

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département : Chimie Industrielle



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الكيمياء الصناعية

Semestre 4 – Licence – LMD –

POLYCOPIE

**MÉCANIQUE DES FLUIDES**  
**(MDF)**

**Travaux Pratiques De Mécanique Des Fluides**  
**(TP)**

Spécialité : Génie chimique

Présentée par : **AIDI Amel (MCA) & M. AL-HAZEEF Mazen**

2023

# Sommaire

TP N°0 : Comment rédiger un compte rendu de Travaux Pratiques....	2
TP N°1 : Viscosité à chute de bille .....	6
TP N°2 : Théorème de Bernoulli .....	19
TP N°3 : Régime d'écoulement .....	32
TP N°4 : Mesure de débit.....	43

# **TP N°0 : Comment rédiger un compte rendu de Travaux Pratiques**

*Un compte rendu de TP doit permettre à quelqu'un qui n'a jamais le TP de comprendre ce que vous avez fait et pourquoi vous l'avez fait.*

Suivez ces recommandations pour bien rédiger votre compte rendu :

## **N°1 : titre du TP**

Commencez par mettre un titre à votre TP, en général ce titre est déjà présent sur le polycopié donné par l'enseignant.

## **N°2 : Structure claire**

Organisez votre compte rendu en sections claires et cohérentes, telles que l'introduction, le but de l'expérience, la partie théorique, les matériaux et méthodes utilisés, les résultats obtenus, l'analyse des résultats, les discussions et les conclusions.

## **N°3 : Introduction**

Décrivez brièvement l'importance du sujet étudié.

## **N°4 : objectif du TP**

Ecrire en quelques mots ce que vous allez chercher dans ce TP.

## **N°5 : Partie théorique**

Dans la partie théorique, exposez les concepts et les principes fondamentaux qui sont pertinents pour les travaux pratiques. Expliquez les théories, les lois, les équations ou les modèles qui sont liés à l'expérience. Utilisez des références académiques fiables pour appuyer vos explications. Assurez-vous de présenter les informations de manière claire et concise, en évitant les détails superflus.

## **N°6 : Méthodologie**

Rédiger la liste des matériaux et équipements utilisés. Expliquez les étapes de l'expérience (dans ce cas commencer chaque étape par un verbe à l'infinitif) et

## **TP N°0 : Comment rédiger un compte rendu de Travaux Pratiques**

---

les paramètres mesurés et les techniques spécifiques mises en œuvre. Faire le ou les schémas des expériences que vous avez faites afin de vérifier vos hypothèses. Fournissez suffisamment d'informations pour que quelqu'un puisse reproduire l'expérience. Utilisez des phrases claires et des listes à puces si nécessaire.

### **N°7 : Résultats**

Présentez les résultats de manière organisée et compréhensible. Utilisez des tableaux, des graphiques, des diagrammes ou des figures pour illustrer vos résultats de manière visuelle. Assurez-vous d'inclure les unités de mesure appropriées et d'étiqueter correctement vos graphiques et tableaux. Analysez les résultats de manière objective et tirez des conclusions pertinentes.

### **N°8 : Analyse des résultats et discussion**

Dans cette section, interprétez vos résultats et discutez de leur signification. Comparez vos résultats avec les attentes théoriques et discutez des éventuelles sources d'erreur ou d'incertitude. Identifiez les tendances, les modèles ou les observations inattendues et proposez des explications plausibles. Discutez des implications de vos résultats et de leurs limites.

Vos expériences vous ont-elles permis de conclure quant à vos hypothèses ?  
Expliquez

Remarque : Vous pouvez rectifier vos hypothèses si besoin. Avoir une hypothèse fautive n'est pas une erreur mais laisser une hypothèse fautive en est une !

Attention à ne pas confondre observation et interprétation : j'observe que ... (c'est l'observation) donc j'en conclus que ... (c'est l'interprétation).

### **N°9 : Conclusion**

Faire une conclusion, elle représente un résumé de ce que l'on a découvert en TP. Résumez les principales conclusions de l'expérience et soulignez leur importance. Indiquez si les objectifs fixés au départ ont été atteints et discutez des éventuelles limites de l'expérience. Évoquez également les perspectives d'amélioration ou de développement ultérieur.

### **N°10 : Références**

Si vous avez utilisé des sources externes, assurez-vous de les citer correctement selon les normes de citation académiques appropriées (par exemple, APA, MLA, etc.).

### **N°11 : Utilisation de Microsoft Word**

Lors de la rédaction de votre compte rendu, suivez ces recommandations pour la mise en page et la présentation :

**a. Marges** : Définissez les marges de votre document selon les spécifications suivantes : *2,5 cm à gauche, 2 cm en haut, 2 cm à droite, 2 cm en bas*. Cela assurera une présentation uniforme et permettra une lecture aisée.

**b. Police de caractère** : Utilisez la police de caractère *Times New Roman* avec une taille de police de *12 points* pour le corps du texte. Utilisez une taille de police de *14 points en gras* pour les titres de section afin de les distinguer clairement.

**c. Interligne** : Définissez l'interligne à *1,5 point* pour améliorer la lisibilité du texte. Cela permettra une meilleure séparation entre les lignes et facilitera la lecture.

**d. Titres des graphiques et tableaux** : Pour chaque graphique ou tableau inclus dans votre compte rendu, ajoutez un titre descriptif au-dessus de celui-ci. Les titres doivent être clairs et informatifs, permettant aux lecteurs de comprendre rapidement le contenu du graphique ou du tableau.

## **TP N°0 : Comment rédiger un compte rendu de Travaux Pratiques**

---

**e. Numérotation des pages** : Activez la numérotation automatique des pages dans votre document. Cela permettra aux lecteurs de se repérer facilement et de naviguer dans votre compte rendu.

**f. Méthode de remplissage d'un tableau** : Pour remplir un tableau, utilisez la fonctionnalité de tableau de Microsoft Word. Insérez le tableau dans votre document et remplissez les cellules avec les données appropriées. En bas de chaque tableau, ajoutez un exemple d'application numérique qui illustre les données du tableau. Assurez-vous que l'exemple est clairement séparé du reste du texte et qu'il est facilement identifiable comme exemple associé au tableau correspondant.

**g. Page de garde** : Créez une page de garde qui comprendra les éléments suivants : le titre du travail pratique, le numéro de groupe, la spécialité, les noms et prénoms des étudiants, les noms et prénoms des enseignants, et l'année universitaire. Assurez-vous que ces informations sont clairement visibles et bien formatées.

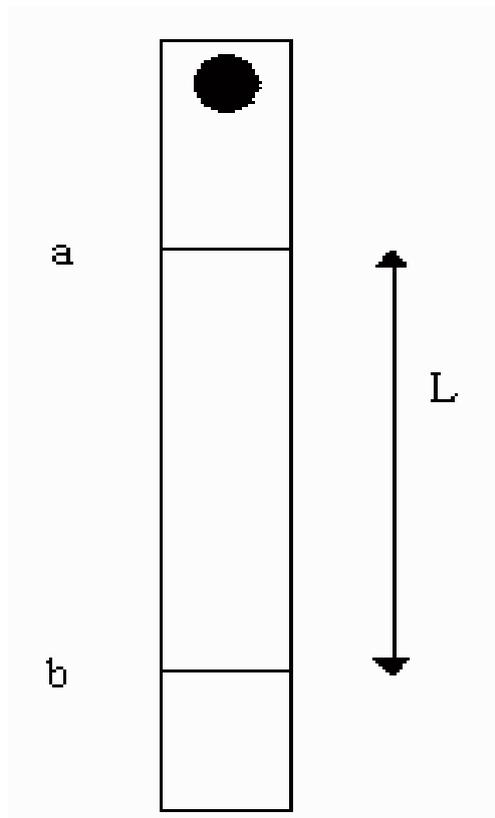
### TP N°1 : Viscosité à chute de bille

#### I. Objectif

Déterminer la viscosité d'un fluide en mesurant la vitesse de chute d'une bille de faible diamètre à travers ce fluide.

#### II. Matériel

Un viscosimètre à chute de bille est un dispositif très simple à mettre en place. Il s'agit d'un long tube transparent de diamètre  $D$  qui comporte deux traits repères  $A$  et  $B$ . Le tube vertical est rempli du fluide à étudier, dans lequel chute une bille sphérique de masse  $m$  et diamètre  $d$  suffisamment petit par rapport au diamètre de l'éprouvette  $D$ .



## TP N°1 : Viscosimètre à chute de bille

---

### III. Etude théorique

On considère une bille de rayon  $r$  qu'on laisse tomber dans un fluide visqueux. La bille est soumise à son poids  $\mathbf{P}$ , à la poussée d'Archimède  $\mathbf{F}_A$  et à la force de freinage  $\mathbf{F}_f$  exercée par le fluide sur la bille. Cette dernière est donnée par la relation de Stokes.

Si l'on considère un axe vertical  $Oz$  orienté vers le bas ces forces s'écrivent :

- Le poids de la bille : 
$$\mathbf{P} = m_{bille} \times \mathbf{g} = \rho_{bille} \times V_{bille} \times \mathbf{g}$$

$m_{bille}$ : la masse de la bille

$\rho_{bille}$ : la masse volumique de la bille

$V_{bille}$ : le volume de la bille

$\mathbf{g}$ : L'accélération de la pesanteur

- La poussée d'Archimède: 
$$\mathbf{F}_A = -\rho_{fluide} \times V_{bille} \times \mathbf{g}$$

$\rho_{fluide}$ : la masse volumique du fluide.

$V_{bille}$ : le volume de la bille.

- La force de frottement visqueuse ou force de traînée : 
$$\mathbf{F}_f = -f * \pi r^2 * (\rho_{fluide} * v^2 / 2)$$

$r$  : le rayon de la bille

$\mu$ : la viscosité dynamique du fluide

$v$ : la vitesse limite de chute de la bille dans le fluide.

