mesurées du débit sont légèrement inférieures à celles calculées par l'équation du  $Q_{th}$  une correction s'impose en utilisant le  $C_d$  qui est un coefficient sans dimension appelé souvent coefficient de débit ( $C_d < 1$ ), qui est fonction de la géométrie du tube et du nombre de Reynolds  $Re$  de l'écoulement, avec :

$$C_d = \frac{Q_{réel}}{Q_{th}} \quad (III.1.5)$$

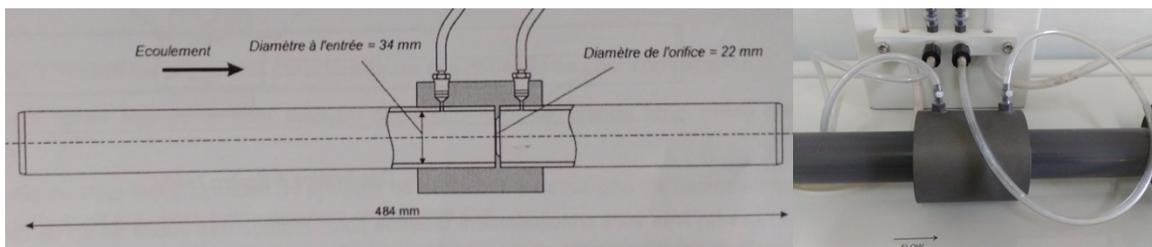
$C_d=0.958$  pour le venturi

$C_d=0.621$  pour le diaphragme

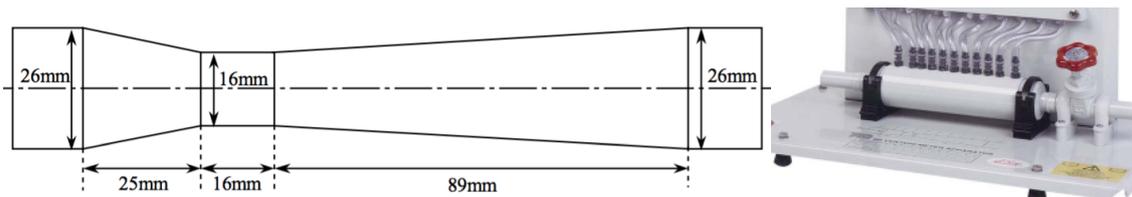
### III.1.3 Matériels utilisés

La manipulation est constituée principalement d'un venturi (convergent-divergent) et d'un diaphragme raccordés à un banc hydraulique qui assure l'alimentation en eau à l'aide d'une pompe.

La meilleure façon c'est de monter en série le venturi et le diaphragme et de mesurer le débit qui traverse les deux instruments en même temps (cela permettra de faire la comparaison).



**Fig.III.1.1** : Le dispositif expérimental utilisé détail techniques du diaphragme



**Fig.III.1.2** :Le dispositif expérimental utilisé détail techniques du venturi

## V. Protocole expérimental

1. Tout d'abord, il faut vérifier l'horizontalité des appareils (le venturi et le diaphragme)
2. Vérifier que le bac d'alimentation est rempli
3. Vérifier que le banc d'essais est branché à l'électricité
4. Mettre en marche la pompe d'alimentation
5. Procéder à la purge du multimanomètre. (Voir le paragraphe II)
6. Régler le débit en fixant la vanne du contrôle à cinq valeurs,
7. Pour chaque valeur de débit, Notez sur les tableaux ci-dessous (tableau de venturi et tableau du diaphragme III.1.1 et III.1.2) le volume d'eau recueilli par unité de temps.
8. Relever l'ensemble des hauteurs manométriques pour les différentes prises de pression ( $h_{amont}$  et  $h_{aval}$ ).

## VI. Exploitation des résultats

Pour le venturi  $h_{\text{amont}}=h_1$  et  $h_{\text{aval}}=h_4$

$$Q_{th} = S_4 \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_4)}{\left(1 - \frac{S_4^2}{S_1^2}\right)}}$$

**Tableau III.1.1 : Les résultats du Venturi**

N° d'essai	Mesure du débit		Le venturi		Q <sub>th</sub> équation	C <sub>d</sub> *Q <sub>th</sub>	Q <sub>réel</sub> =volume/temps
	Volume (m <sup>3</sup> )	Temps (s)	H amont	H aval			
1							
2							
3							
4							
5							

Pour le diaphragme :  $h_{\text{amont}}=h_1$  et  $h_{\text{aval}}=h_2$

$$Q_{th} = S_2 \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{\left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}\right)}}$$

**Tableau III.1.2 : Les résultats du diaphragme**

N° d'essai	Mesure du débit		Le diaphragme		Q <sub>th</sub> équation	C <sub>d</sub> *Q <sub>th</sub>	Q <sub>réel</sub> =volume/temps
	Volume(m <sup>3</sup> )	Temps (s)	H amont	H aval			
1							
2							
3							
4							
5							

1. Calculez le débit théorique Q<sub>th</sub> dans le circuit hydraulique à l'aide de la formule précédente et calculez le débit réel en divisant le volume recueilli sur le temps.
2. Tracez la courbe Q<sub>réel</sub> en fonction de C<sub>d</sub>Q<sub>th</sub> pour le venturi et le diaphragme
3. Commentez les résultats à partir des tableaux et des courbes.
4. Finalement, selon vous dans un cas d'absence de débitmètre dans notre laboratoire, comment peut-on concevoir un ?

## III.2 Vérification de l'équation de Bernoulli



### I. But

Le but de cette manipulation est de vérifier expérimentalement le théorème de Bernoulli.

Le but secondaire est de montrer quelques applications du théorème de Bernoulli à savoir la détermination de la vitesse ou la pression.

### II. Théorie

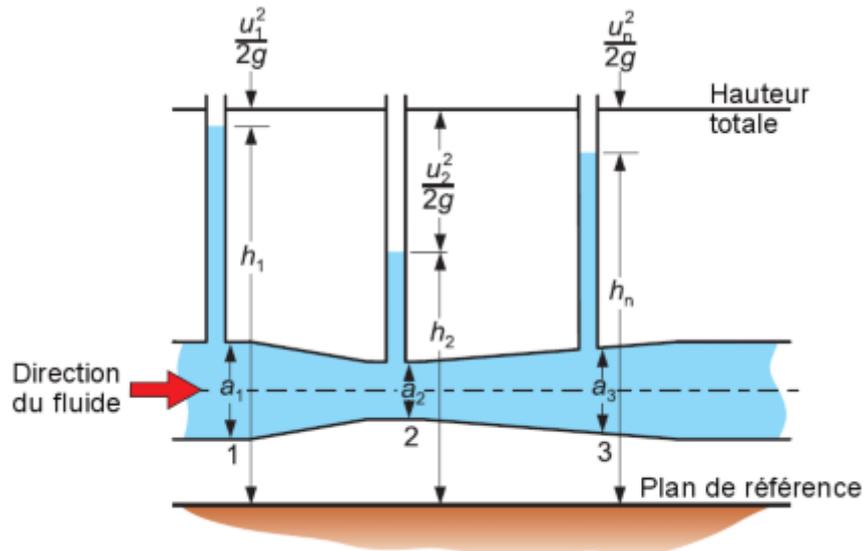
Comme pour la masse, la loi de conservation de l'énergie exprime le principe que l'énergie ne peut être ni créée ni anéantie. Elle ne peut qu'être transformée d'une forme à une autre.

Le théorème de Bernoulli exprime la conservation d'énergie dans un écoulement permanent, unidimensionnel, incompressible.

Giovanni Venturi a déterminé que la pression d'un liquide mobile chute lorsqu'il passe au travers d'un conduit comprenant un rétrécissement. A peu près à la même époque, le mathématicien Daniel Bernoulli a effectué des études en dynamique des fluides conduisant au

principe de Bernoulli. Ce principe établit qu'un changement de la vitesse du fluide est directement lié à un changement de sa pression (ou de son énergie potentielle).

Le théorème de Daniel Bernoulli énonce que l'énergie mécanique totale d'un fluide en écoulement demeure constante en l'absence des pertes d'énergie par frottement. En d'autres termes, ceci peut être littéralement formulé d'une manière analytique comme suit



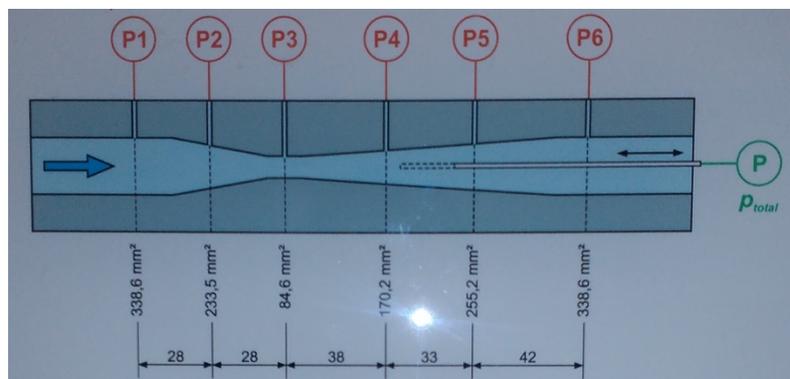
**Fig.III.2.1** : l'équation de Bernoulli

Dans le cas d'un fluide parfait, cette équation s'écrit entre deux sections quelconques d'une ligne de courant sous la forme suivante :

$$P_{totale} = \frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_i}{\rho g} + Z_i + \frac{V_i^2}{2g} \quad \text{avec } i = 1, \dots, 6$$

Dans la présente expérimentation on a :

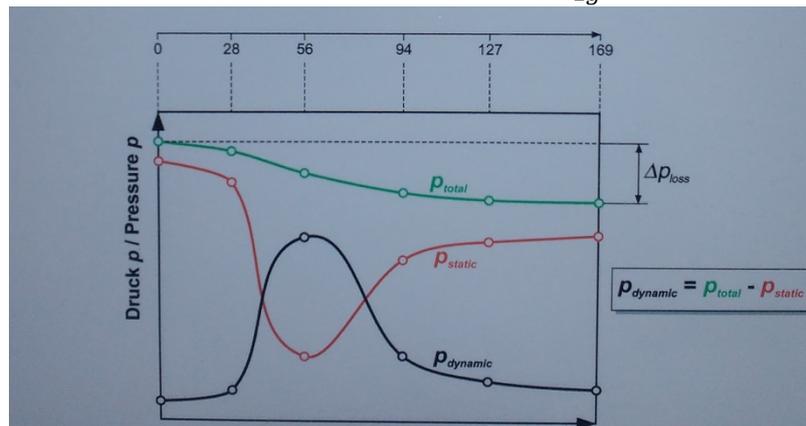
$$P_{stat} = \frac{P_i}{\rho g} = \frac{P_{air}}{\rho g} + Z_i \quad \text{pour } i = 1, \dots, 6$$



