

République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Saad-Dahleb Bliida

Institut d'aéronautique

Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'études
Universitaire Appliquée en aéronautique

Option : Propulsion

Thème :

**Etude de conception et de réalisation d'un
banc d'essai de tube de venturi**

Réaliser par :

- ✍ KOUADRI Khaled.
- ✍ LAKHAL Mohamed.

Promoteur :

Mr. ABADA Omar

Co-promoteur:

Mr. ABDALLAH Hirtzi

Année universitaire 2007/2008.

Remerciement

Avant tout et pour tout nous remercions dieu.

- ✓ Nous remercions notre promoteur qui par son aide et conseil nous terminons ce travail.
- ✓ Nous remercions notre Co-promoteur Abdallah qu'il nous aider beaucoup.
- ✓ Nous tient remercie Mr ZEBBICHE pour avoir accepté de présider le jury.
- ✓ Nous remercions Mr CHEGRANI pour avoir accepté d'être membres du jury.
- ✓ Nous aimons aussi remercie tout les enseignant de département aéronautique pour son aide de formation des techniciens en aéronautique.
- ✓ Nous remercions la société de KADRI MIROIRE pour son aide.
- ✓ Finalement, nous remercions toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- ✚ A Mes très chères parents que le dieu me les protéger.
- ✚ A Mes très chères sœurs et mon frère Ahmed.
- ✚ A Ma sœur fatma et sa marie Djmoui.
- ✚ A tout ma famille surtout mes cousins surtout Mohamed, Saych, Ibrahim.
- ✚ A Mon binôme et toute sa famille.
- ✚ A tout mes amis à Ouargla chacun par son nom surtout Djamel.
- ✚ A tout mes amis chez Blida surtout ma promotion 2007/2008.
- ✚ A tout que me connais.

Khaled.

Dédicace

Je dédie ce travail ;

- Aux les plus chers dans ma vie : ma mère et mon père

- Aux tous mes frères et mes sœurs surtout halloma.

- A tous ma famille surtout sousdi.

- A tous mes amis chacun par son nom.

- A mon binôme et toute sa famille.

Mohamed.

Liste des abréviations

V : la vitesse.

P : la pression.

P_{at} : la pression atmosphérique.

q_m : le débit massique.

q_v : le débit volumique.

\vec{F} : La force.

ρ : la masse volumique.

d : la densité.

S : la section.

g : l'accélérateur de la pesanteur.

H : la hauteur.

ν : La viscosité cinématique.

η : La viscosité.

Mcf : mètre colonne fluide.

mmcf : millimètre colonne fluide.

Listes des figures et tableaux

Listes des figures :

Figure (1.1) : force de pression exerce sur la surface S.....	05
Figure (1.2) : l'équilibre d'un cylindre dans le champ de pesanteur.....	06
Figure (1.3) : Isobares et équipotentielle sont confondues.....	08
Figure (1.4) : liquides superposés non miscibles.....	12
Figure (1.5) : deux liquides non miscibles dans un tube en U.....	12
Figure (1.6) : baromètre à mercure.....	12
Figure (1.7) deux corps émergés dans un fluide homogène au repos.....	13
Figure (1.8) Tube et filet de courant.....	17
Figure (1.9) la vitesse moyenne d'un écoulement.....	18
Figure (1.10) la vitesse en fonction de hauteur z.....	19
Figure (1.11) différentes types d'écoulement.....	23
Figure (1.12) les pertes de charge la long d'un tube cylindrique.....	23
Figure (1.13) différence de pression le long d'un tube cylindrique.....	26
Figure (2.1) Expérience de balle de bing-bong.....	29
Figure (2.2) Expérience des Papiers Aspirés.....	30
Figure (2.3) écoulement dans un divergent.....	30
Figure (2.4) écoulement dans une conduite.....	33
Figure (2.5) Ecoulement dans une pompe.....	35
Figure (2.6) Tube de Pitot.....	36
Figure (2.7) Ecoulement dans Un réservoir.....	37
Figure (2.8) Tube de venturi.....	38
Figure (2.9) : ligne de courant.....	41
Figure (2.10) : différence de pression entre deux points.....	42
Figure (2.11) : différence de pression avec les sections divers.....	43
Figure (2.12) : tube de venturi.....	46
Figure (2.13) : la table des manomètres.....	46
Figure (2.14) : banc hydraulique de tube de venturi.....	47
Figure (2.15) : l'installation de venturi.....	47
Figure (2.16) : courbe de débit volumique de rotamètre en fonction de différence de hauteur.....	48
Figure (2.17) : graphe de k en fonction de débit volumique de rotamètre.....	49
Figure (2.18) : ligne de courant dans un venturi.....	50