$f$ : est le coefficient de traînée

---

Application de deuxième loi de Newton (Loi fondamentale de la dynamique) :

$$\sum \mathbf{F}_{ext} = m * \vec{a}$$

## TP N°1 : Viscosimètre à chute de bille

$$m_{bille} * \frac{dv}{dt} = P - F_{fr} - F_A$$

$$= \frac{4}{3} \pi * r^3 * \rho_s * g - f * S * \frac{1}{2} * \rho_{liq} * v^2 - \frac{4}{3} \pi * r^3 * \rho_{fluide} * g$$

$$m_{bille} * \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3} \pi * r^3 * g * (\rho_{bille} - \rho_{fluide}) * g - f * S * \frac{1}{2} * \rho_{fluide} * v^2$$

❖ Si  $\rho_{bille} \gg \rho_{fluide}$ , on peut négliger la pousse d'Archimède

❖ Si l'écoulement est glissant, c-a d  $Re \leq 0.1$ , le coefficient de traînée

$$f = \frac{24}{Re},$$

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

Et la force de traînée dite force visqueuse de stockes  $F_{st} = 6\mu\pi r v$

Donc,

$m_s * \frac{dv}{dt} = m_s * g - 6\mu\pi r v$  est un équation différentiel ordinaire (EDO)

de premier ordre

L'intégration de cette équation va donner :

$$v(t) = \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * \left[ 1 - e^{\left(-\frac{6\mu\pi r}{m_s} * t\right)} \right] \text{ (Equation I)}$$

La position de la bille en fonction de temps :

$$L(t) = \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * t + \left( \frac{m_s}{6\mu\pi r} \right)^2 * g * e^{\left(-\frac{6\mu\pi r}{m_s} * t\right)} \text{ (Equation II)}$$

L'expression de vitesse limite :

$$v_{limit} = \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} \text{ (Equation III)}$$

❖ Mouvement uniforme

## TP N°1 : Viscosimètre à chute de bille

---

Lors que la bille, atteint sa vitesse de chute limite (vitesse maximale), son mouvement est alors rectiligne uniforme. Le principe de la dynamique donne :

$$\Sigma \vec{F}_{ext} = \vec{0} \Rightarrow P + F_A + F_f = 0$$

$$\rho_{bille} \times V_{bille} \times g - \rho_{fluide} \times V_{bille} \times g - 6\pi \times r \times \mu \times v = 0$$

Ce qui nous permet d'établir l'expression de la viscosité dynamique du fluide :

$$\mu = \frac{V_{bille} \times g}{6\pi \times r \times v} * (\rho_{bille} - \rho_{fluide}) \text{ (Equation IV)}$$

### IV. Mode opératoire

Dans ce TP on utilise une bille en matériau (Ni-Fe) de masse volumique  $\rho = 8.1 \text{ g/cm}^3$  et de diamètre  $d = 15.6 \text{ mm}$  pour déterminer expérimentalement la viscosité dynamique de l'huile à deux températures :  $T=20^\circ\text{C}$ ,  $T= 25^\circ\text{C}$ ,  $T=30^\circ\text{C}$   $T=35^\circ\text{C}$ ,  $T=40^\circ\text{C}$  et  $T= 45^\circ\text{C}$ .

La masse volumique et la viscosité dynamique théorique de la glycérine sont données dans le tableau suivant :  $\rho_{huile} = 1.18 \text{ g/Cm}^3$

### Expérience

Pour déterminer la viscosité dynamique d'huile à une température donnée, on suit les étapes suivantes :

- On lâche la bille, sans vitesse initiale dans l'huile contenue dans l'éprouvette cylindrique.
- A l'aide d'un chronomètre, on mesure le temps de chute de la bille  $\Delta t$  entre les deux repères  $A$  et  $B$  distants de ( $L = 10 \text{ cm}$ ), ce qui nous

## TP N°1 : Viscosimètre à chute de bille

permet de calculer la vitesse de la bille et de déterminer la viscosité dynamique en appliquant l'équation (IV).

Le repère  $A$  est placé de façon telle que la bille lorsqu'elle passe à son niveau a atteint sa vitesse de chute limite (vitesse maximale) : son mouvement est alors rectiligne uniforme.

- Nous retirons la bille de la glycérine à l'aide d'un aimant et répétons l'expérience à nouveau.

### V. Travail demandé

1. Compléter le tableau 1 :

**Tableau1**

La distance: $L$ ( $m$ )	Masse volumique de la bille( $Kg/m^3$ )	Rayon de la Bille ( $m$ )	Volume de la bille( $m^3$ )	Masse volumique du fluide ( $Kg/m^3$ )
<b>0,1</b>				

2. Pour chaque température, compléter le tableau 2 et calculer la viscosité de l'huile.

**Tableau2**

Temperature (°c)	Temps $t$ (s)	La Vitesse : $v = L/t$ ( $m/s$ )	La viscosité dynamique $\mu$ ( $Pa. s$ )

## TP N°1 : Viscosimètre à chute de bille

- Vérifier que l'écoulement est glissant (Pour une seule expérience).
- Etablir la loi de vitesse de chute de bille  $v=f(t)$  (Equation I) et celle de sa position en fonction de temps  $L=f(t)$  (Equation II).
- Déduire l'expression de la vitesse limite  $v_{limit}$  (Equation III).
- Pour chaque température, calculer la vitesse limite avec l'expression analytique et la comparer avec le résultat expérimental.
- Tracer  $\mu=f(T)$ ,  $\ln \mu=f(1/T)$ . Commenter.
- La loi d'Eyring pour les liquides est :  $\ln \mu = \alpha + \frac{B}{T}$ . Déterminer les constantes  $\alpha$  et  $\beta$ . Que peut-on dire de leurs unités ?

### VI. Résultats et Calcul

#### 1. Remplissage de Tableau 1

La distance: $L$ (m)	Masse volumique de la bille ( $Kg/m^3$ )	Rayon de la Bille (m)	Volume de la bille ( $m^3$ )	Masse volumique du fluide ( $Kg/m^3$ )
0.1	8100	0.0078	$1.99 \cdot 10^{-6}$	1180

#### 2. Remplissage de Tableau 2 pour calculer la viscosité

Temperature ( $^{\circ}C$ )	Temps $t$ (s)	Vitesse : $v = L / t$ (m /s)	Viscosité dynamique $\mu$ (Pa. s)
20	93.5	0.0011	874.771
30	57.5	0.0017	537.961
40	36.5	0.0027	341.488
50	23.5	0.0043	219.862

Exemple pour remplir le tableau :

$$\text{Pour une distance } L=0.1 \text{ m : } v = \frac{L}{t} = \frac{0.1}{93.5}$$

$$v = 0.0011 \text{ (m/s)}$$

## TP N°1 : Viscosimètre à chute de bille

---

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{V_{bille} * g}{6\pi * r * v} * (\rho_{bille} - \rho_{fluide}) \\ &= \frac{1.99 * 10^{-6} * 10}{6\pi * 0.0078 * 0.0011} * (8100 - 1180) \\ \mu &= 874.771 \text{ (Pa.s)}\end{aligned}$$

### 3. Si l'écoulement est glissant, il va vérifier la condition $Re \leq 0.1$

Pour la première expérience :

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{8100 * 0.001 * 0.1}{874.771} = 0.001 \leq 0.1$$

Donc l'écoulement est glissant.

### 4. La loi de vitesse de chute de bille $v=f(t)$ et celle de sa position en fonction de temps :

Nous avons  $m_s * \frac{dv}{dt} = m_s * g - 6\mu\pi r v$  est un équation différentiel ordinaire (EDO) de premier ordre.

Pour résoudre cette équation différentielle, nous allons séparer les variables et intégrer de part et d'autre.

Réarrangeons l'équation :  $m_s * \frac{dv}{dt} + 6\mu\pi r v = m_s * g$

La solution générale de cette équation est :  $v = v_h + v_p$  ou  $v_h$  est la solution homogène et  $v_p$  est la solution particulière.

Pour résoudre l'équation homogène  $m_s * \frac{dv}{dt} + 6\mu\pi r v = m_s * g$ , nous allons considérer que le terme de droite est nul, c'est-à-dire  $m_s * g = 0$ . Par conséquent, l'équation devient :

$$m_s * \frac{dv}{dt} + 6\mu\pi r v = 0$$

## TP N°1 : Viscosimètre à chute de bille

---

Pour résoudre cette équation différentielle linéaire du premier ordre, nous pouvons utiliser la méthode de la séparation des variables. Nous allons réarranger l'équation :

$$dv = -(6\mu\pi r/m_s) * v * dt$$

Divisons maintenant par v et multiplions par dt :

$$dv/v = -(6\mu\pi r/m_s) * dt$$

Intégrons les deux côtés de l'équation :

$$\int (dv/v) = -\int (6\mu\pi r/m_s) * dt$$

$$\ln|v| = -(6\mu\pi r/m_s) * t + C$$

Où C'est une constante d'intégration.

Appliquons maintenant l'exponentielle des deux côtés :

$$|v| = e^{-(6\mu\pi r/m_s) * t + C}$$

Nous pouvons ignorer la valeur absolue car elle n'affecte que la direction de la vitesse. Donc, la solution de l'équation homogène est :

$$v = \pm e^{-(6\mu\pi r/m_s) * t + C}$$

Nous pouvons simplifier cette expression en écrivant :  $v_h = Ke^{-(6\mu\pi r/m_s) * t}$  où K est une constante d'intégration, égale à  $\pm e^C$ .

La solution particulière dépend du terme de droite de l'équation différentielle, qui est  $m_s * g$ . Dans ce cas, nous supposons que la solution particulière est une constante, soit  $v_p = A$ , où A est une constante à déterminer.

Substituons cette solution dans l'équation différentielle :

$$m_s \frac{dA}{dt} + 6\mu\pi r A = m_s * g$$

## TP N°1 : Viscosimètre à chute de bille

---

Comme  $dA/dt$  est nul puisque A est une constante, nous avons :

$$6\mu\pi r A = m_s * g$$

$$A = (m_s * g) / (6\mu\pi r)$$

Ainsi, la solution particulière est  $v_p = (m_s * g) / (6\mu\pi r)$ .

La solution générale de l'équation différentielle est la somme de la solution homogène et de la solution particulière :

$$v = v_h + v_p = K e^{-\left(\frac{6\mu\pi r}{m_s}\right) * t} + (m_s * g) / (6\mu\pi r)$$

Condition initiale : a t=0 la vitesse v=0.