**Fig.III.2.2** détails techniques du venturi (sections, pression statique et pression totale)

En substituant l'équation III.2.1ci-dessus dans l'équation fondamentale de Bernoulli et prenant la référence horizontale au niveau de l'axe de la conduite :

$$P_{totale} = P_{stat} + P_{dyn} \quad \text{avec} \quad P_{dyn} = \frac{v_i^2}{2g} \quad (\text{III.2.1})$$



**Fig.III.2.3** : Variation de différentes pressions le long d'un tube Venturi

### III. Matériels utilisés

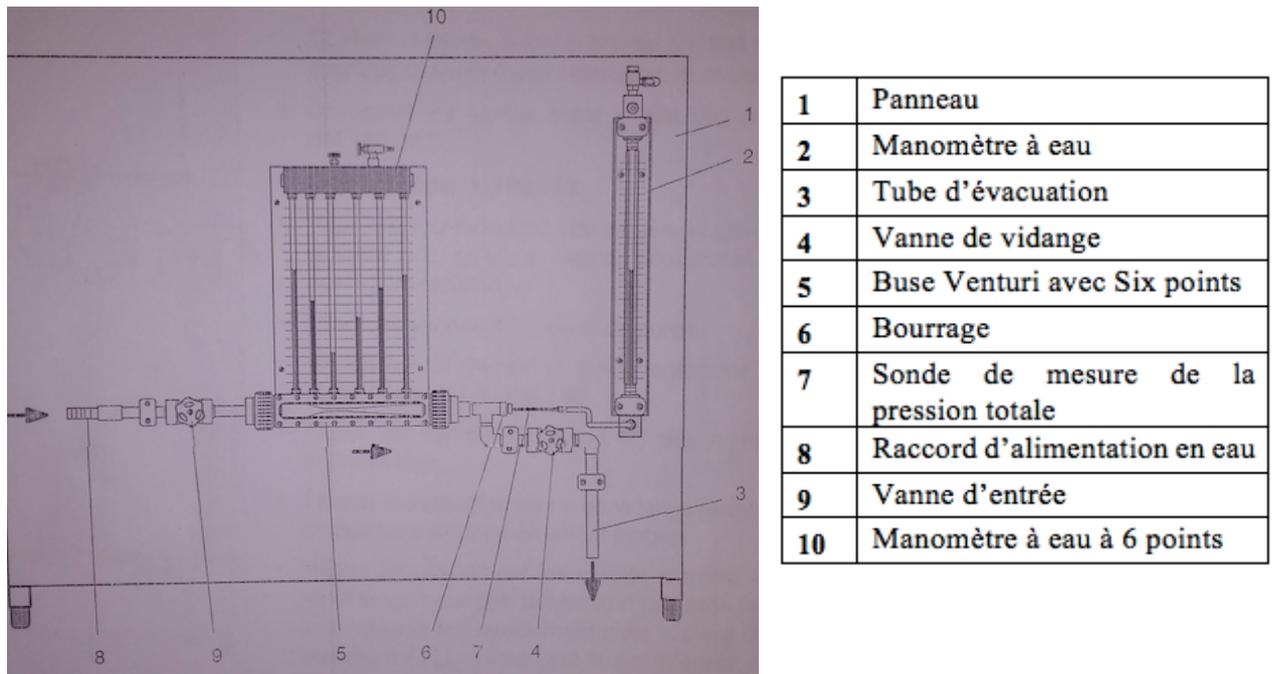
Dans le banc d'étude d'un Venturi, l'eau en provenance du banc d'alimentation hydraulique entre dans le Venturi à l'aide d'un tuyau et après la vanne de réglage située en aval du Venturi, un autre tuyau retourne au réservoir de mesure du volume du banc d'alimentation avant de rejoindre le réservoir principal.



**Fig.III.2.4** : matériels utilisés (Venturi) pour la vérification de l'équation de Bernoulli

En plusieurs points le long des différentes sections (convergente et divergente) du Venturi fabriquée avec un matériau très lisse (pertes dues aux frottements sont négligeable), des prises de pressions placées sur le haut du tube de Venturi, sont connectés à des tubes manométriques fixés sur un panneau vertical millimétré.

Les extrémités supérieures des tubes manométriques sont connectées à un manifold commun dont la quantité d'air peut être contrôlée par une petite vanne d'air placée sur un côté, le panneau millimétré et du manifold est fixé sur une base montée sur pieds réglables.



1	Panneau
2	Manomètre à eau
3	Tube d'évacuation
4	Vanne de vidange
5	Buse Venturi avec Six points
6	Bourrage
7	Sonde de mesure de la pression totale
8	Raccord d'alimentation en eau
9	Vanne d'entrée
10	Manomètre à eau à 6 points

**Fig.III.2.5** : Description du matériel expérimental

Habituellement, sur les systèmes classiques de Venturi, les prises de pression sont situées uniquement à l'entrée et au niveau du col, ces deux mesures suffisant à mesurer la perte de charge. Les prises supplémentaires sur cet équipement ont pour but de montrer la distribution de la pression le long des sections convergente et divergente.

#### IV. Protocol expérimental

1. Ajustez l'appareil dans le plan horizontal sur le banc hydraulique ;
2. Branchez l'appareil à l'alimentation et remplissez d'eau les manomètres de telle sorte à chasser toutes les bulles d'air ;
3. Fermez le robinet d'alimentation et ouvrez le robinet de réglage et faites descendre le niveau d'eau dans les manomètres.
4. Réglez l'écrou raccord de la sonde Pitot pour qu'elle puisse se déplacer avec une légère résistance.
5. Réglez simultanément les vannes d'entrée et de vidange pour que le niveau d'eau dans les manomètres soit exactement dans la plage de mesure
6. Relevez les pressions à tous les points de mesure, puis amenez la sonde de mesure de la pression totale dans zone de mesure correspondante et notez la pression totale
7. Enregistrer le débit et porter les valeurs dans le tableau III.2.1 ci-dessus.
8. Reprenez le point (5, 6 et 7) pour différents débits en manipulant le robinet de réglage.

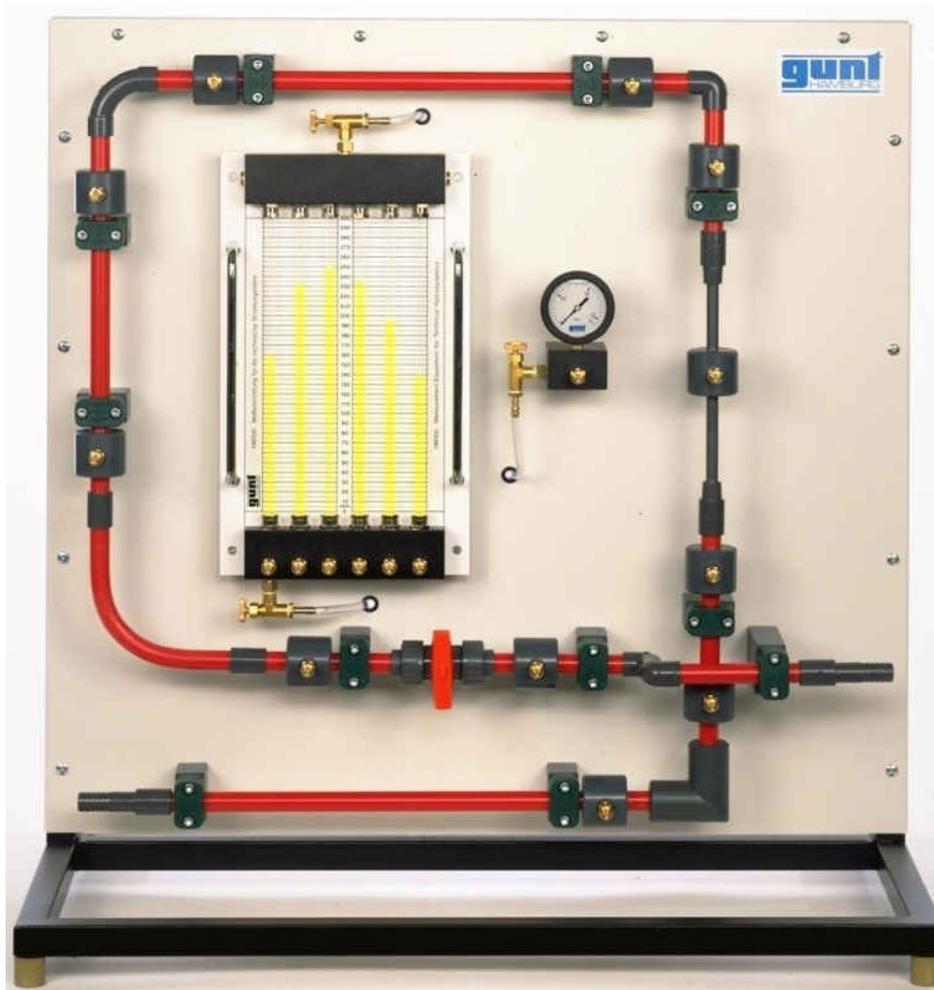
## V. Exploitation des résultats

Tableau III.2.1. Résultats expérimentaux.

Débits Q(m <sup>3</sup> /s)	Section	La section (mm <sup>3</sup> )	Pression statique ( m m )	Pression totale ( m m )	L e C a l c u l		
					V <sub>réel</sub> (m/s)	$\frac{v^2}{2g}$ (m)	P <sub>stat</sub> +P <sub>Dyn</sub>
	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						
	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						
	1						
	2						
	3						
	4						
	5						
	6						

1. Pour chaque débit déterminer la vitesse d'écoulement à chaque section et estimer la pression dynamique (diminuée de  $(P_{air}/\rho_{air} g)$  à partir de l'équation de Bernoulli).
2. Comparez la pression totale et la somme de la pression statique et celle dynamique pour chaque section ?
3. Discutez la validité de l'équation de Bernoulli pour :
  - a. Le convergent
  - b. Le divergent
4. Représentez graphiquement les variations des différentes pressions en fonction des emplacements des manomètres.
5. Expliquez les différences entre la pression totale et la somme de la pression statique et celle dynamique.

### III.3 Pertes de charge singulières



#### I. But

Le but de cette manipulation est de mesurer expérimentalement la perte de charge singulière de différents éléments hydrauliques et de comparer les résultats avec ceux estimés théoriquement.

#### II. Théorie

L'écoulement d'un fluide dans les conduits hydraulique d'une installation de pompage est lié à des pertes de pression dues tant aux frottements du fluide sur les parois et les frottements internes (pertes de charge linéaires) qu'aux changements de direction et de section (coudes, rétrécissement, élargissement, ...) connus par les pertes de charge singulières.