Figure (2.19) : répartition de pression théorique et pratique.....	51
Figure (3.1) : cône en verre transparent.....	53
Figure (3.2) : Les cônes après le perçage.....	54
Figure (3.3) : les prises de pression.....	55
Figure (3.4) : Assemblage de tube de venturi.....	55
Figure (3.5) : Schéma dimensionnelle de tube de venturi.....	56
Figure (3.6) : le support.....	57
Figure (3.7) : Schéma dimensionnelle de support.....	58
Figure (3.8) : vue complète de tube de venturi.....	58
Figure (3.9) : la table.....	59
Figure (3.10) : Tableau d'affichage.....	60
Figure (3.11) : tube de mesure (hauteur de pression).....	61
Figure (3.12) : L'assemblage (table + tableau + tube de mesure).....	62
Figure (3.13): Schéma dimensionnelle de réservoir.....	63
Figure (3.14) : le réservoir.....	64
Figure (3.15) : L'assemblage (figure (3.13) + figure (3.14)).....	64
Figure (3.16) : la pompe.....	65
Figure (3.17) : L'assemblage (figure (3.15) + figure (3.16)).....	66
Figure (3.18) : la vanne.....	66
Figure (3.19) : Positions des vannes dans le banc d'essais.....	67
Figure (3.20) : les tubes de canalisation.....	68
Figure (3.21) : schéma de banc d'essais de tube de venturi.....	70
Figure (4.1) : les trous des prises de pression.....	71
Figure (4.2) : les contraintes exercées sur le col.....	72
Figure (4.3) : les deux coquais de support.....	73
Figure (4.4) : le tube et leur support.....	73
Figure (4.5) : l'assemblage de tube avec le support.....	74
Figure (4.6) : la table réelle de banc.....	75
Figure (4.7) : la burette utilisée comme un manomètre.....	76
Figure (4.8) : le réservoir réel de banc.....	76
Figure (4.9) : caractéristique de la pompe.....	77
Figure (4.10) : la coupe courant	77

Figure (4.11) : la vanne réelle.....	78
Figure (4.12) : l'éprouvette.....	78
Figure (4.13) : la forme finale de banc	79
Figure (5.1) : graphe d'énergie cinétique en fonction de longueur de tube « 1ere manipulation ».....	83
Figure (5.2) : graphe de pression statique en fonction de longueur de tube « 1ere manipulation ».....	84
Figure (5.3) : graphe de pression totale en fonction de longueur de tube « 1ere manipulation ».....	85
Figure (5.4) : graphe d'énergie cinétique en fonction de longueur de tube « 2eme manipulation ».....	87
Figure (5.5) : Graphe de pression statique en fonction de longueur de tube « 2 eme manipulation ».....	87
Figure (5.6) : graphe de pression totale en fonction de longueur de tube « 2eme manipulation ».....	88
Figure (5.7) : graphe d'énergie cinétique en fonction de longueur de tube « 3eme manipulation ».....	90
Figure (5.8) : graphe de pression totale en fonction de longueur de tube « 2eme manipulation ».....	91
Figure (5.9) : graphe de pression totale en fonction de longueur de tube « 3eme manipulation ».....	92

Liste des tableaux :

Tableau (5.1) : différentes valeurs de volumes et de temps.....	81
Tableau (5.2) : différentes valeurs de débit.....	81
Tableau (5.3) : calcule des vitesses d'écoulement.....	81
Tableau (5.4) : calcul d'énergies cinétiques.....	82
Tableau (5.5) : les hauteurs manométriques.....	82
Tableau (5.6) : calcule de pression totale dans différentes prises de pression.....	83
Tableau (5.7) : les volumes et les temps de deuxième manipulation.....	84
Tableau (5.8) : calcule des débits de deuxième manipulation.....	84
Tableau (5.9) : calcule des vitesses d'écoulement de deuxième manipulation.....	84
Tableau (5.10) : calcul d'énergies cinétiques de deuxième manipulation.....	85
Tableau (5.11) : les hauteurs manométriques de deuxième manipulation.....	85
Tableau (5.12) : calcule de pression totale dans différentes prises de pression de deuxième manipulation.....	86
Tableau (5.13) : les volumes et les temps de troisième manipulation.....	87
Tableau (5.14) : calcule des débits de troisième manipulation.....	87
Tableau (5.15) : calcule des vitesses d'écoulement de troisième manipulation.....	88
Tableau (5.16) : calcul de pression dynamique de troisième manipulation.....	88
Tableau (5.17) : les hauteurs manométriques de troisième manipulation.....	89
Tableau (5.18) : calcule de pression totale dans différentes prises de pression de troisième manipulation.....	89

Résumé

Notre présent travail constitue en une contribution à une meilleure connaissance de tube de venturi, nous avons faire une conception de tube de venturi ou nous avons donnés les schémas de chaque composant dans l'appareil, après nous passons vers notre réalisation où nous prend en considération toutes les mesures et les dimensions dans la conception ,dans la dernière parties nous avons faire les manipulations(03 manipulations) pour assurer le bon fonctionnement de notre appareille, a travers de ces manipulations nous avons confirmés que notre appareille est peut être met comme un banc de test pour faire les travaux pratiques.