En substituant t = 0 et v = 0 dans l'expression de la solution complète  $v = v_h + v_p$ , pour trouver la valeur de la constante K. Nous obtenons :

$$0 = K e^{-(6\mu\pi r / m_s) * 0} + (m_s * g) / (6\mu\pi r)$$

$$0 = K + (m_s * g) / (6\mu\pi r)$$

Nous pouvons résoudre cette équation pour K :

$$K = - (m_s * g) / (6\mu\pi r)$$

Donc, la valeur de la constante K dans la solution complète est  $K = - (m_s * g) / (6\mu\pi r)$ .

En remplaçant k, on obtient :  $v(t) = \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * \left[ 1 - e^{\left(-\frac{6\mu\pi r}{m_s} * t\right)} \right]$  (Equation I)

Pour trouver la position de la bille en fonction de temps, il suffit de résoudre  $dL = v * dt$

$$dL = \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * \left[ 1 - e^{\left(-\frac{6\mu\pi r}{m_s} * t\right)} \right] * dt$$

## TP N°1 : Viscosimètre à chute de bille

---

Pour trouver  $dL$ , nous devons intégrer  $v(t)$  par rapport à  $dt$ . Commençons par la formule :

$$dL = v(t) * dt$$

Nous avons l'expression de  $v(t)$  donnée :

$$v(t) = \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * \left[ 1 - e^{\left(-\frac{6\mu\pi r}{m_s} * t\right)} \right]$$

Intégrons cette expression par rapport à  $dt$  pour obtenir  $dL$  :

$$\int dL = \int v(t) * dt$$

$$L = \int \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * \left[ 1 - e^{\left(-\frac{6\mu\pi r}{m_s} * t\right)} \right] dt$$

Maintenant, intégrons chaque terme de l'expression :

$$L = \int \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} dt - \int \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * e^{-(6\mu\pi r/m_s) * t} dt$$

Le premier terme est simplement une intégrale de  $dt$ , qui donne  $t$  :

$$L = \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * t - \int \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * e^{-(6\mu\pi r/m_s) * t} dt$$

Maintenant, intégrons le deuxième terme. Utilisons la substitution  $u = -(6\mu\pi r/m_s) * t$  et  $du = -(6\mu\pi r/m_s) * dt$  :

$$L = \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * t - \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * \int [e^u] * (-m_s/(6\mu\pi r)) * du$$

$$L = \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * t + \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * (m_s/(6\mu\pi r)) * \int e^u du$$

$$L = \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * t + \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * (m_s/(6\mu\pi r)) * e^u + C$$

Où  $C$ 'est une constante d'intégration.

Remplaçons maintenant  $u$  par sa valeur d'origine :

## TP N°1 : Viscosimètre à chute de bille

$$L(t) = \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * t + \left(\frac{m_s}{6\mu\pi r}\right)^2 * g * e^{\left(-\frac{6\mu\pi r}{m_s} * t\right)} + C \text{ (Equation II)}$$

Si nous avons la condition initiale  $L(t=0) = 0$ , nous pouvons utiliser cette information pour trouver la valeur de la constante C.

$$C = \left(\frac{m_s}{6\mu\pi r}\right)^2 * g$$

$$L(t) = \frac{m_s * g}{6\mu\pi r} * t + \left(\frac{m_s}{6\mu\pi r}\right)^2 * g \left[ e^{\left(-\frac{6\mu\pi r}{m_s} * t\right)} + 1 \right]$$

### 5. L'expression de la vitesse limite $v_{limite}$ (Equation III) :

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow v = V_{max} = \text{cst} : \frac{dv}{dt} = 0$$

$$m_s * \frac{dv}{dt} + 6\mu\pi r v = m_s * g$$

$$v_{lim} = \frac{m_s * g}{6\mu\pi r}$$

### 6. Calcul la vitesse limite :

T(C)	Vexp (m/s)	Vlim(m/s)
20	0.0011	0.001252
30	0.0017	0.002036
40	0.0027	0.003207
50	0.0043	0.004981

On note que la vitesse limite est supérieure de la vitesse expérimentale.

7.  $\mu=f(T)$ ,  $\ln \mu=f(1/T)$

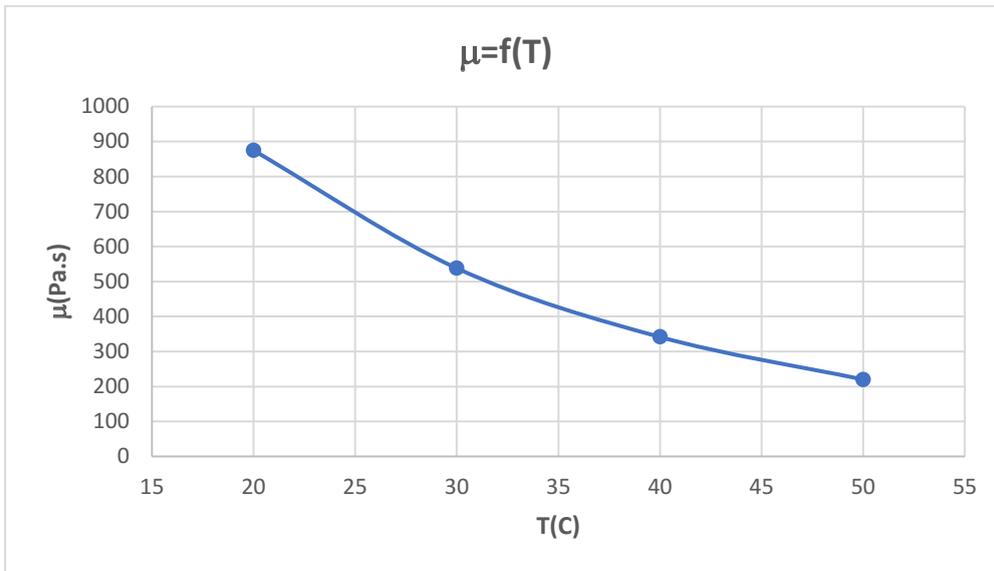


Fig.1 : La viscosité en fonction de température.

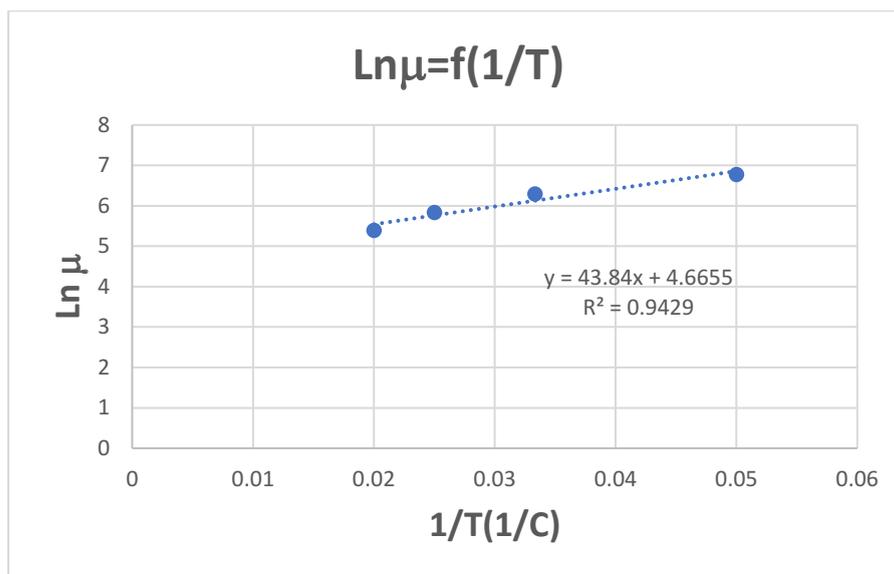


Fig.2 :  $\ln \mu=f(1/T)$ .

D'après Fig.1, on remarque que la viscosité diminue avec la température. Le trace de  $\ln \mu=f(1/T)$  est linéaire avec  $R^2 = 0.9429$ .

8. Détermination des constantes  $\alpha$  et  $\beta$

La loi d'Eyring pour les liquides est :  $\ln \mu = \alpha + \frac{\beta}{T}$ .

D'après Fig.2 :  $y = 43.84x + 4.6655$

## TP N°1 : Viscosimètre à chute de bille

---

Par comparaison :  $\ln \mu = y$ ,  $\alpha = 4.6655$ ,  $B = 43.84$

Les unités :  $\alpha = 4.6655$  sans unite ,  $B = 43.84$  C°

**TP N°2 : Théorème de Bernoulli**

**I. Objectifs**

L'expérience consiste à comprendre et vérifier le théorème de Bernoulli à l'aide d'un Venturi (convergent + divergent), Les objectifs de ce TP sont :

- Etudier les caractéristiques d'une venturi ;
- Appliquer les notions fondamentales sur les écoulements ;
- Mesurer les hauteurs  $h_1, \dots, h_8$  ;
- déterminer la vitesse moyenne et le débit d'un écoulement de fluide.

Le « premier » théorème de Bernoulli énonce que pour un écoulement stationnaire de fluide parfait incompressible avec forces de masse dérivant d'un potentiel, *la charge totale* se conserve sur chaque ligne de courant, mais peut varier d'une ligne de courant à une autre. Il s'agit donc du principe de conservation d'énergie mécanique adapté aux fluides en mouvement.

**II. Notions théoriques**

En tenant compte des hypothèses citées précédemment, le théorème de Bernoulli peut être formulé mathématiquement à l'aide de la seconde loi de Newton. L'équation qui en résulte (équation de Bernoulli) s'écrit sous plusieurs formes dont celle recommandée dans le cas des liquides est donnée par :

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{const} \dots\dots\dots(1)$$

L'application de ce principe entre deux sections d'un tube, soit (i) et (j), nous donne :

$$\frac{P_i}{\rho g} + \frac{v_i^2}{2g} + z_i = \frac{P_j}{\rho g} + \frac{v_j^2}{2g} + z_j \dots\dots\dots(2)$$

Ou encore :

## TP N°3 : Régime d'écoulement

---

$$h_i + \frac{v_i^2}{2g} = h_j + \frac{v_j^2}{2g} , \text{ avec } h_i = \frac{P_i}{\rho g} + z_i \dots \dots \dots (3)$$

Où  $h_1, h_2, \dots, h_n$  représentent les hauteurs d'eau lues sur le multi-manomètre différentiel.