Les singularités hydrauliques sont présentes dans tous les réseaux. Il peut s'agir de coudes, clapets, vannes, entrée ou sortie d'un réservoir ... toutes ces singularités sont responsables d'une dissipation d'énergie par turbulence qui affecte l'écoulement. Dans beaucoup de situations, les pertes de charge singulières peuvent être négligées par rapport aux pertes de charge linéaires par frottement. Dans d'autres situations, les pertes de charge

singulières deviennent très importantes, voire même prépondérantes par rapport aux pertes de charge linéaires et ne peuvent plus être négligées.

D'une manière générale, les pertes de charges singulières peuvent être estimées à l'aide de la formule suivante :

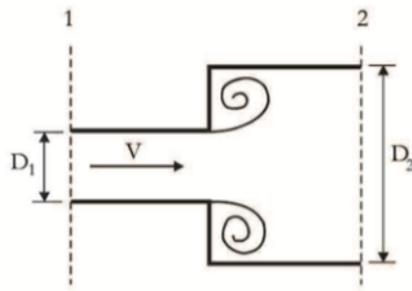
$$\Delta h_s = \xi \frac{V^2}{2g} \quad (\text{III.3})$$

$\Delta h_s$  : Perte de charge singulière [m].

$\xi$  : Coefficient de perte de charge singulière de l'élément considéré.

$V$  : vitesse moyenne de fluide [m/s].

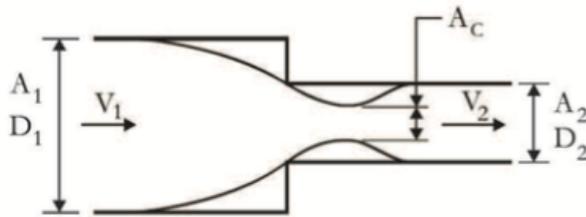
### A. Élargissement brusque



$$\xi_{\text{Elarg}} = \left(1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2\right)^2$$

$$\Delta h_s = \xi \frac{V_1^2}{2g}$$

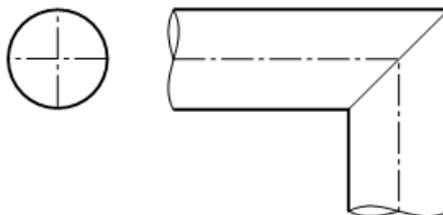
### B. Rétrécissement brusque



**Tableau III.3.1:** valeur de coefficient de perte de charge singulière pour un étranglement brusque

$(D_2/D_1)^2$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\xi$	0,37	0,35	0,32	0,27	0,22	0,17	0 ; 1	0,06	0,02	0

### C. Raccord angulaire (coude à angle vif)



$$\xi_{\text{CV}} = 1.1$$

## D. Accord coudé

Coude à 90°

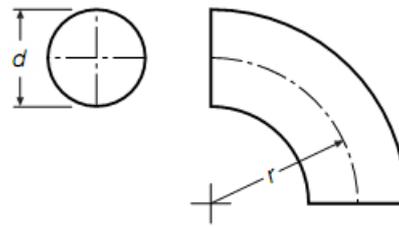
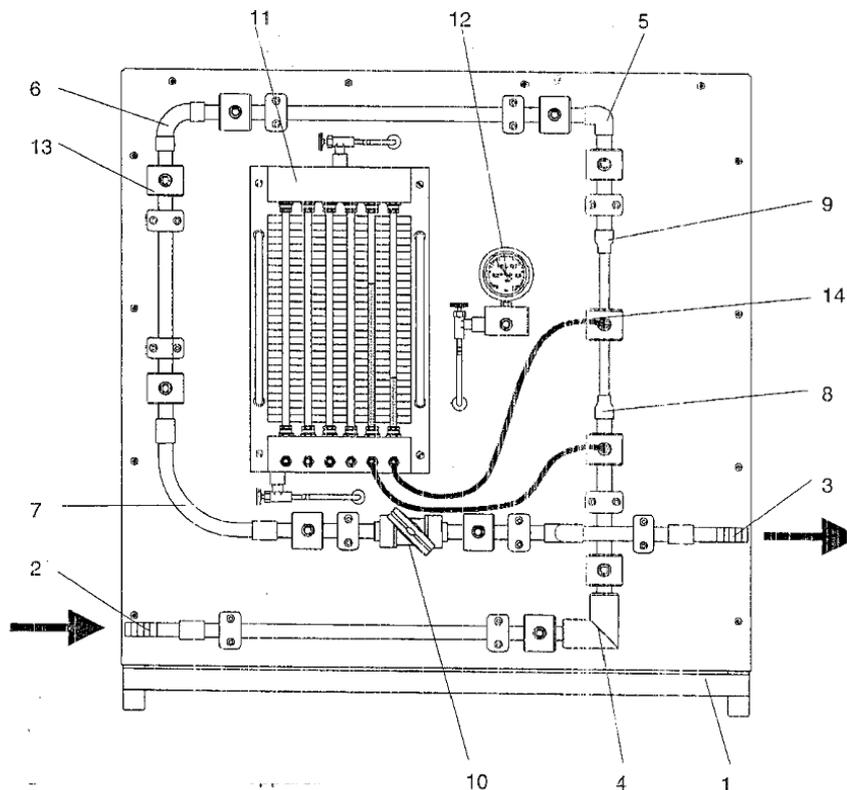


Tableau III.3.2 : valeur de coefficient de perte de charge singulière pour l'accord coudé

r/D	0,5	0,75	1	1,5	2	4	10	20
$\xi$	0,9	0,45	0,35	0,25	0,2	0,16	0,32	0,42

## III. Matériels utilisés

L'appareil se compose des éléments suivants :



- |  |  |
|--|--|
| 1 Bâti de base avec paroi arrière            | 8 Rétrécissement                                   |
| 2 Raccordement pour flexible d'entrée d'eau  | 9 Elargissement                                    |
| 3 Raccordement pour flexible de sortie d'eau | 10 Robinet à boule                                 |
| 4 Raccord angulaire                          | 11 Manomètre à 6 tubes                             |
| 5 Raccord coudé                              | 12 Manomètre à tube-ressort                        |
| 6 Coude petit rayon                          | 13 Chambre toroïdale avec tubulure de mesure       |
| 7 Coude grand rayon                          | 14 Tuyau flexible PVC avec accouplement enfichable |

Fig III.3.1 : Schéma d'installation

Les descriptions des singularités réparties sur le banc d'essai se présentent comme suit :

Rétrécissement	$d_{in} = 17 \text{ mm}$	$d_{out} = 9,6 \text{ mm}$
Elargissement	$d_{in} = 9,6 \text{ mm}$	$d_{out} = 17 \text{ mm}$
Raccord angulaire	$d = 17 \text{ mm}$	
Raccord coudé	$d = 17 \text{ mm}$	
Coude petit rayon	$d = 17 \text{ mm}$	$R = 40 \text{ mm}$
Coude grand rayon	$d = 17 \text{ mm}$	$R = 100 \text{ mm}$

#### IV. Protocol expérimental

1. Mettre l'appareil à l'horizontale sur le bac hydraulique et branchez-le à ce dernier.
2. Ouvrir l'écoulement du bac hydraulique
3. Raccorder le manomètre aux raccords à mesurer à l'aide de tuyaux flexibles de raccordement.
4. Ouvrir la soupape de purge et purger le tronçon de tuyauterie et les flexibles de raccordement par une circulation d'eau.
5. Fermer la vanne principale du bac hydraulique
6. Mettre la pompe du bac hydraulique en service.
7. Déterminer le débit volumique. Pour cela, arrêter le temps  $t$  nécessaire pour remplir le réservoir volumétrique du bac hydraulique de 10 litres
8. Les flexibles permettront de prélever la pression avant et après les singularités, pour chaque débit, prélevez la pression avant et après toutes les singularités de la manipulation.
9. Mettre la pompe hors service, ouvrir l'écoulement.

#### VI. Exploitation des résultats

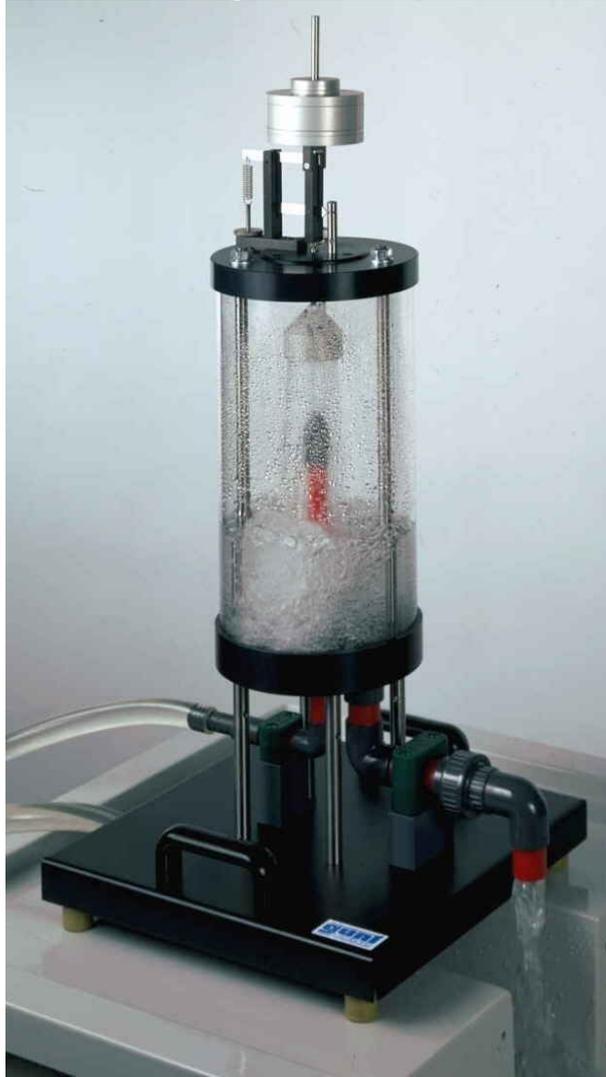
L'objectif principal est de comparer les valeurs de la perte de charge singulière, obtenues théoriquement avec ceux obtenues expérimentalement. Le coefficient de perte de charge singulière «  $\xi$  » peut-être déterminer en utilisant les formules citées dans la partie théorique.

**Tableau III.3.3. Résultats expérimentaux**

Composant	N°	Débit [m <sup>3</sup> /s]	La vitesse[m <sup>3</sup> /s]	$\Delta h_{\text{exp}}$ (m)	$\xi$ (theo)	$\Delta h_{\text{theo}}$ (m)
Raccord angulaire	1					
	2					
	3					
Raccord coudé	1					
	2					
	3					
Coude petit rayon	1					
	2					
	3					
Coude grand rayon	1					
	2					
	3					
Rétrécissement	1					
	2					
	3					
Elargissement	1					
	2					
	3					

- 1- Compléter le tableau III.3.3 ci-dessus
- 2- Pour chaque élément, tracer la perte de charge théorique et la perte de charge mesurée en fonction du débit Q.
- 3- Commenter vos résultats.