Comme l'équation précédente est à deux inconnues  $v_i$  et  $v_j$ , nous pouvons ajouter une équation supplémentaire décrivant le principe de conservation de la masse (équation de continuité) qui se résume dans le cas d'un écoulement stationnaire incompressible à :

$$Q_v = V_i S_i = V_j S_j \dots \dots \dots (4)$$

### III. Mode opératoire

#### a- Tube de Venturi

L'appareil, comportant le système Venturi, est disposé horizontalement sur le banc hydraulique, un support à pieds réglables permettant de le mettre au niveau.

L'eau, aspirée par une pompe immergée, entre dans la venturi par un tuyau flexible. Un autre tuyau flexible, branché en sortie après le robinet de réglage de débit conduit l'eau au bac de pesée du banc hydraulique.

Des prises de pression piézométriques sont percées le long du convergent et du divergent de la venturi et sont reliées à des tubes manométriques verticaux montés en face d'échelles graduées en mm.

Ces tubes manométriques sont eux aussi reliés à leurs extrémités supérieures par un collecteur équipé d'une valve purge permettant de régler la quantité d'air (contre pression P) contenue dans l'appareil.

## TP N°3 : Régime d'écoulement

### b- Principe du Venturi

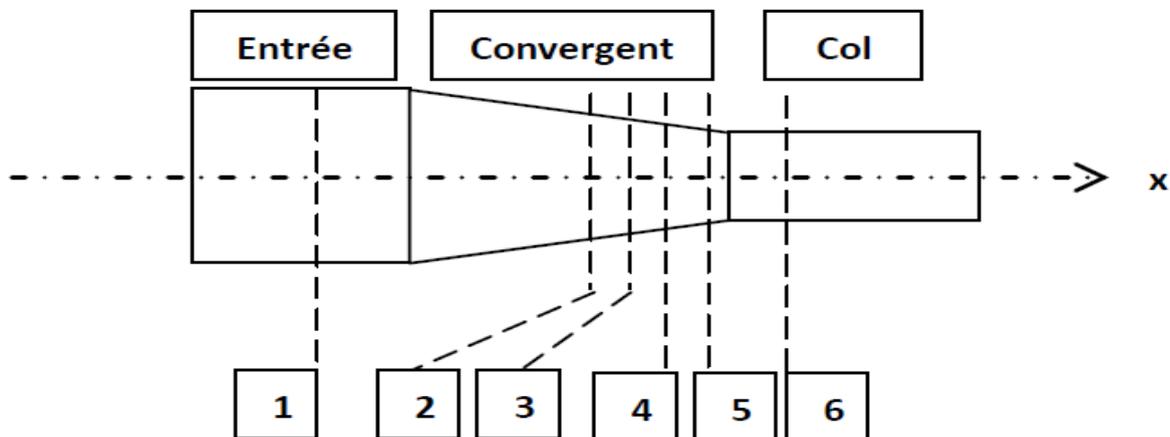
Installé sur une canalisation et dans le cas d'un écoulement de fluide incompressible (eau), la venturi peut être utilisé pour mesurer le débit dans la conduite.

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.

Après le col, le fluide perd de sa vitesse et remonte en pression.

### C- Géométrie de la venturi



S1(m <sup>2</sup> )	S2(m <sup>2</sup> )	S3(m <sup>2</sup> )	S4(m <sup>2</sup> )	S5(m <sup>2</sup> )	S6(m <sup>2</sup> )
3.386E-04	2.335E-04	8.460E-05	1.702E-04	2.552E-04	3.386E-04

## TP N°3 : Régime d'écoulement

### IV. Travail demandé

1. A partir des équations (3) et (4) montrer que le débit volumique peut être donné par :

$$Q_{vol} = \frac{2g(h_1 - h_3)}{\frac{1}{s_3^2} - \frac{1}{s_1^2}} \quad (5)$$

2. Remplir le tableau (1)

**Tableau (1)**

	Exp 1			Exp 2		
<b>Volume(m<sup>3</sup>)</b>						
<b>Temps(s)</b>	t1=	t2=	t3=	t1=	t2=	t3=
	tmoy=			tmoy=		
<b>Débit exp(m<sup>3</sup>/s)</b>						
<b>Débit theo(m<sup>3</sup>/s)</b>						
<b>Eq. (5) (m<sup>3</sup>/s)</b>						
<b>Cq=Qme/Qth</b>						
	hstat		htot	hstat		htot
<b>h1(m)</b>						
<b>h2(m)</b>						
<b>h3(m)</b>						
<b>h4(m)</b>						
<b>h5(m)</b>						
<b>h6(m)</b>						

3. A partir des équations (3) et (4) montrer que la perte de charge adimensionnelle peut être donnée par :

$$\frac{(h_i - h_1)}{V_1^2 / 2g} = 1 - \left(\frac{s_1}{s_i}\right)^2 \quad (6)$$

4. Choisir l'une des expériences et remplir le tableau (2), et tracer ensuite dans le même repère orthonormé les pertes de charge théoriques et expérimentales les fonctions des emplacements des manomètres.

## TP N°3 : Régime d'écoulement

Tableau (2)

	Sections					
	1	2	3	4	5	6
Aire(m <sup>2</sup> )						
Vitesse moyenne exp (m/s)						
Vitesse moyenne theo m/s						
Charge dynamique $\frac{v^2}{2g}$ (m)						
Charge piézométrique h(m)						
Charge totale $h + \frac{v^2}{2g}$ (m)						
Perte de charge exp $(h_i - h_1) * \frac{2g}{v^2}$						
Perte de charge théor. $1 - \left(\frac{A_1}{A_i}\right)^2$						

5. Représentez graphiquement dans le même repère orthonormé les variations des différentes pressions (**htot**, **hstat** et **hdyn**) en fonction des emplacements des manomètres. Commenter.

6. Représentez graphiquement dans le même repère orthonormé les variations des vitesses expérimentales et celle théoriques en fonction des emplacements des manomètres. Commenter.

7. Discuter les résultats. Quelles sont vos conclusions ?

### V. Résultats et Calcul

#### 1. Démonstration de la relation du débit volumique

Pour démontrer l'égalité de :

$$Q_V = \sqrt{\frac{2g(h_3 - h_1)}{\frac{1}{s_3^2} - \frac{1}{s_1^2}}}$$

Nous allons utiliser les équations de continuité et d'énergie pour les fluides incompressibles.

La première équation, basée sur la conservation de la masse, est donnée par :  $Q_1 = Q_3$  où  $Q_1$  et  $Q_3$  représentent les débits volumiques respectifs à travers les sections 1 et 3.

La deuxième équation, basée sur la conservation de l'énergie, est donnée par :

$$h_3 + \frac{V_3^2}{2g} = h_1 + \frac{V_1^2}{2g}$$

Où  $h_1$  et  $h_3$  sont les hauteurs de fluide respectives à travers les sections 1 et 3,  $V_1$  et  $V_3$  sont les vitesses respectives à travers les sections 1 et 3, et  $g$  est l'accélération due à la gravité.

Nous avons également l'égalité suivante :  $Q_1 = V_1 * S_1$

Où  $S_1$  est la section transversale de la section 1.

De même, nous avons :  $Q_3 = V_3 * S_3$  où  $S_3$  est la section transversale de la section 3.

Maintenant, substituons  $Q_1$  et  $Q_3$  dans l'équation de conservation de la masse :

$$V_1 * S_1 = V_3 * S_3$$

Réorganisons cette équation pour isoler  $V_3$  :

$$V_1 = (V_3 * S_3) / S_1$$

## TP N°3 : Régime d'écoulement

Maintenant, substituons cette expression pour  $V_1$  dans l'équation de conservation de l'énergie :

$$h_3 + \frac{V_3^2}{2g} = h_1 + \frac{\left(\frac{S_3}{S_1} V_3\right)^2}{2g}$$

Réorganisons cette équation pour isoler  $h_3$  et  $h_1$  :

$$h_3 - h_1 = \frac{V_3^2}{2g} - \frac{\left(\frac{S_3}{S_1} V_3\right)^2}{2g}$$

$$V_3 = \sqrt{\frac{2g(h_3 - h_1)}{1 - \left(\frac{S_3}{S_1}\right)^2}}$$

Substituons  $V_3$  dans l'expression de  $Q_V$  :

$$Q_V = S_3 * \sqrt{\frac{2g(h_3 - h_1)}{1 - \left(\frac{S_3}{S_1}\right)^2}} \text{ Et donc } Q_V = \sqrt{\frac{2g(h_3 - h_1)}{\frac{1}{S_3^2} - \frac{1}{S_1^2}}}$$

### 2. Le tableau (1)

	Exp 1		Exp 2	
<b>Volume(m3)</b>	1.05E-02		9.96E-03	
<b>Temps(s)</b>	67		83	
<b>Débit exp(m<sup>3</sup>/s)</b>	1.57E-04		1.20E-04	
<b>Débit theo(m<sup>3</sup>/s) Eq. (5) (m<sup>3</sup>/s)</b>	1.76E-04		1.40E-04	
<b>Cq=Qme/Qth</b>	0.888		0.858	
	hstat	htot	hstat	htot
<b>h1(m)</b>	0.27	0.29	0.194	0.2
<b>h2(m)</b>	0.26	0.282	0.186	0.197
<b>h3(m)</b>	0.066	0.257	0.066	0.164
<b>h4(m)</b>	0.167	0.236	0.124	0.162
<b>h5(m)</b>	0.187	0.231	0.138	0.159
<b>h6(m)</b>	0.195	0.23	0.143	0.159

## TP N°3 : Régime d'écoulement

---

### 3. Démonstration de la relation de la perte de charge adimensionnelle

Pour montrer que la perte de charge adimensionnelle peut être donnée

$$\frac{(h_1 - h_i)}{V_1^2 / 2g} = 1 - \left(\frac{S_1}{S_i}\right)^2,$$

Nous allons utiliser les équations de continuité et d'énergie pour les fluides incompressibles.

La première équation, basée sur la conservation de l'énergie, est donnée par :

$$h_i + \frac{V_i^2}{2g} = h_1 + \frac{V_1^2}{2g}$$

Calculer la différence de hauteur entre les sections 1 et i :

$$h_1 - h_i = \frac{V_i^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g}$$

Simplifions l'expression :

$$h_1 - h_i = V_i^2 - V_1^2$$

Divisons les deux côtés par  $V_1^2$  :

$$\frac{h_1 - h_i}{V_1^2 / 2g} = \frac{V_i^2 - V_1^2}{V_1^2}$$

Simplifions :

$$\frac{h_1 - h_i}{V_1^2 / 2g} = \left(\frac{V_i}{V_1}\right)^2 - 1 (*)$$

La deuxième équation, basée sur la conservation de la masse, est donnée par :

$$Q_1 = Q_i$$

Où  $Q_1$  et  $Q_i$  représentent les débits volumiques respectifs à travers les sections 1 et i.

Nous avons également les équations suivantes :

$$Q_1 = V_1 * S_1$$

$$Q_i = V_i * S_i$$

## TP N°3 : Régime d'écoulement

Maintenant, substituons  $Q_1$  et  $Q_i$  dans l'équation de conservation de la masse :

$$V_1 * S_1 = V_i * S_i$$

Réorganisons cette équation

$$\frac{V_i}{V_1} = \frac{S_1}{S_i}$$

Maintenant, substituons  $V_i/V_1$  dans l'équation (\*) :

$$\frac{h_1 - h_i}{\frac{V_1^2}{2g}} = \left(\frac{S_1}{S_i}\right)^2 - 1$$

Réorganisons cette équation, Donc, nous avons montré que la perte de charge adimensionnelle est donnée par

$$\frac{(h_i - h_1)}{\frac{V_1^2}{2g}} = 1 - \left(\frac{S_1}{S_i}\right)^2$$

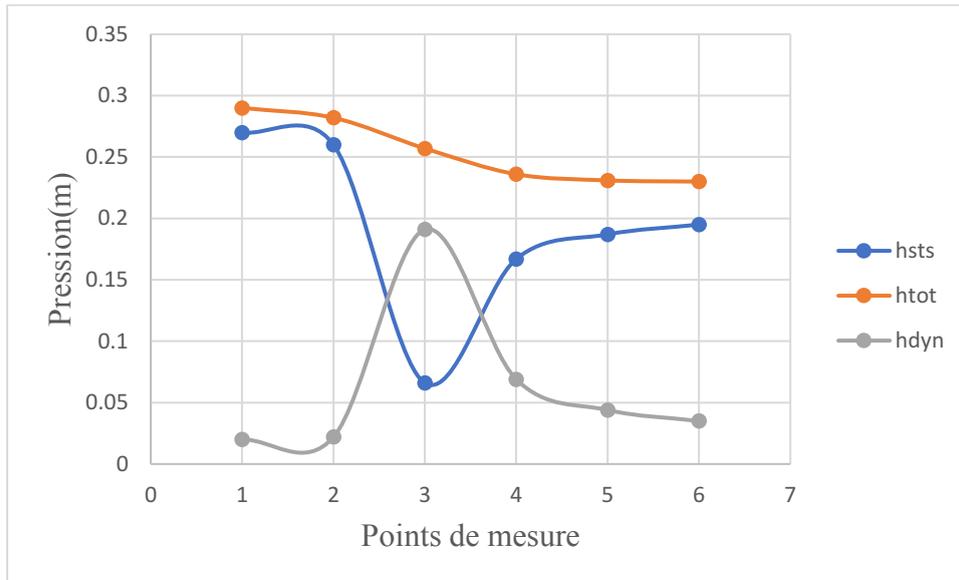
### 4. Le tableau (2)

	Sections					
	1	2	3	4	5	6
<b>Aire(m<sup>2</sup>)</b>	3.39E-04	2.34E-04	8.46E-05	1.70E-04	2.55E-04	3.39E-04
<b>Vitesse moyenne exp (m/s)</b>	4.63E-01	6.71E-01	1.85E+00	9.21E-01	6.14E-01	4.63E-01
<b>Vitesse moyenne theo m/s</b>	5.21E-01	7.56E-01	2.09E+00	1.04E+00	6.92E-01	5.21E-01
<b>Charge dynamique <math>\frac{v^2}{2g}</math> (m)</b>	1.36E-02	0.028562	0.217583	0.053758	0.023911	0.013583
<b>Charge piézométrique h(m)</b>	0.27	0.26	0.066	0.167	0.187	0.195
<b>Charge totale <math>h + \frac{v^2}{2g}</math> (m)</b>	0.283583	0.288562	0.283583	0.220758	0.210911	0.208583
<b>Perte de charge exp</b>	0	-0.73622	-15.0189	-7.58308	-6.11064	-5.52166

## TP N°3 : Régime d'écoulement

$(h_i - h_1) * \frac{2g}{v^2}$						
<b>Perte de charge théor.</b> $1 - \left(\frac{A_1}{A_i}\right)^2$	0	-1.10281	-15.0189	-2.95781	-0.7604	0

### 5. Représentation graphique



**Fig. 01** : Variation des pressions le long du tube de Venturi.

Dans un tube de Venturi, la variation des pressions statiques, totales et dynamiques dépend de la géométrie du tube, du débit du fluide et des propriétés du fluide lui-même.

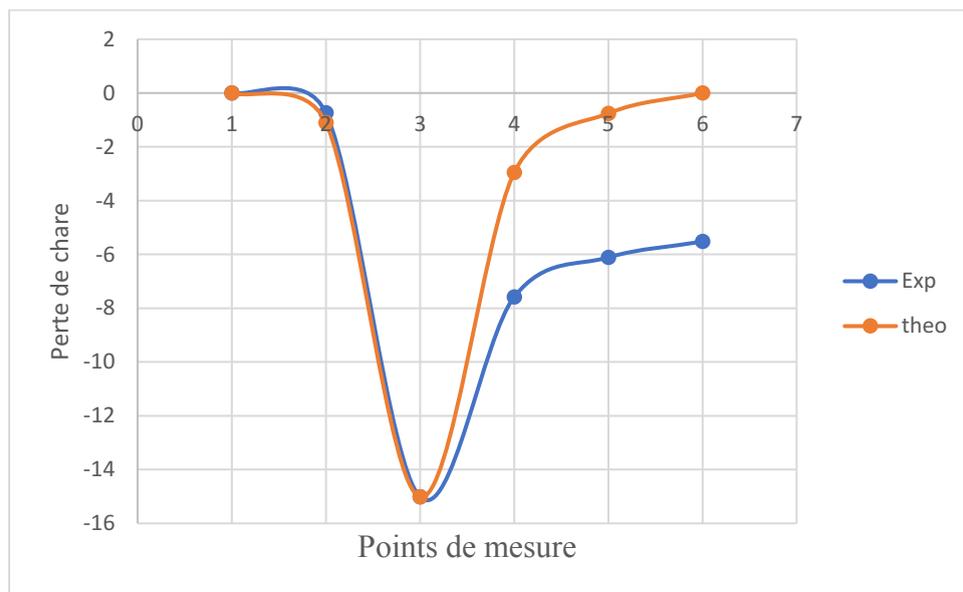
**Pression statique** : La pression statique diminue lorsque le fluide traverse la section rétrécie du tube de Venturi. Cela est dû à la conservation de l'énergie, où une augmentation de la vitesse du fluide entraîne une diminution de la pression statique. Plus la section rétrécie est étroite, plus la vitesse du fluide augmente et plus la pression statique diminue.

**Pression totale** : La pression totale, qui est la somme de la pression statique et de la pression dynamique, reste constante le long du tube de Venturi. Lorsque le

## TP N°3 : Régime d'écoulement

fluide passe par la section rétrécie, la diminution de la pression statique est compensée par une augmentation de la pression dynamique. Dans la figure, on remarque une petite diminution dans la pression totale, cela du Cela est dû à la perte de charge.

Pression dynamique : La pression dynamique, qui est liée à la vitesse du fluide, augmente lorsque le fluide traverse la section rétrécie du tube de Venturi. Cette augmentation de la vitesse conduit à une augmentation de la pression dynamique. La pression dynamique est maximale à la section la plus étroite du tube, où la vitesse du fluide est maximale, et diminue à mesure que le fluide se rétablit dans la section plus large du tube.



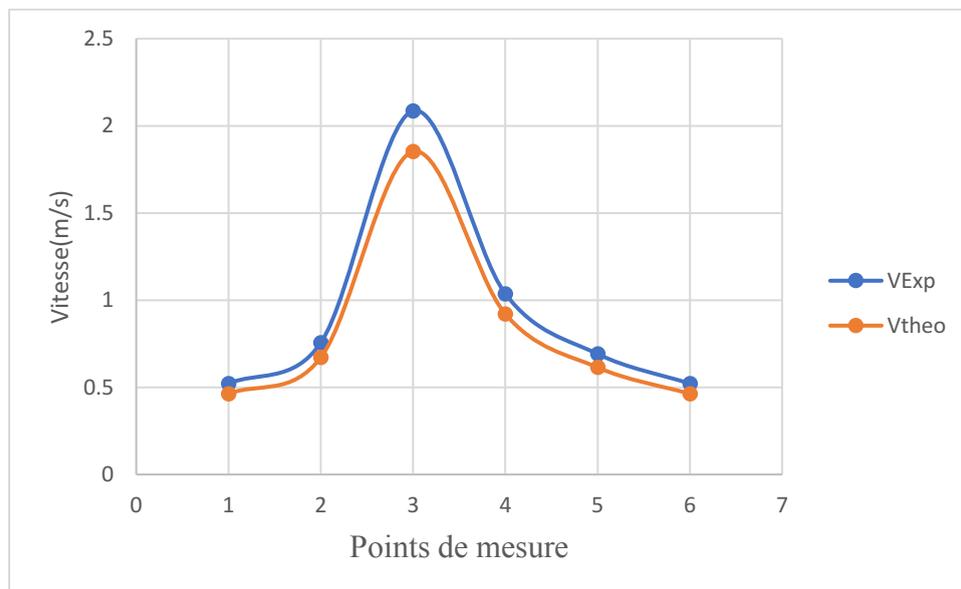
**Fig. 02** : Variation des pertes de charges expérimental et théorique le long du tube de Venturi.

La perte de charge expérimentale et théorique dans un tube de Venturi peut présenter des variations en raison des différences entre les conditions réelles et les modèles théoriques utilisés.

## TP N°3 : Régime d'écoulement

La perte de charge théorique est calculée à l'aide de modèles mathématiques et d'équations basés sur les principes de conservation de l'énergie et de conservation de la masse. Ces modèles supposent souvent des conditions idéales, telles qu'un écoulement parfaitement uniforme, sans turbulence ni pertes d'énergie supplémentaires. Par conséquent, la perte de charge théorique peut différer de la réalité expérimentale.