### III.4 Action d'un jet d'eau sur des obstacles



#### I. But

Le but de cette manipulation est de Mesurer expérimentalement l'impact d'un jet d'eau sur trois obstacles différents et comparer les résultats avec ceux estimés théoriquement.

Le but secondaire est de comprendre le principe et connaître les autres applications du jet d'eau (Principe de fonctionnement de la turbine hydraulique de Pelton, décoratif ou industriel : découpage de l'acier).

#### II. Théorie

L'impact du jet d'eau se calcule à partir du théorème de quantité de mouvement.

$$\int_{dV} \frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} \cdot dV + \int_{dS} \vec{V} \cdot \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \cdot dS = \vec{F}_{ext}$$

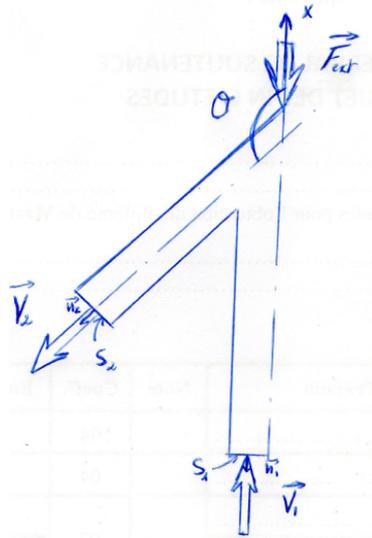
Le régime est permanent :

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} = 0$$

Donc :

$$\int_{ds} \vec{V} \cdot \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \cdot dS = \vec{F}_{ext}$$

Le jet d'eau est considéré comme un problème axisymétrique donc on peut l'étudier sur un demi-plan :



Si on considère la figure ci-dessus comme un volume de contrôle, on peut changer l'intégrale à une sommation entre l'entrée et la sortie :

$$\sum \vec{V} \cdot \rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} \cdot dS = \vec{F}_{ext}$$

Et donc :

$$\vec{V}_1 \cdot \rho \cdot \vec{V}_1 \cdot \vec{n}_1 \cdot S_1 + \vec{V}_2 \cdot \rho \cdot \vec{V}_2 \cdot \vec{n}_2 \cdot S_2 = \vec{F}_{ext}$$

On a aussi :

$$\vec{V}_1 \cdot \vec{n}_1 = -V_1 = \frac{q_v}{S_1}$$

Et :

$$\vec{V}_2 \cdot \vec{n}_2 = \|V_2\| = \frac{q_v}{S_2}$$

Et donc :

$$\rho \cdot q_v \cdot (\vec{V}_2 - \vec{V}_1) = \vec{F}_{ext}$$

Par projection sur le plan x, on trouve :

$$\rho \cdot q_v \cdot (V_2 \cdot \cos(\theta) - V_1) = F_x$$

On suppose que  $S_1 = S_2$ , alors :

$$V_1 = V_2 = V$$

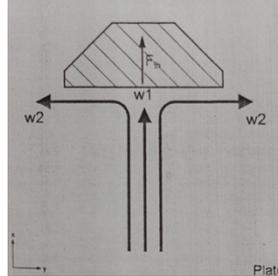
La force exercée sur l'obstacle, est égale et opposée à cette force et l'équation devient :

$$F_{th} = \rho \cdot Q \cdot V \cdot (1 - \cos(\theta))$$

Et :

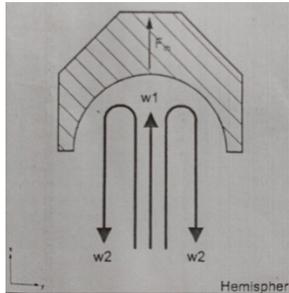
$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{Donc} \quad F_x = \rho \cdot \frac{Q^2}{A} \cdot (1 - \cos(\theta)) \quad (\text{III.4.1})$$

**a. Surface plane : 90°**



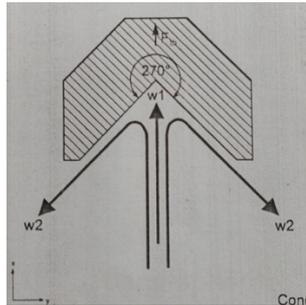
$$F_x = \rho \cdot \frac{Q^2}{A} = F_{th} (\text{III.4.2})$$

**b. Surface semi-arrondie : 180°**



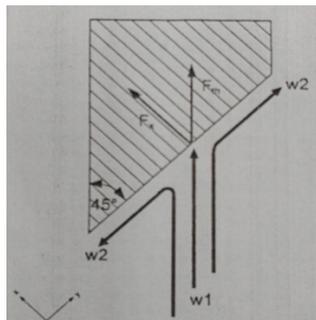
$$F_x = 2 \cdot \rho \cdot \frac{Q^2}{A} = F_{th} (\text{III.4.3})$$

**c. Surface conique : 135°**



$$F_x = 1,7071 \cdot \rho \cdot \frac{Q^2}{A} (\text{III.4.4})$$

**d. Surface oblique : 135°**



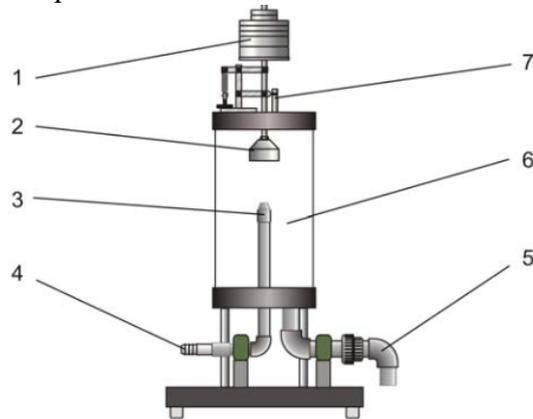
$$F_x = 0,7071 \cdot \rho \cdot \frac{Q^2}{A}$$

$$F_{th} = F_x \cdot \cos\theta$$

$$F_{th} = 0,5 \cdot \rho \cdot \frac{Q^2}{A} \text{ (III.4.5)}$$

### III. Matériels utilisés

Le banc d'essai est composé des éléments suivants :



- |                |                         |                 |                       |
|----------------|-------------------------|-----------------|-----------------------|
| (1) Poids      | (3) Buse                | (5) Drain d'eau | (7) Système de levier |
| (2) Déflecteur | (4) Alimentation en eau | (6) Réservoir   |                       |

**Fig.III.4.1** : Schéma d'installation

Différents obstacles peuvent être montés sur la position (2).

#### Buse

- b. Diamètre :  $A = 10 \text{ mm}$

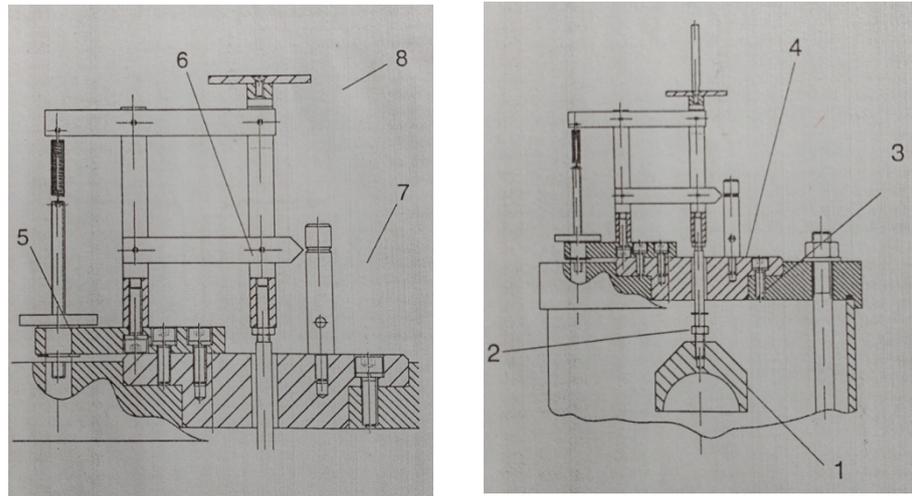
#### Déflecteur

- e. Surface plane
- f. Surface semi-arrondie
- g. Surface conique
- h. Surface oblique

### IV. Protocol expérimental

Afin de garantir le bon déroulement des expériences, des étapes sont à suivre, à savoir :

1. Mettez l'appareil à l'horizontale sur le banc hydraulique et branchez-le à ce dernier.
2. Démarrez les pompes d'alimentation du banc hydraulique
3. Montez l'obstacle (1), avec le vis de réglage (5), positionner l'aiguille (6) sur zéro pour qu'elle pointe vers l'encoche zéro (7). Ne pas poser de poids sur le système de mesure (8).



**Fig. III.4.2** Montage des obstacles

4. Posez maintenant le poids souhaité (8)
5. Fermez la vanne principale du banc hydraulique
6. Mettez la pompe du bac hydraulique en service
7. Ouvrir avec précaution la vanne principale du banc hydraulique et augmenter l'impact du jet via le débit jusqu'à ce que l'aiguille (6) indique de nouveau zéro.
8. Fermez la vanne principale du bac hydraulique
9. Déterminez le débit volumique. Pour cela, comptez le temps  $t$  nécessaire pour remplir le réservoir volumétrique du bac hydraulique de 10 litre.
10. Additionnez les poids et noter le temps  $t$  pour chaque 10 litre.
11. Mettez la pompe hors service, ouvrir l'écoulement.
12. Reprenez 3 à 11 en changeant l'obstacle.

### V. Exploitation des résultats

**Tableau III.4.1** Résultats expérimentaux

Obstacle	N°	Force (N)	Volume (l)	Temps (s)	Débit (l/s)	Force calculée $F_{th}$ (N)	Force mesurée (N)
Plane	1	0.2	10				
	2	0.3					
	3	1					
	4	2					
	5	5					
Oblique	1	0.2	10				
	2	0.3					
	3	1					
	4	2					
	5	5					
Demi-sphère	1	0.2	10				

	2	0.3					
	3	1					
	4	2					
	5	5					
Cône	1	0.2	10				
	2	0.3					
	3	1					
	4	2					
	5	5					

- 1- Compléter le tableau III.4.1 ci-dessus.
- 2- Pour chaque obstacle, tracer la Force calculée théorique et la force mesurée en fonction du débit  $Q$
3. Commenter vos résultats.

### III.5 L'écoulement à travers un Orifice



#### I. But

Le but de cette manipulation est de calculer du coefficient du débit et celui de la vitesse.

Le but secondaire est de comprendre les principales caractéristiques de l'écoulement à travers un orifice, principalement la différence entre le débit réel et le débit théorique a cause de la contraction des lignes de courant

#### II. Théorie

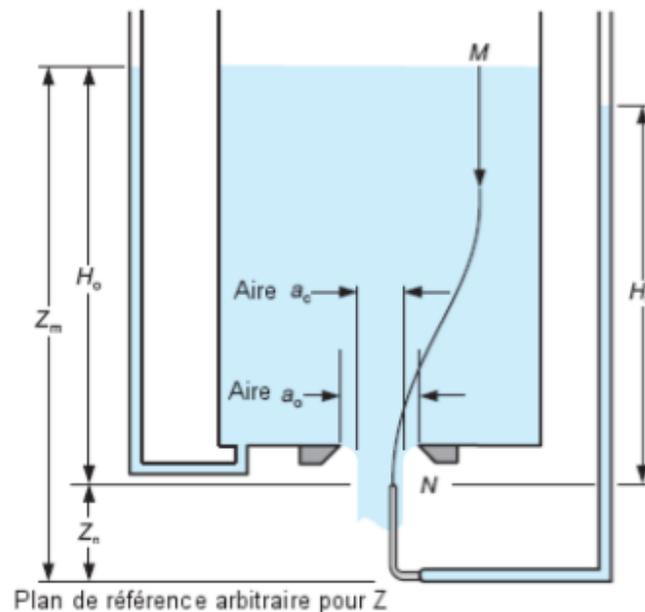
Lorsqu'un fluide passe à travers un étranglement, comme un orifice à mince paroi ou un déversoir, le débit est souvent considérablement inférieur à celui calculé en faisant les hypothèses de la conservation d'énergie et que l'écoulement à travers l'orifice est uniforme et parallèle.

Cette diminution du débit est normalement due à la contraction du courant qui a lieu dans l'étranglement, et qui se poursuit sur une certaine longueur en aval de ce dernier, plutôt qu'à une importante perte de charge.

Avec cet équipement, il est possible de réaliser la mesure de la réduction du débit, de la contraction de l'écoulement et de la perte de charge dans le cadre de l'eau contenu dans un

réservoir et qui s'écoule à travers un orifice à mince paroi.

Le réservoir est considéré comme assez large pour que la vitesse du fluide  $y$  soit suffisamment faible pour être négligée sauf au niveau de l'orifice. A proximité de l'orifice, le fluide accélère en direction du centre d'orifice de telle façon que lorsque le jet émerge, il subit une contraction due à la courbure des lignes de courant, comme représentée par la ligne de courant MN sur le schéma. Cette contraction est due à la variation brusque de la pression (de la pression du fond du réservoir vers la pression atmosphérique) est la plus importante à une distance de l'ouverture environ égale à la moitié du diamètre de l'orifice. Cette réduction de section est habituellement nommée section contractée.



**Fig.III.5.1** : Principe de calcul de l'orifice

En supposant qu'il y a conservation de l'énergie et qu'il n'y a pas de perte de charge :

$$\frac{u_m^2}{2g} + \frac{P_m}{w} + z_m = \frac{u_n^2}{2g} + \frac{P_n}{w} + z_n \quad (\text{III.5.1})$$

Dans cette équation,  $P_m$  et  $P_n$  sont égales à la pression atmosphérique et  $u_m$  est négligeable selon nos suppositions précédentes.

$$\frac{u_n^2}{2g} = H_0 \quad (\text{III.5.2})$$

En tenant compte de la perte de charge créée par l'orifice, la vitesse réelle  $u_c$  au sein de la section contractée est inférieure à  $u_0$  et peut être calculée à partir de la mesure de la sonde Pitot

$$\frac{u_c^2}{2g} = H_c \quad (\text{III.5.3})$$

Le rapport entre la vitesse réelle  $u_c$  et la vitesse idéale  $u_0$  est généralement défini comme le coefficient de vitesse  $C_u$  de l'orifice

$$C_u = \frac{u_c}{u_0} = \sqrt{\frac{H_c}{H_0}} \quad (\text{III.5.4})$$

Enfin, le coefficient de débit  $C_d$  est défini comme le rapport du débit réel sur celui

correspondant à la vitesse idéale  $u_0$  sans contraction de la section.

$$C_d = \frac{Q}{a_0 \sqrt{2gH_0}} \quad (\text{III.5.5})$$

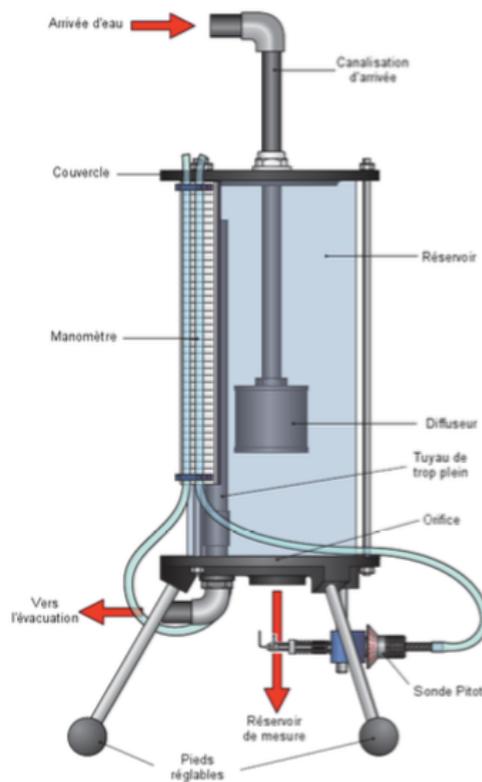
De même, le coefficient de contraction de la section  $C_c$  est défini comme

$$C_c = C_d / C_u \quad (\text{III.5.6})$$

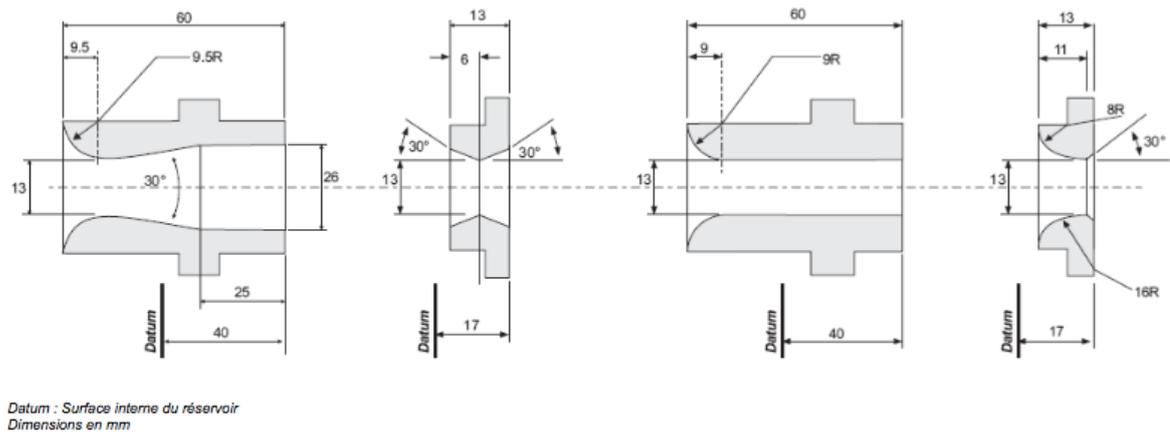
### III. Matériels utilisés

Le réservoir est alimenté à partir du banc hydraulique équipé d'une vanne de réglable du débit et d'un tuyau vertical placé sur le réservoir, réglable en hauteur et terminé par un diffuseur juste en dessous de la surface. Un tuyau de surverse permet d'évacuer le trop plein d'eau. L'eau s'évacue normalement par le fond du réservoir en traversant un orifice à mince paroi encastré.

Le jet sortant passe sur un tube Pitot monté sur un système de déplacement puis retourne au bac de mesure du banc hydraulique.



**Fig.III.5.2** : Le matériel utilisé pour étudier l'écoulement à travers un orifice



**Fig.III.5.3 : Jeu de quatre orifices différents**

#### IV. Protocol expérimental

L'expérience comprend deux parties.: dans un premier temps, la mesure de  $C_d$ ,  $C_u$  et  $C_c$  pour une valeur constante de  $H_0$ , et, dans un deuxième temps, la mesure du débit pour plusieurs hauteurs  $H_0$ .

Le système est placé sur le banc hydraulique et mis de niveau, le fond inférieur étant positionné à l'horizontal. Le tuyau flexible d'alimentation, provenant de la vanne de réglage du banc hydraulique, est relié au tube d'entrée du système. L'appareil est positionné de telle façon qu'il se vidange directement dans le réservoir de mesure du débit et que le tuyau de surverse est dirigé vers le couvercle du Banc. Pour obtenir des mesures régulières, régler le tuyau vertical d'alimentation de façon à ce qu'il soit juste sous la surface. Mesurer le diamètre de l'orifice à paroi mince.

Dans la première partie de l'expérience, le réservoir est rempli jusqu'à hauteur du trop-plein puis la vanne de réglage du débit est ajustée afin de n'avoir plus qu'un léger filet régulier s'écoulant dans le tuyau de trop-plein. Cela permet de garder une hauteur constante dans le réservoir durant les mesures.

Pour mesurer  $C_d$ , le débit est obtenu en mesurant le volume d'eau s'écoulant par l'orifice dans le réservoir de mesure du banc hydraulique et la hauteur  $H_0$ .

Pour mesurer  $C_u$ , la sonde Pitot est positionnée sous le jet et la valeur de la charge de l'écoulement  $H_c$  est relevée ainsi que la charge totale  $H_0$ .

Pour mesurer  $C_c$ , le diamètre de la section contractée doit être mesuré. Pour cela, il faut utiliser la lame de 3 mm attachée perpendiculairement à la tête de la sonde Pitot. La lame est déplacée afin de tangenter chaque côté du jet et ses positions sont notées à l'aide de la vis micrométrique. La différence entre ces valeurs donne le diamètre de la section contractée.

Dans la seconde partie de l'expérience, le débit d'alimentation est réduit par palier afin

de mesurer le débit correspondant à chaque hauteur. Il est nécessaire d'attendre que le niveau soit stabilisé avant de relever la hauteur et le débit correspondant. Il est également conseillé de relever plusieurs fois ces valeurs pendant que le réservoir de mesure du débit se remplit, afin de les moyenner.

En termes d'étapes, on peut traduire ce protocole comme suit :

1. Placez l'appareil sur le banc hydraulique.
2. Connectez un tuyau souple entre la sortie de la vanne d'alimentation du banc hydraulique et le tuyau d'entrée en haut de l'appareil.
3. Ajustez le niveau de l'appareil à l'aide des pieds.
4. Vérifiez que de l'air n'est pas entraîné dans la sonde de Pitot.
5. Partie 1 : la vanne de réglage du débit est ajustée afin de n'avoir plus qu'un léger filet régulier s'écoulant dans le tuyau de trop-plein.
6. Mesurez le volume d'eau qui s'écoule par l'orifice dans le réservoir, le temps  $t$ ,  $H_0$  et  $H_c$
7. Partie 2 : Varier le niveau d'eau dans le réservoir  $H_0$  et mesurer le débit volumique  $Q$  et le hauteur dans la sonde de Pitot  $H_c$ .
8. Fermez la pompe et videz bien l'appareil.