La perte de charge expérimentale est mesurée directement en effectuant des mesures sur le système réel. La perte de charge expérimentale tient compte des effets réels tels que la turbulence, les frottements, les variations de pression, les pertes d'énergie supplémentaires et les imperfections du système.



**Fig. 03** : Variation des vitesses expérimental et théorique le long du tube de Venturi.

Lorsque le fluide s'écoule à travers la section rétrécie du tube de Venturi, la vitesse du fluide augmente en raison de la diminution de la section transversale. Cela est dû à la conservation de la masse, selon laquelle le débit massique du fluide reste constant. En conséquence, une plus grande quantité de fluide doit passer à travers une section plus petite, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse.

## **TP N°3 : Régime d'écoulement**

---

Dans la section élargie du tube, la vitesse du fluide diminue pour rétablir la section transversale d'origine. Cela est également dû à la conservation de la masse, où une plus grande section permet une réduction de la vitesse pour maintenir le débit massique constant.

La vitesse théorique est calculée à l'aide des principes de conservation de l'énergie et de conservation de la masse, en supposant généralement un écoulement idéalisé sans pertes d'énergie supplémentaires. Les modèles théoriques utilisent des équations telles que l'équation de Bernoulli et l'équation de continuité pour estimer la variation de vitesse le long du tube de Venturi. Selon ces modèles, la vitesse du fluide augmente à mesure qu'il passe par la section rétrécie et diminue à mesure qu'il se rétablit dans la section élargie du tube.

Cependant, dans la réalité expérimentale, les variations de vitesse peuvent différer des prédictions théoriques en raison de plusieurs facteurs. Les pertes d'énergie dues à la turbulence, aux frottements, aux variations de pression et à d'autres effets réels peuvent affecter la vitesse réelle du fluide. De plus, des imperfections dans la géométrie du tube, telles que la rugosité interne, peuvent également avoir un impact sur la distribution de la vitesse.

#### I. But

Le but de la manipulation est d'étudier et de mettre en évidence les différents régimes d'écoulements : régime laminaire, régime turbulent et régime transitoire.

#### II. Rappel théorique

Il existe plusieurs régimes d'écoulements présentant entre eux de différences essentielles.

Depuis longtemps, les hydrauliciens avaient constaté l'existence de ces différents régimes. Mais c'est à OSBORNE REYNOLDS qu'il appartenait de les mettre expérimentalement en évidence et de dégager le critère permettant de les différencier.

En raison de la multiplicité des conditions qui régissent un écoulement et de la diversité des solides guidant la masse liquide, il était difficile de dégager un paramètre permettant de servir de critère à un type d'écoulement donné.

Si on désigne par  $U$  la vitesse moyenne dans le tube, par  $D$  le diamètre intérieur du tube et par  $\nu$  le coefficient de viscosité cinématique du liquide en mouvement, le nombre adimensionnel appelé nombre de REYNOLDS est défini comme suit :

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Ce nombre peut servir à caractériser le régime d'écoulement. Il représente le rapport des forces d'inertie et de turbulence aux forces de viscosité.

## **TP N°3 : Régime d'écoulement**

---

Un débit laminaire démontre une condition stable dans laquelle toutes les lignes aérodynamiques suivent des chemins parallèles. Dans cette condition, le colorant demeure facilement identifiable comme tout solide.

Un débit turbulent démontre une condition instable dans laquelle les lignes aérodynamiques agissent l'une sur l'autre, provoquant un effondrement de la surface et le mélange du fluide. Dans cette condition, le colorant se disperse lors de la turbulence.

Lorsque le débit augmente, la transition d'un débit laminaire à un débit turbulent est un procédé par étape. Cette zone de changement est appelée débit transitionnel. Elle prendra la forme d'un courant de colorant vagabond avant que la dispersion n'intervienne.

### **III. Appareillage**

Appareil d'OSBORNE REYNOLDS (voir schéma), chronomètre, éprouvette graduée, thermomètre et règle graduée.

### **IV. Mode Opérateur**

Remplir le réservoir de colorant, placer l'appareil sur banc et relier le tuyau d'entrée à l'alimentation du banc. Rabaisser l'injecteur de colorant jusqu'il soit juste au-dessus de l'entrée évasée. Remplir lentement le réservoir à hauteur constante jusqu'au niveau du déversoir, puis fermer la vanne d'entrée. Ouvrir et fermer la vanne de régulation du débit afin de faire rentrer de l'eau dans le tuyau de visualisation du débit. Attendre au moins dix minutes avant de continuer. Mesurer la température de l'eau.

Ouvrir légèrement la vanne d'entrée jusqu'à ce que l'eau s'égoutte du tuyau de sortie. Ouvrir en partie la vanne de régulation et régler la vanne de régulation du colorant jusqu'à ce que le colorant s'écoule lentement. Relever le débit.

## TP N°3 : Régime d'écoulement

---

Répéter l'opération pour des débits grandissants en ouvrant progressivement la vanne de régulation du débit. Relever la mesure du débit en condition critique.

Répéter l'opération pour des débits de plus en plus petits en relevant la mesure du débit en condition critique.

### **Observer et remarquer que :**

- Pour les débits faibles : le colorant est amené vers le centre du tuyau et se présente sous la forme d'un filet coloré parfaitement net.
- Pour les débits plus importants le filet coloré devient sinueux, il paraît osciller et vibrer.
- Pour les débits beaucoup plus importants le filet coloré se rompt, il ne conserve plus sa forme initiale et se disperse dans l'eau de telle sorte que tout le fluide acquiert une coloration uniforme.

### **V. Travail demandé**

- Mesurer la température de l'eau
- Déterminer le diamètre intérieur du tube transparent en utilisant le volume occupé par l'eau dans le tube ainsi que la dimension de sa hauteur.
- Déterminer la viscosité cinématique de l'eau
- Dresser le tableau suivant :

Condition visuelle du colorant	Volume en litres (L)	Temps en seconde (S)	Débit Q en L/S	Nombre de Reynolds

- Déterminer la vitesse critique  $V_{1cr}$  : début du régime Turbulent.
- Déterminer le nombre de Reynolds correspondant.

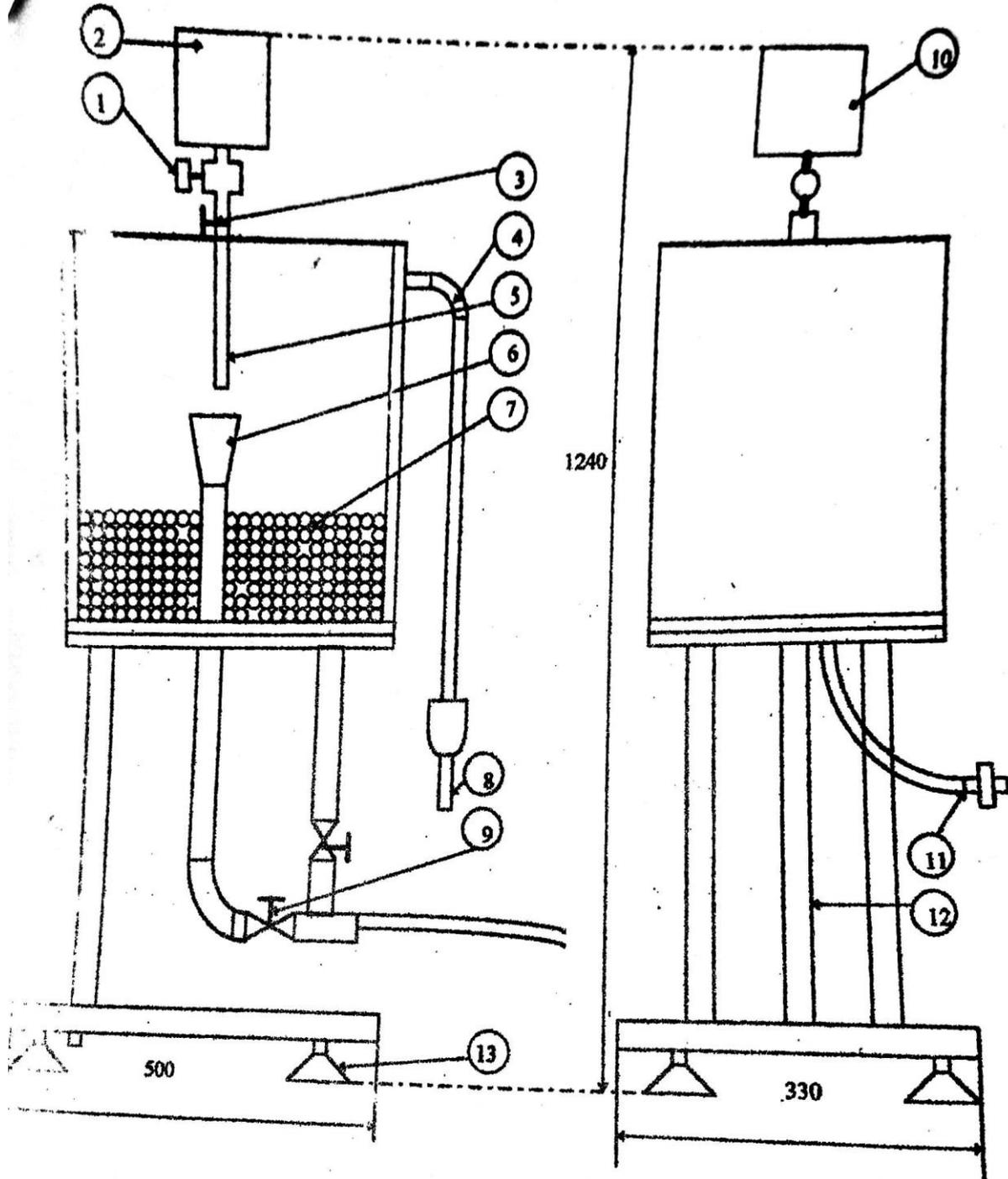
## **TP N°3 : Régime d'écoulement**

---

- g)** Déterminer la vitesse critique  $V_{2cr}$  : début du régime Laminaire.
- h)** Déterminer le nombre de Reynolds correspondant.
- i)** Faire un calcul d'erreurs
- j)** Commenter la partie " Observer et remarquer" citée plus haut.
- k)** Conclusion

## TP N°3 : Régime d'écoulement

### SCHEMA D'INSTALLATION DE L'APPAREIL D'OSBORNE REYNOLDS



- (1) : vanne de réglage du colorant
- (2) : réservoir de colorant
- (3) : vis de réglage de la position du tube hypodermique
- (4) : tuyau de trop-plein
- (5) : tube hypodermique
- (6) : entrée ovale
- (7) : billes de verre

- (8) : tuyau de sortie flexible
- (9) : vanne de régulation de débit
- (10) : réservoir à hauteur constante
- (11) : tuyau d'alimentation
- (12) : tuyau de visualisation du débit
- (13) : pieds de réglage

### VI. Résultats et Calcul

#### a. Mesure la température de l'eau

Pour mesurer la température de l'eau, vous pouvez utiliser un thermomètre approprié. Plongez la sonde du thermomètre dans l'eau et laissez-l'y rester pendant quelques instants pour permettre à la température de se stabiliser. Ensuite, lisez la valeur affichée sur le thermomètre, qui correspondra à la température de l'eau. Assurez-vous de prendre en compte les éventuelles incertitudes de mesure indiquées par le thermomètre. On trouve que la température de l'eau soit  $T=25\text{ C}$ .