#### V. Exploitation des résultats

**Tableau III.5.1** : résultats des expériences

	$H_0 [mm]$	$Q [L/s]$	$H_c [mm]$	$C_u$	$C_d$	$C_a$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

1. Remplissez le tableau des résultats expérimentaux.
2. Tracez la variation de débit en fonction de  $\sqrt{H_0}$ .
3. Tracez la variation de  $H_c$  en fonction  $H_0$ .
4. tracez le débit réel en fonction du débit théorique
5. Interprétez les résultats.

## IV.1 Les débitmètres dans les écoulements à surface libre (Les déversoirs)



### I. But

Le but de cette manipulation est de mesurer le débit d'eau dans le cas d'un écoulement à surface libre en utilisant les déversoirs.

### II. Théorie

Un déversoir est un orifice superficiel ouvert à sa partie supérieure et pratiqué dans une paroi généralement verticale.

Les déversoirs fournissent une méthode relativement précise pour mesurer le débit d'un canal ou d'un cours d'eau et se prêtent bien à un enregistrement continu des débits. En bref, le déversoir est une paroi transversale, habituellement (mais non nécessairement) pourvue d'une échancrure de géométrie précise par où se déverse le trop plein. En absence d'une telle échancrure, l'eau se déverse par-dessus la paroi. Une fois érigé, le déversoir fait partie intégrante de la canalisation et influe grandement sur le mode d'écoulement en amont, c'est pourquoi on le qualifie de dispositif primaire de mesure du débit. Pour qu'il puisse remplir son rôle, le déversoir doit être accompagné d'un élément secondaire, soit un dispositif de mesure du niveau de l'eau à son amont immédiat, c'est-à-dire un limnimètre.

Les déversoirs servent aussi comme trop-pleins pour maintenir constant le niveau d'eau

dans un bassin, mais c'est surtout leur rôle de débitmètre qui nous intéresse ici. Ils ont l'avantage de fournir une relation entre le débit et la profondeur amont de l'eau tout en minimisant les sources d'incertitude pouvant infirmer cette relation. Avant d'en aborder l'étude, cependant, il est important d'en classer sommairement les divers types et de s'initier à leur terminologie.

Un déversoir peut être en mince paroi « quand les dimensions de la partie du seuil qui touche l'eau sont négligeables vis à vis de la hauteur de la nappe déversant, ou à seuil épais dans les autres cas.



**Fig IV.1.1** : Un déversoir trapézoïdal

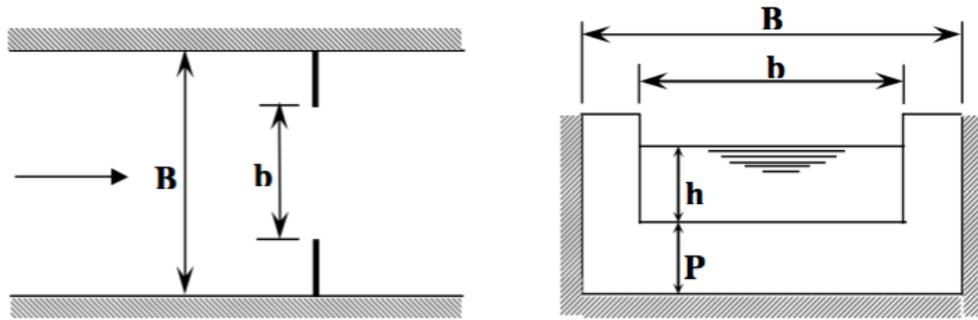
Les outils de mesure de débit dans le cas d'un écoulement à surface libre sont principalement les déversoirs de différents types : rectangulaire, triangulaire et trapézoïdale.

Le débit par-dessus le déversoir est fonction de la hauteur de charge à l'amont, cette dernière est égale à l'énergie spécifique de l'eau par rapport au seuil en amont, en plus des paramètres géométriques (la largeur de la contraction, la lame d'eau, l'angle, etc.), et des coefficients.

Les déversoirs en mince paroi sont les plus utilisés, ils peuvent être sans contraction ou avec contraction latérale. Dans ce dernier cas, on peut leur donner diverses formes selon les caractéristiques de l'écoulement ou en fonction d'objectifs spéciaux. On utilise généralement des déversoirs rectangulaires, trapézoïdaux ou triangulaires.

### **II.1 Déversoir rectangulaire**

Le déversoir rectangulaire en mince paroi a servi de base à l'étude générale des déversoirs. Dans le cas d'un déversoir avec contraction latérale, l'échancrure rectangulaire présente une crête parfaitement horizontale dont la longueur «  $b$  » est inférieure à la largeur du canal. Si, sur une canalisation de section rectangulaire, la crête est d'une longueur égale à la largeur  $B$  de cette canalisation, le déversoir est dit rectangulaire sans contraction. Pour y établir la relation entre le débit et la hauteur de charge, on a recours, comme dans le cas des orifices à la relation de Bernoulli pour avoir enfin des relations simples à utiliser.



**Fig IV.1.2:** Déversoir rectangulaire en mince paroi avec contraction latérale

Il existe plusieurs formules pour les déversoirs rectangulaires, la plus utilisée est la celle de Poloni :

$$Q = \mu b \sqrt{2g} h^{1,5} \quad (\text{IV.1.1})$$

Avec

b : la largeur de la contraction

h : la lame d'eau au-dessus du déversoir

B : la largeur du canal

Et  $\mu$  un coefficient qui dépend des paramètres du déversoir.

$$\mu = \left[ 0,3853 + 0,0246 \left( \frac{b}{B} \right)^2 + \frac{2,41 - 2 \left( \frac{b}{B} \right)^2}{1000 h + 1,6} \right] \cdot \left[ 1 + 0,5 \left( \frac{b}{B} \right)^4 \cdot \left( \frac{h}{h + P} \right)^2 \right]$$

Avec P étant la différence de niveau entre le seuil du déversoir et le fond du canal d'alimentation appelé aussi la hauteur de pelle.

Une autre formule est celle de Francis, avec :

$$Q = 1,83(1 - 0,2h)h^{1,5} \quad (\text{IV.1.2})$$

Pour le même type de déversoir on trouve aussi la formule de Rehbock modifiée qui tient compte d'un plus grand nombre de facteur que celle de Francis et peut donc être considérée plus sûre. On l'utilise à l'aide du tableau qui l'accompagne, la formule s'énonce comme suit :

$$Q = 2,95 C_d (b + e)(h + 0,001)^{1,5} \quad (\text{IV.1.3})$$

On trouve les valeurs de « e » et « Cd » sur le tableau IV.1.1 ci-dessous :

**Tableau IV.1.1:** Valeurs des paramètres de la formule de Rehbock modifiée \*

b/B	E	Cd
1	0	0,602 + 0,075 (h/p)
0,8	0,0043	0,596 + 0,045 (h/p)
0,6	0,0037	0,593 + 0,018 (h/p)
0,4	0,0027	0,591 + 0,0058 (h/p)
0,2	0,0024	0,589 + 0,0018 (h/p)

\* : les valeurs du tableau peuvent varier légèrement selon les sources

## II.2 Déversoir triangulaire

Le déversoir à échancrure triangulaire ou en « V » est très utile pour les mesures de débits inférieurs à 0,03m<sup>3</sup>/s, par exemple dans le réseau d'assainissement. La formule utilisée dans le cas d'un déversoir triangulaire à parois mince est la suivante :

$$Q = \frac{8}{15} C_d \operatorname{tg} \left( \frac{\theta}{2} \right) \sqrt{2gh} h^{2,5} \quad (\text{IV.1.4})$$

Cette formule peut être simplifiée sous la forme suivante :

$$Q = K h^{2,5} \quad (\text{IV.1.5})$$

**Tableau IV.1.2:** Valeurs du paramètre K en fonction de l'angle

L'angle en °	K
90	1,38
60	0,796
45	0,571
30	0,37

Pour la même forme triangulaire on trouve la formule de Gourley :

$$Q = 1,32 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} h^{2,47} \quad (\text{IV.1.6})$$

Avec  $\alpha$  l'angle du déversoir.

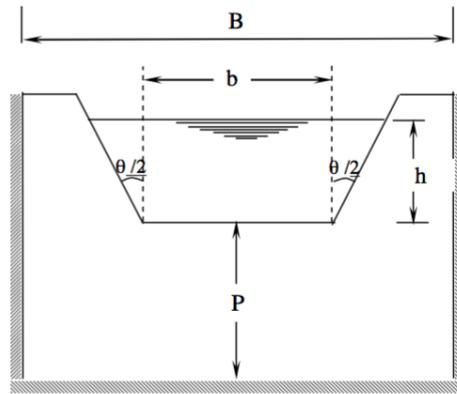
## II.3 Déversoir trapézoïdale

Dans ce type de déversoir la forme de l'échancrure est un trapèze isocèle envasé vers le haut, Pour une valeur quelconque de l'angle d'inclinaison des joues du déversoir sur la verticale (Gourley et Crimp) ont donné la formule suivante pour le calcul du débit :

$$Q = 1,32 h^{2,47} \operatorname{tg} \left( \frac{\theta}{2} \right) + 1,69 b^{1,02} h^{1,47} \quad (\text{IV.1.7})$$

b : est la petite base du trapèze

h : la hauteur d'écoulement

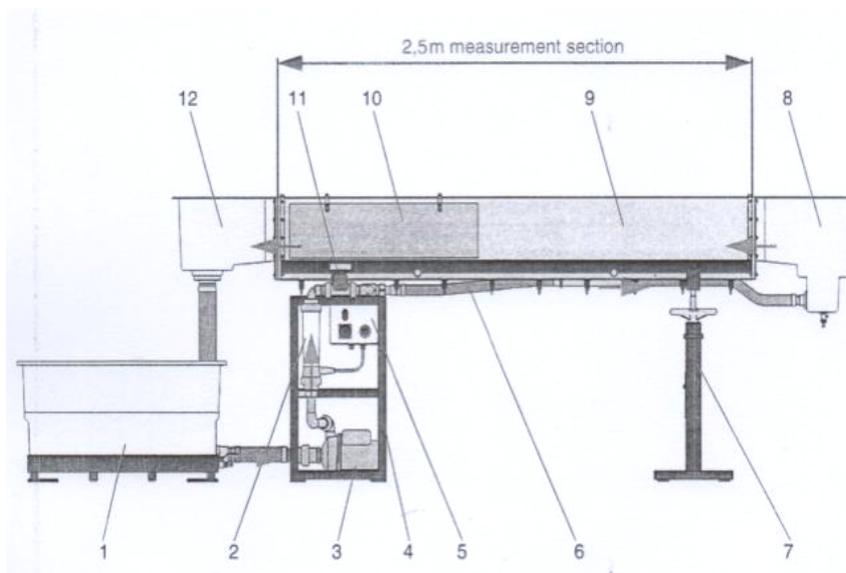


**Fig IV.1.3:** Déversoir trapézoïdal

### III. Matériels utilisés

Actuellement les méthodes et les appareils qui permettent de mesurer le débit diffèrent, parmi les appareils qui sont utilisés pour la mesure du débit à l'air libre, un grand nombre sont des structures hydrauliques appartenant à la famille des déversoirs et des canaux.

Ces derniers utilisent la capacité du ressaut pour surélever la charge aval d'où leur nom jaugeur à ressaut, tandis que pour les déversoirs le principe est simple, ce sont ceux qui utilisent le libre déversement par-dessus une paroi verticale et pour lequel la charge aval est faible.



**Fig IV.1.4:** Banc Expérimental

1	Réservoir
2	débimètre
3	pompe
4	soCLE
5	commande
6	Ligne d'alimentation
7	Ajustement du pente du canal
8	Entrée d'eau
9	Section du canal
10	Support maillé
11	Vanne de commande
12	Sortie d'eau



**Fig.IV.1.5** : Les trois déversoirs qui se montent sur le support sur fig.IV.1.1.

#### **IV. Protocole expérimental**

Pour un bon déroulement des manipulations, des mesures sont à prendre en considération, à savoir :

1. S'assurer que le canal est à l'horizontale
2. Prenez les dimensions du premier déversoir
3. Montez-le sur le socle
4. Placez le socle au milieu du canal (près de la grille maillée pour observation de l'écoulement)
5. Mettez la pompe d'alimentation en marche et commencez à augmenter le débit progressivement.
6. Dès que l'eau commence à déverser, prenez la valeur du débit par lecture directe sur le rotamètre en ( $m^3/h$ ) et la lame d'eau sur le déversoir.
7. Répétez la procédure pour trois valeurs de la lame d'eau pour le même déversoir.
8. Répétez les étapes du 2 à 7 pour les deux autres formes de déversoirs.

## V. Exploitation des résultats

Au fur et au mesure des déroulements des expériences, remplissez le tableau IV.1.3 ci-dessus

**Tableau IV.1.3:** Les résultats et exploitations

Les déversoirs	N°	Le débit du rotamètre (m <sup>3</sup> /s)	La lame d'eau (h)	Le coefficient $\mu$	Le débit calculé (m <sup>3</sup> /s)	Observations (l'équation utilisée)	
Rectangulaire	1						
	2						
	3						
Triangulaire	1						
	2						
	3						
Trapézoïdale	1						
	2						
	3						

1. Calculez  $\mu$  et le débit au-dessus du déversoir
2. Commentez les résultats à partir des tableaux.
3. Finalement, selon vous, quelle est l'utilité de mesure de débit dans les canaux à ciel ouvert ?

## IV.2 Vérification de l'équation de Manning Strickler



### I. But

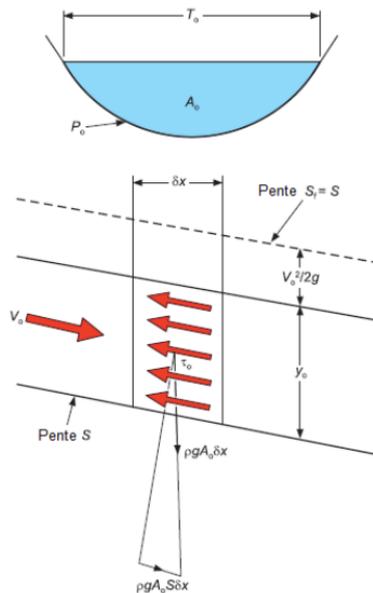
Le but de cette manipulation est de vérifier expérimentalement l'équation de Manning Strickler.

### II. Théorie

L'écoulement d'un liquide dans un canal ouvert diffère de l'écoulement dans un conduit fermé. Bien que la théorie s'applique à n'importe quel liquide, la grande majorité d'applications pratiques concerne les écoulements d'eau dans les fleuves et les rivières. Le mouvement est produit essentiellement par la force de la gravité.

Il est nécessaire de faire une distinction entre les écoulements permanents et non permanents. L'écoulement est permanent lorsque à chaque position tout le long du canal, la profondeur est indépendante du temps, de l'autre côté, l'écoulement est dit non-uniforme, lorsque la profondeur varie le long du canal.

Lorsque la profondeur est constante le long du canal l'écoulement est dit uniforme. Bien que cette condition de profondeur constante le long du canal soit d'une importance théorique considérable, elle se produit rarement en pratique et même en laboratoire, elle n'est pas facile à réaliser.



**Fig.IV.2.1:**forces et contraintes dans le cas d'un écoulement permanent et uniforme

Soit un canal prismatique, le liquide en mouvement exerce une force de frottement sur les parois :

$$F_f = \tau_0 P dx$$

Sous l'action de composantes longitudinales de la force de gravité :

$$F_g = \gamma S dx \sin \alpha$$

En écoulement uniforme, il y a équilibre entre ces forces :

$$\gamma S dx \sin \alpha = \tau_0 P dx$$

On obtient par conséquent :

$$\tau_0 = \gamma \frac{S}{P} \sin \alpha \quad (\text{IV.2.1})$$

Lorsque l'angle du canal est faible, on peut écrire :

$$\sin \alpha = \tan \alpha = I$$

Aussi, pour le rayon hydraulique :

$$R_h = \frac{S}{P}$$

L'équation (IV.2.1) devient :

$$\tau_0 = \gamma R_h I \quad (\text{IV.2.2})$$

En hydrodynamique, on définit la vitesse de frottement aux parois comme :

$$u_*^2 = \frac{\tau_0}{\rho} \quad \text{donc} \quad u_* = \sqrt{g R_h I}$$

Le coefficient de frottement est défini comme :

$$f = \frac{\tau_0}{\rho U^2 / 8} = 8 \left( \frac{u_*}{U} \right)^2 \quad (\text{IV.2.3})$$

On peut utiliser une partie de cette équation avec l'équation de la vitesse de frottement pour avoir :

$$f = 8 \left( \frac{u_*}{U} \right)^2 \text{ et } u_* = \sqrt{g R_h I}$$

On obtient :

$$U = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{R_h I} \quad (\text{IV.2.4})$$

$$\text{avec } C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

L'équation de Chézy s'écrit sous la forme suivante :

$$U = C \sqrt{R_h I} \quad (\text{IV.2.5})$$

C étant le coefficient de résistance selon Chézy

Une autre formule similaire celle de Chézy est celle de Manning Strickler qui s'écrit comme suit :

$$U = K_s R_h^{2/3} I^{1/2} \quad (\text{IV.2.6})$$

Ks étant le coefficient de Strickler

Le coefficient Ks et le coefficient C de la formule de Chézy sont liés par la relation :

$$C = K_s R_h^{1/6}$$

**Tableau IV.2.1:** valeurs de K<sub>s</sub> et n selon A. LENCASTRE

Caractéristiques des parois	K <sub>s</sub>	n=1/k <sub>s</sub> (coefficient de Manning)
Parois très lisses : revêtement en mortier de ciment et sable, très lisses, planches rabotées, tôles métalliques sans soudures saillantes	100 à 90	0,01 à 0,0111
Mortier lissé	85	0,0119
Formes lisses : planches avec des joints mal soignés, enduit ordinaire, grés	80	0,0125
Béton lisse	75	0,0134
Maçonnerie ordinaire	70	0,0142
Parois rugueuses : béton rugueux ou vieux, maçonnerie vieille ou mal soignée	60	0,0167
Parois très rugueuses : terres très irrégulière avec des herbes	50	0,02
Terre en mauvais état, rivière en lit de cailloux	40	0,025
Terre complètement à l'abandon, torrents transportant de gros blocs	20 à 15	0,05 à 0,0667

Le coefficient C est donné par plusieurs formules, les plus connues sont celle de Bazin et Kutter avec :

$$\text{Formule de Bazin : } C = \frac{87\sqrt{R_h}}{\gamma + \sqrt{R_h}}$$

Formule de Kutter :  $C = \frac{100\sqrt{R_h}}{\eta + \sqrt{R_h}}$

**Tableau IV.2.2:** valeurs de  $\gamma$  de la formule de Bazin

N°	Caractéristiques	Valeurs de $\gamma$
01	Canaux en béton bien lissé, Canaux en bois raboté, avec la plus grande dimension des planches selon la direction du courant, parois métalliques sans rouille et décrochements dans les joints  (Le plan du canal doit être constitué par des tronçons longs raccordés par des courbes à rand rayon, l'eau doit être claire).	0,06
02	Canaux en béton, revêtus, mais non complètement lissés et avec des décrochements peu importants dans les joints, Canaux en bois raboté avec des joints irréguliers, Canaux métalliques soudés, mais sans décrochements dans les joints. Canaux en maçonnerie régulière de pierres de taille	0,16
03	Canaux en béton, partiellement revêtus, avec des joints saillants, où coule de l'eau peu claire avec végétation et mousse. Canaux revêtus en pierres sèches.	0,46
04	Canaux en terres, bien réguliers, éventuellement revêtus en pierres sans végétation et courbes amples, Canaux en maçonnerie irrégulière, avec le fond lisse par suite du dépôt de la vase	0,85
05	Canaux en terre de section régulière, Végétation peu haute sur le fond, végétation courte sur les berges. Cours d'eau naturels d'allure régulière, sans végétation ni grand dépôts dur le fond	1,30
06	Canaux en terre mal entretenus, avec de la végétation sur le fond et les berges, Canaux en terre, exécutés par des excavateurs mécaniques, mal entretenus ,	1,75