#### b. Détermination le diamètre intérieur du tube transparent

Pour déterminer le diamètre intérieur du tube transparent, vous pouvez utiliser la relation entre le volume d'eau contenu dans le tube et les dimensions de la hauteur du tube. La formule pour calculer le volume d'un cylindre est donnée par

$$:V = \pi * r^2 * h$$

Où  $V$  est le volume,  $r$  est le rayon (demi-diamètre) et  $h$  est la hauteur du cylindre.

Si vous connaissez le volume occupé par l'eau dans le tube ainsi que la hauteur du tube, vous pouvez réarranger l'équation pour résoudre le rayon

$$:r = \sqrt{(V / (\pi * h))}$$

En utilisant cette formule, vous pouvez calculer le rayon et ensuite le diamètre en multipliant le rayon par 2.

Assurez-vous d'utiliser les unités appropriées pour le volume et la hauteur (par exemple, mètres cubes pour le volume et mètres pour la hauteur) afin d'obtenir des résultats cohérents.

## TP N°3 : Régime d'écoulement

Soit  $D_c = 10 \times 10^{-3}(m)$

### c. Détermination la viscosité cinématique de l'eau

À une température de  $27\text{ }^\circ\text{C}$ , la viscosité cinématique de l'eau peut être obtenue en utilisant les données du National Institute of Standards and Technology (NIST). Selon les valeurs fournies par le NIST, à une température de  $27\text{ }^\circ\text{C}$ , la viscosité dynamique de l'eau est d'environ  $0,8681 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$  (pascal-seconde).

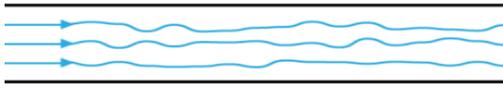
La densité de l'eau à  $27\text{ }^\circ\text{C}$  est d'environ  $997,1\text{ kg/m}^3$ . En utilisant ces valeurs, nous pouvons calculer la viscosité cinématique de l'eau :  $\nu = \mu / \rho$

$$\nu = (0,8681 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}) / (997,1\text{ kg/m}^3)$$

$$\nu \approx 8,705 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$$

Ainsi, à une température de  $27\text{ }^\circ\text{C}$ , la viscosité cinématique de l'eau est d'environ  $8,705 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ .

### d. Le tableau

Condition visuelle du colorant	Volume (m <sup>3</sup> )	Temps (s)	Débit Q en m <sup>3</sup> /s	Nombre de Reynolds
	0.0005	220	$2.27 \times 10^{-6}$	332.37
	0.0005	30	$1.67 \times 10^{-5}$	2437.41
	0.0005	20	$2.50 \times 10^{-5}$	3656.11

### e. Détermination la vitesse critique V1cr

Pour déterminer expérimentalement la vitesse critique V1cr du début du régime turbulent, vous pouvez effectuer une expérience de débit dans le tube, et observer le point de transition entre le régime laminaire et le régime turbulent. Voici les étapes générales pour effectuer cette mesure :

- Mettez en place votre système de mesure du débit.
- Commencez par un débit faible et augmentez progressivement la vitesse du fluide.
- À mesure que vous augmentez le débit, observez le comportement du flux. Vous noterez un point où le flux devient irrégulier, avec des tourbillons et des perturbations significatives. Ce point marque le début du régime turbulent.
- À ce stade, notez la vitesse du fluide, qui correspond à la vitesse critique V1cr.

### f. Détermination le nombre de Reynolds correspondant à la vitesse critique

Pour déterminer le nombre de Reynolds correspondant à la vitesse critique, vous devez connaître les dimensions du système (le diamètre du tube) et les propriétés du fluide (densité et viscosité). En utilisant ces informations, vous pouvez calculer le nombre de Reynolds en utilisant la formule suivante :  $Re = (\rho * V * L) / \mu$

### g. Détermination la vitesse critique V2cr

Suivez les mêmes étapes précédentes:

- Mettez en place votre système de mesure du débit.
- Commencez par un débit élevé et diminuez progressivement la vitesse du fluide.

## TP N°3 : Régime d'écoulement

---

- À mesure que vous diminuez le débit, observez le comportement du flux. Vous noterez un point où le flux devient régulier, avec un écoulement lisse et sans perturbations significatives. Ce point marque le début du régime laminaire.
- À ce stade, notez la vitesse du fluide, qui correspond à la vitesse critique  $V_{2cr}$ .

### **h. Détermination le nombre de Reynolds correspondant à la vitesse critique**

(Voir question f)

#### **i. Calcul d'erreurs**

Pour effectuer un calcul d'erreur entre le Reynolds expérimental ( $Re_{exp}$ ) et le Reynolds tabulé ( $Re_{tab}$ ), vous pouvez utiliser la formule suivante :

$$\text{Erreur} = |Re_{exp} - Re_{tab}|$$

Cela vous donnera la différence absolue entre les deux valeurs de Reynolds. Si vous souhaitez exprimer cette erreur en pourcentage, vous pouvez utiliser la formule suivante :

$$\text{Erreur en pourcentage} = (|Re_{exp} - Re_{tab}| / Re_{tab}) * 100$$

Cela vous donnera l'erreur relative en pourcentage entre les deux valeurs de Reynolds. Cette mesure vous permettra de quantifier l'écart entre les résultats expérimentaux et les valeurs tabulées.

### **j. Commenter la partie " Observer et remarquer"**

La partie "Observer et remarquer" décrit les observations visuelles faites lors de l'expérience.

**1. Débits faibles :** Lorsque le débit est faible, le colorant est amené vers le centre du tuyau de manière régulière et le filet coloré est parfaitement net. Cela indique un écoulement laminaire, où les couches de fluide se déplacent de manière ordonnée et parallèle les unes aux autres. L'absence d'oscillations ou de turbulences dans le filet coloré est caractéristique de cet écoulement régulier.

**2. Débits plus importants :** À mesure que le débit augmente, le filet coloré devient sinueux, oscille et vibre. Cela suggère la transition vers un écoulement turbulent. Les turbulences et les tourbillons dans le fluide perturbent le trajet du colorant, ce qui se manifeste par des oscillations et des ondulations dans le filet coloré.

**3. Débits beaucoup plus importants :** Lorsque le débit devient encore plus important, le filet coloré se rompt et se disperse dans l'eau, ce qui donne une coloration uniforme à tout le fluide. Cette observation est caractéristique d'un écoulement entièrement turbulent, où les turbulences sont si intenses que la structure initiale du filet coloré n'est plus maintenue.

### **k. Conclusion**

Cette expérience a permis de caractériser le comportement de l'écoulement de l'eau dans le tube en fonction du débit, d'observer les transitions entre les régimes laminaire et turbulent, et de quantifier les propriétés de l'écoulement à l'aide de mesures et de calculs. Les résultats obtenus fournissent des informations précieuses sur les propriétés du fluide et les conditions d'écoulement.

Compléter la conclusion en se basant sur les points suivants :

## TP N°3 : Régime d'écoulement

---

- Température de l'eau :
- Diamètre intérieur du tube transparent :
- Viscosité cinématique de l'eau :
- Vitesse critique  $V_{1cr}$  et nombre de Reynolds correspondant :
- Vitesse critique  $V_{2cr}$  et nombre de Reynolds
- Calcul d'erreurs :

### TP N°4 : Mesure de débit

#### I. Introduction

Dans ce travail pratique, nous nous concentrons sur la mesure de débit, un élément clé dans de nombreux domaines de l'ingénierie et des sciences des fluides. Nous explorons trois méthodes populaires pour mesurer le débit : la méthode du bécher, la méthode du réservoir et la méthode du tube Pitot. Chaque méthode présente des avantages spécifiques en fonction des besoins et des conditions expérimentales. Au cours de ce TP, nous examinons les principes de fonctionnement, les équipements nécessaires et les procédures pour chaque méthode. L'objectif est de comparer ces techniques de mesure de débit et d'acquérir une meilleure compréhension de leurs applications pratiques.

#### II. Objectifs

L'expérience consiste à comprendre et étudier des méthodes de mesure de vitesse et de débit à l'aide d'un débitmètre. Les objectifs de ce TP sont :

1. Appliquer les notions de conservation de masse et de l'énergie.
2. Mesurer les temps de remplissage d'un tube gradué.
3. Mesurer les volumes pour chaque temps de remplissage.
4. déterminer la vitesse moyenne et le débit volumique théorique et expérimental.
5. Déterminer l'erreur absolue moyenne pour chaque expérience.

Dans ce TP, nous abordons les méthodes de mesure des vitesses et des débits. Les deux grandeurs vitesse et débit sont reliées par des équations vues dans le cours de physique. Mais, à ce stade, il importe de bien distinguer la vitesse moyenne de la vitesse locale. Par exemple, connaissant la section d'un écoulement et une mesure de son débit volumique, on ne pourra en déduire que

sa vitesse moyenne  $V_{moy} = Q_v / S$

## TP N°4 : Mesure de débit

---

Inversement, une mesure de vitesse locale est insuffisante pour connaître le débit. C'est la raison pour laquelle, les deux types de mesure (de vitesse et de débit) peuvent être menés de façon dépendante, ou de façon couplée.

### III. Notions théoriques

#### La sonde de Pitot (« Pitot tube »)

- Elle est constituée par un jeu de deux tubes : un tube qui donne accès à la pression statique en un point de la section
- Un tube qui donne accès à la pression dynamique en ce même point

La différence de ces deux pressions, mesurée par un manomètre différentiel, permet d'avoir une image de la vitesse du fluide sur la ligne de mesure.

En notant  $S$  la section de la canalisation, et  $\rho$  la masse volumique du fluide :  $P_{tot} = P_{stat} + P_{dyn}$  Soit :  $P_{dyn} = P_{tot} - P_{stat}$  ce qui donne :

$$\frac{1}{2} * \rho * V^2 = P_{tot} - P_{dyn} = \Delta P$$

D'où la mesure de la vitesse du fluide, au point d'impact du tube de Pitot :

$$V = \sqrt{2 \times \frac{\Delta P}{\rho}}$$

$$V = \sqrt{2 \times g \times \Delta h}$$

Et, si la vitesse du fluide peut être considérée comme uniforme sur toute la section  $S$  de la canalisation :

### IV. Mode opératoire

- Matériel :

Chronomètre

Débitmètre

Réservoir

Becher.

Pour mesurer le volume d'un liquide avec une bonne précision, on utilisera une éprouvette graduée. Attention, pour la lecture du volume, Il faut regarder où se situe le bas du ménisque formé par l'eau, en mettant son œil au niveau de ce ménisque.

### ERREUR ABSOLUE

Elle est appelée absolue, car elle est le résultat de la valeur absolue de la différence entre d'une part la valeur réelle de la grandeur que l'on mesure et d'autre part une valeur de référence que nous avons choisie comme une bonne approximation de celle-ci.

Elle est donc toujours un nombre positif.

$$\text{Erreur absolue : } \Delta E_i = |Q_{v,i} - Q_{v,j}|$$

Exemple de l'expérience 1, l'erreur absolue devient sous forme suivante : on a 3 tests

$$\Delta E_1 = |Q_{v,1} - Q_{v,2}|, \Delta E_2 = |Q_{v,1} - Q_{v,3}| \text{ et } \Delta E_3 = |Q_{v,3} - Q_{v,2}|$$

$$\text{Erreur absolue moyenne : } \Delta E_{moy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^3 \Delta E_i$$

Les résultats des mesures effectuées de la grandeur Q, doivent être présentés sous la forme :

$$Q_{v,moy} = Q_{v,moy} \pm \Delta E_{moy}$$

1. Mesurez le volume de l'eau.

## TP N°4 : Mesure de débit

---

2. Calculer le débit massique et volumique
3. Calculer la vitesse moyenne.
4. Calculer l'erreur absolue moyenne.

### V. Travail demandé

1. Remplir le tableau (1) et (2),
2. Comparer entre les erreurs absolues moyenne de l'expérience de Bécher et de réservoir.
3. Discuter les résultats. Quelles sont vos conclusions ?

**D=10 (mm)**

Tableau 1 ( exp 1)	Becher			Réservoir		
Débitmètre (m <sup>3</sup> /s)						
Volume(m <sup>3</sup> )						
Temps (s)						
Qi(m <sup>3</sup> /s)						
Qmoy (m <sup>3</sup> /s)						
ΔEi (m <sup>3</sup> /s)						
ΔEmoy						
$Q_{v,moy} \pm \Delta E_{moy}(m^3/s)$						
Débit massique (kg/s)						
Vitesse moyenne(m/s)						
h1(m)						
h2 (m)						
V (m/s)						
Qth (m <sup>3</sup> /s)						

## TP N°4 : Mesure de débit

Tableau 2 (exp2)	Becher			Réservoir		
Débitmètre (m <sup>3</sup> /s)						
Volume(m <sup>3</sup> )						
Temps (s)						
Qi(m <sup>3</sup> /s)						
Qmoy (m <sup>3</sup> /s)						
ΔEi (m <sup>3</sup> /s)						
ΔEmoy						
$Q_{v,moy} \pm \Delta E_{moy}$ (m <sup>3</sup> /s)						
Débit massique (kg/s)						
Vitesse moyenne(m/s)						
h1(m)						
h2 (m)						
V (m/s)						
Qth (m <sup>3</sup> /s)						

### VI. Résultats et Calcul

#### 1. Tableau 1

	Becher			Réservoir		
<b>Débitmètre (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>1.6710<sup>-4</sup></b>			<b>1.67*10<sup>-4</sup></b>		
<b>Volume(m<sup>3</sup>)</b>	0.0005	0.001	0.002	0.01	0.02	0.03
<b>Temps (s)</b>	3	6	13	47	90.9	120
<b>Qi(m<sup>3</sup>/s)</b>	1.67*10 <sup>-04</sup>	1.67*10 <sup>-4</sup>	1.54*10 <sup>-4</sup>	2.13*10 <sup>-4</sup>	2.20*10 <sup>-04</sup>	2.50*10 <sup>-4</sup>
<b>Qmoy (m<sup>3</sup>/s)</b>	1.62*10 <sup>-04</sup>			2.28*10 <sup>-04</sup>		
<b>ΔEi (m<sup>3</sup>/s)</b>	0	1.28*10 <sup>-5</sup>	1.28*10 <sup>-5</sup>	7.26*10 <sub>6</sub>	3.72*10 <sup>-5</sup>	3.00*10 <sup>-5</sup>
<b>ΔEmoy</b>	8.55*10 <sup>-6</sup>			2.48*10 <sup>-5</sup>		
<b><math>Q_{v,moy} \pm \Delta E_{moy}</math> (m<sup>3</sup>/s)</b>	0.000162 ±0.000009			0.000228 ±0.000025		
<b>Débit massique (kg/s)</b>	1.67*10 <sub>1</sub>	1.67*10 <sup>-1</sup>	1.54*10 <sup>-1</sup>	2.13*10 <sub>1</sub>	2.20*10 <sup>-1</sup>	2.50*10 <sup>-1</sup>
<b>Vitesse moyenne(m/s)</b>	6.04*10 <sup>-1</sup>			8.47*10 <sup>-1</sup>		
<b>h1(m)</b>	0.3			0.3		
<b>h2 (m)</b>	0.152			0.152		
<b>V (m/s)</b>	1.721			1.721		

## TP N°4 : Mesure de débit

Qth (m <sup>3</sup> /s)	4.62*10 <sup>-4</sup>	4.62*10 <sup>-4</sup>
-------------------------	-----------------------	-----------------------

### 2. Comparaison entre les erreurs absolues

- Pour l'expérience du Bécher, l'erreur absolue moyenne est donnée par  $\Delta E_{\text{moy Bécher}} = 8.55 \times 10^{-6}$ .
- Pour l'expérience du réservoir, l'erreur absolue moyenne est donnée par  $\Delta E_{\text{moy Réservoir}} = 2.48 \times 10^{-5}$ .
- Comparant les deux erreurs absolues moyennes, on constate que  $\Delta E_{\text{moy Bécher}} = 8.55 \times 10^{-6}$  et  $\Delta E_{\text{moy Réservoir}} = 2.48 \times 10^{-5}$ .

On peut conclure que l'expérience du Bécher présente une erreur absolue moyenne inférieure à celle de l'expérience du réservoir. Cela indique que la méthode du Bécher est plus précise dans la mesure du débit par rapport à la méthode du réservoir. Cependant, il est important de noter que la précision des mesures peut également dépendre d'autres facteurs tels que les conditions expérimentales, la manipulation des instruments, etc.

Il convient également de mentionner que les erreurs absolues moyennes sont calculées à partir des valeurs fournies dans le tableau et peuvent être soumises à des limitations et des incertitudes inhérentes à la méthode de mesure utilisée. Par conséquent, il est toujours recommandé de prendre en compte ces facteurs lors de l'interprétation et de la comparaison des résultats expérimentaux.

### 3. Conclusion

Après avoir analysé les données et les résultats expérimentaux du tableau, on peut conclure :

- ❖ Comparaison des mesures de débit : Les mesures de débit obtenues à l'aide du débitmètre, du Bécher et du réservoir sont toutes proches les unes des autres. Cela suggère une certaine cohérence dans les résultats des différentes méthodes de mesure utilisées.
- ❖ Erreurs absolues moyennes : Les valeurs des erreurs absolues moyennes pour les expériences du Bécher et du réservoir sont relativement faibles,

## TP N°4 : Mesure de débit

---

ce qui indique une bonne précision dans les mesures de débit. Cependant, l'erreur absolue moyenne pour l'expérience du Bécher ( $\Delta E_{moy\_Becher}$ ) est légèrement inférieure à celle de l'expérience du réservoir ( $\Delta E_{moy\_Reservoir}$ ), ce qui suggère une précision légèrement supérieure avec la méthode du Bécher.

- ❖ Débit massique et vitesse moyenne : Les valeurs du débit massique et de la vitesse moyenne varient en fonction du volume et du temps.
- ❖ Les débits expérimentaux mesurés à l'aide du Bécher sont généralement inférieurs au débit théorique calculé par la méthode du tube Pitot. Cela peut indiquer une certaine sous-estimation du débit réel lors de l'utilisation du Bécher comme méthode de mesure.
- ❖ Les débits expérimentaux mesurés à l'aide du réservoir sont généralement proches du débit théorique calculé par la méthode du tube Pitot. Cela indique une bonne correspondance entre les mesures expérimentales et les valeurs théoriques attendues.

### Notes

Si les débits expérimentaux mesurés avec le Bécher et le réservoir sont proches du débit théorique calculé par la méthode du tube Pitot, cela suggère une bonne concordance entre les mesures expérimentales et les prédictions théoriques. Cela indiquerait que les méthodes de mesure utilisées sont relativement précises et que les résultats expérimentaux sont fiables. Cependant, si les débits expérimentaux diffèrent considérablement du débit théorique, cela peut indiquer des erreurs expérimentales ou des inexactitudes dans les calculs théoriques. Des facteurs tels que des pertes de charge, des fuites, des erreurs de mesure ou des approximations dans les équations utilisées peuvent contribuer à ces divergences.

## **TP N°4 : Mesure de débit**

---

Il est donc important de comparer les débits théoriques et expérimentaux pour évaluer la validité des méthodes de mesure utilisées et identifier d'éventuelles sources d'erreur.