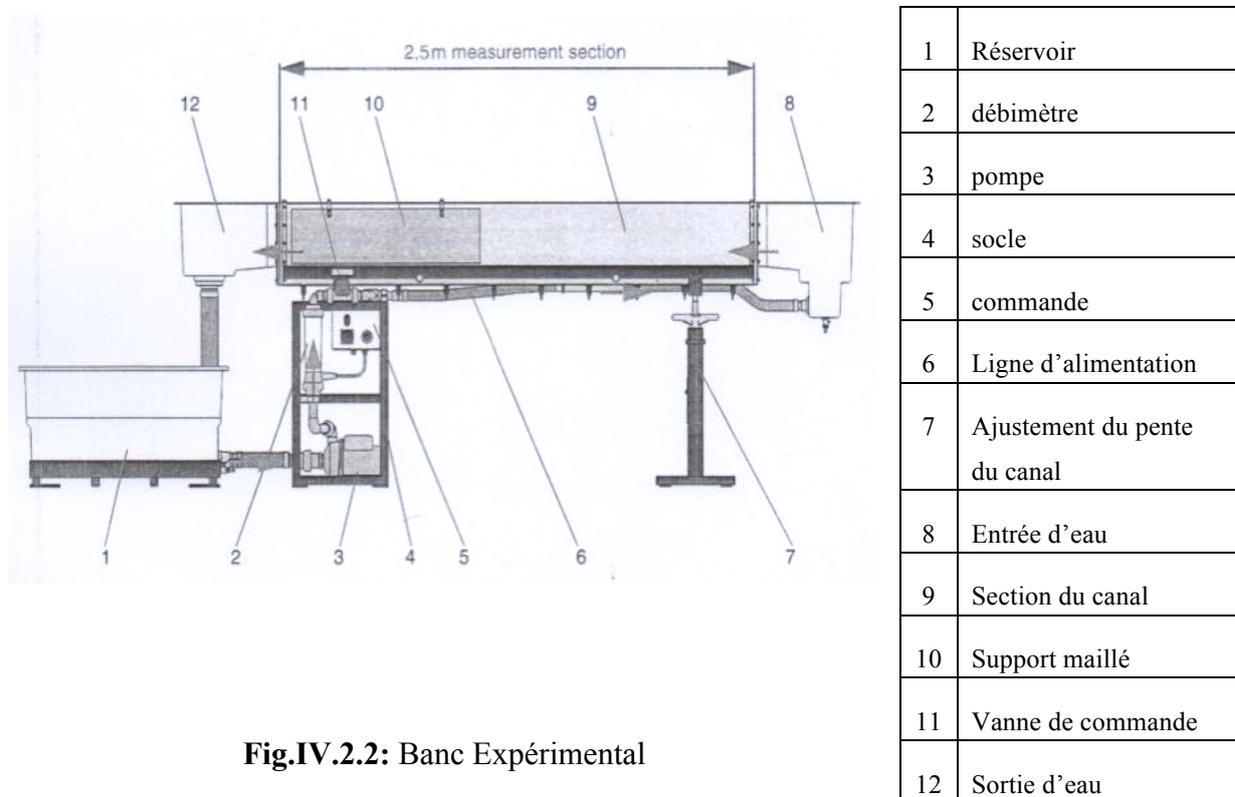
**Tableau IV.2.3:** valeurs de  $\eta$  de la formule de Kutter

N°	Caractéristiques	Valeurs de $\eta$
01	Parois en béton bien lissé, section demi-circulaire.	0,12
02	Idem, section rectangulaire.	0,15
03	Parois en bois raboté, section rectangulaire	0,20
04	Parois en bois non raboté, section trapézoïdale ou rectangulaire, maçonnerie très régulière avec des pierres de taille.	0,25
05	Paroi en maçonnerie ordinaire, construction soignée.	0,35

06	Parois en maçonnerie ayant déjà subi des réparations	0,45
07	Parois revêtues en pierres ordinaires.	0,55
08	Parois en maçonnerie ordinaire, fond vaseux	0,75
09	Parois en maçonnerie, à l'abandon	1,00
10	Petits canaux creusés dans le rocher, Canaux en terre bien réguliers sans végétation.	1,25 à 1,50
11	Canaux en terre, mal entretenus avec de la végétation, cours d'eau naturels, avec lit en terre	1,75 à 2,00
12	Canaux en terre complètement à l'abandon, cours d'eau naturels avec lit en galets.	2,50

### III. Matériels utilisés

Pour vérifier expérimentalement l'équation de Manning Strickler, on utilise un canal disponible dans le laboratoire d'hydraulique, ce dernier est muni d'un volant d'ajustement d'inclinaison afin de contrôler la pente.



**Fig.IV.2.2:** Banc Expérimental

Par soucis de l'horizontalité du sol du laboratoire d'hydraulique on recommande l'utilisation d'un niveau topographique afin d'avoir des mesures précises de la pente, on peut faire la mise en station dans le laboratoire a côté du canal.



**Fig.IV.2.3:** Un niveau topographique

#### **IV. Protocol expérimental**

Le canal expérimental est mené d'un régulateur de pente avec indicateur de l'inclinaison mais la précision de cet instrument dépend fortement du niveau du sol sur lequel l'appareil est installé.

Afin de faire face à cette situation, on fait appel à un niveau topographique et on mesure la pente du canal, on fait la mise en station juste à côté du canal et on fait la lecture du niveau du canal (au moins deux points à une distance fixe), une simple règle de trois nous permet d'avoir la pente exacte du canal.

1. On fait varier la pente avec le volant d'ajustement d'inclinaison et on fait la lecture de la pente sur le niveau topographique jusqu'à atteindre la pente désirée (exemple 1%).
2. On met en marche le système d'alimentation en eau.
3. On s'assure que l'écoulement est uniforme en mesurant la profondeur d'eau en deux points du canal, si  $h_1=h_2$  l'écoulement est considéré comme uniforme et l'équation de Manning Strickler est valable, si l'écoulement n'est pas uniforme on fait varier faiblement la pente et on refait la mesure de  $h_1$  et  $h_2$  jusqu'à avoir un écoulement uniforme.
4. On fait la lecture du débit sur le rotamètre (en  $m^3/h$ ) et la profondeur d'écoulement.
5. Reprenez depuis le point (1) pour différents débits en manipulant la pente.

#### **V. Exploitation des résultats**

1. Remplissez le tableau IV.2.4 ci-dessous.
2. Le calcul de la vitesse à partir du débit se fait en utilisant l'équation de continuité, la section mouillée et le périmètre mouillé sur la base de la profondeur d'eau et finalement, dans le but de faire une comparaison, la vitesse se calcule en utilisant l'équation de Manning Strickler.
- 3.

**Tableau IV.2.4:** exploitation des résultats

N°	pente (m/m)	débit (m <sup>3</sup> /h)	débit (m <sup>3</sup> /s)	Vitesse (m/s)	profondeur (m)	Section mouillée (m <sup>2</sup> )	Périmètre mouillé (m)	rayon hydraulique	vitesse (Manning Strickler)
1									
2									
3									
4									
5									

4. Pour chaque pente, Comparer la vitesse calculée (Manning Strickler) et la vitesse mesurée (débit du rotamètre /section mouillée).
5. Discutez les limites d'application de l'équation de Manning Strickler

## Annexe

### Les erreurs et les incertitudes

Dans une grande partie des TP, l'objectif est de déterminer si une théorie est valide ou non, en la comparant à vos mesures expérimentales. Pour cela, il est indispensable de pouvoir estimer précisément l'incertitude (ou la barre d'erreur) de votre mesure. Il est impossible de connaître la valeur exacte d'une grandeur physique: il est très important de connaître l'incertitude (erreur).

On parle d'erreur sur une mesure physique lorsqu'on peut la comparer à une valeur de référence qu'on peut considérer comme "vraie"

Généralement, pour les mesures effectuées au laboratoire, on ne possède pas de valeur de référence et on ne connaît pas la valeur exacte de la grandeur mesurée. On parle alors d'incertitude.

**1. Les erreurs :** Il existe deux types d'erreurs (Erreurs systématiques et Erreurs accidentelles (statistiques))

**Erreurs systématiques :** affectent le résultat constamment et dans le même sens. Se produisent par exemple lorsqu'on emploie des unités mal étalonnées (échelle fautive, chronomètre mal ajusté) ou lorsqu'on néglige certains facteurs qui ont une influence sur la marche de l'expérience. Cela mène à un décalage du résultat si l'erreur commise est toujours la même. Dans la plupart des cas, les erreurs systématiques, peuvent être prises en considération par une correction

**Erreurs accidentelles (statistiques):** Les erreurs accidentelles par contre ne peuvent en principe pas être évitées. Leur cause se trouve dans l'expérimentateur lui-même. La sûreté avec laquelle la main manie un instrument (par ex. l'arrêt d'un chronomètre), l'exactitude avec laquelle l'œil observe (par ex. la position d'une aiguille sur une échelle) C'est la tâche de tout observateur d'être conscient des erreurs accidentelles de mesure, de les maintenir aussi faibles que possible et d'estimer ou calculer leur influence sur le résultat obtenu.

Répéter les mesures, calculer la moyenne et évaluer l'incertitude en utilisant la statistique permettront de réduire ce type d'erreur.

**2. Les incertitudes :** Il existe deux types d'incertitudes (absolues et relatives)

**L'incertitude absolue :** Si la vraie valeur d'une grandeur est «  $x$  » et la valeur mesurée est «  $x_0$  »,  $\Delta x$  est l'incertitude absolue :  $x - \Delta x < x_0 < x + \Delta x$ . Le résultat s'écrit :  $x \pm \Delta x$  ( $x$  et  $\Delta x$  ont la même unité de mesure).

**L'incertitude relative :** correspond à la valeur  $\Delta x/x$  (exprimée souvent en %).

L'erreur absolue a toujours la même dimension (même unité) que le résultat de la mesure lui-même. L'erreur relative n'a pas de dimension. Un résultat est toujours suivi de son incertitude.

## Références bibliographiques

1. Manuel d'Utilisation, Viscosimètre à chute de bille, H410, TecQuipment Ltd 2012 (traduit en 2014).
2. Manuel d'utilisation, Etalonnage de débitmètres H40, TecQuipment Ltd 2011.
3. Manuel d'utilisation, Etude d'un venturi H5, TecQuipment Ltd 2011(traduit en 2013).
4. Manuel d'Utilisation, Canal Hydraulique à Pente Variable Longueur 2.5 m H23, TecQuipment Ltd 2011 (traduit en 2014).
5. Manuel d'Utilisation, Appareil d'Etude du Centre de Poussée H11, TecQuipment Ltd 2011 (traduit en 2012).
6. Manuel d'Utilisation, Appareil d'Etude des Pertes de Charges dans une Conduite, REF H7, TecQuipment Ltd 2011 (traduit en 2011).
7. Manuel d'utilisation, Ecoulement à travers un orifice, H4, TecQuipment Ltd 2010
8. P Chassing, mécanique des fluides : éléments d'un premier parcours, épadués éditions, 1997
9. A Lencastre, Manuel d'hydraulique générale, collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, 2ditions Eyrolles, 1979
10. Instruction pour expérience, équipements pédagogiques pour les sciences de l'ingénieur, appareil d'analyse de l'impact d'un jet, HM 150.08
11. Instruction pour expérience, équipements pédagogiques pour les sciences de l'ingénieur, banc expérimental 86x300x2500mm, HM 160
12. Instruction pour expérience, équipements pédagogiques pour les sciences de l'ingénieur, pertes de charge dans les coudes et les raccords, HM 150.29
13. Instruction pour expérience, équipements pédagogiques pour les sciences de l'ingénieur, appareil de démonstration de la loi de Bernoulli, HM 150.07