ملخص

إن عملنا هذا يمكننا من معرفة جيدة لأنبوبة " venturi "، في بادئ الأمر قمنا بدراسة مشروع انجاز جهاز التجريب لأنبوبة بالمرحلة الأولى ألا وهي التخطيط التي قمنا فيها بافتراض القياسات الخاصة بكل عنصر والتي تناسبنا أخذًا بعين الاعتبار الحجم و الموقع، عندما تكونت لدينا الفكرة كاملة بدأنا بالإنشاء وذلك بأخذ كل القياسات التي حددناها في مرحلة التخطيط بعين الاعتبار، ومن ثم تأتي المرحلة الأخيرة و المهمة ألا وهي إقامة بعض التجارب على جهازنا الجديد، و بعد رسم المنحنيات تأكدنا من فعالية و جودة الجهاز، الذي يستطيع الطلبة أن يقيموا فيه أعمالهم التطبيقية الخاصة بأنبوبة " venturi ".

Summary

Our present work consist of a better contribution for the knowledge of venture tube, we do the concept of venture tube were we give the diagram for each component in the project, then we go to our realization witch we are take in consideration all the measures and the sizes in the concept, and the last parts we are do the tests of our project , through of this tests we are confirm that this apparel work correctly, and that we can put our realization as of test bed for venture tube.

Table de matière

Table de matière :

REMERCIEMENT.....	I
LISTES DES FIGURES, GRAPHIQUE ET TABLEAUX	II
RESUME.....	III
INTRODUCTION.....	01
Chapitre 01 : GENERALITES SUR LA MECANIQUE DES FLUIDES.....	02
1.1. Définition du fluide	02
1.2. Liquides et gaz	02
1.3. Mécanique des fluides	03
1.3.1. Statique des fluides	05
1.3.1.1. Pression	05
1.3.1.2. Principe fondamental de l'hydrostatique	06
1.3.1.3. Statique d'un fluide incompressible dans le champ de pesanteur ; hydrostatique	09
1.3.2. Dynamique des fluides	14
1.3.2.1. Ecoulement des fluides.....	14
1.3.2.2. Le débit	16
1.3.2.3. Équation de conservation de la masse ou équation de continuité	17
1.3.2.4. Viscosité	19
1.3.2.5. Dynamique des fluides visqueux incompressibles	22
1.3.2.6. Calcul des Pertes de Charge	23
CHAPITRE 2 : EFFET DE VENTURI.....	29
2.1. Théorème de Bernoulli.....	29
2.1.1.Équation de Bernoulli pour les fluides compressibles.....	32
2.1.2. Théorème de Bernoulli pour les différents écoulements incompressibles.....	32
2.1.2.1. Théorème de Bernoulli pour un écoulement permanent d'un fluide parfait incompressible	32
2.1.2.1.1. Cas d'un écoulement (1)→(2) sans échange de travail.....	34
2.1.2.1.2. Cas d'un écoulement (1)→(2) avec échange d'énergie.....	34
2.2. Application du Théorème de Bernoulli	35
2.2.1. Tube de Pitot	35
2.2.1.1. Principe du tube de Pitot.....	36

2.2.2. Écoulement d'un liquide contenu dans un réservoir – Théorème de Torricelli.....	37
2.2.3. Effet Magnus.....	37
2.3. Effet venturi	38
2.3.1. Le Rôle de tube de venturi	39
2.3.2. Le théorie de venturi	39
2.3.2.1. étude en fluide parfait.....	39
2.3.2.2. Étude en fluide réel (visqueux)	44
2.3.3. Pertes de charges dues au venturi.....	45
CHAPITRE 03 : CONCEPTION DE BANC.....	53
3.1. Les composants de l'appareil	53
3.1.1. Le tube de venturi	53
3.1.1.1. Perçage	54
3.1.1.2. Les prises de pression	54
3.1.1.3. Assemblage	55
3.1.1.4. Les sections	56
3.1.1.5. Les longueurs (horizontale sur l'axe).....	57
3.1.2. Le support	57
3.1.3. La table	59
3.1.4. Le tableau des manomètres	60
3.1.5. Les manomètres.....	61
3.1.6. Le réservoir.....	62
3.1.7. La pompe	65
3.1.8. Les vanne	66
3.1.9. Les canalisations.....	67
3.1.10. Les coudes	68
3.1.11. Le débitmètre	68
CHAPITRE 04 : REALISATION DE BANC.....	71
4.1. Réalisation de tube de venturi	71
4.1.1. Les cônes on verre.....	71
4.1.2. Les prises de pression	72
4.1.3. Le support de tube de venturi	72
4.1.4. La table de banc d'essai	73

4.1.5. La burette	75
4.1.6. Le réservoir	76
4.1.7. La pompe d'eau	77
4.1.8. Les vannes	77
4.1.9. L'éprouvette de mesure de débit	78
4.2. Le montage de banc	79
Chapitre 5 : manipulation sur le banc	80
5.1. Le but de la manipulation	80
5.2. Manipulation sur l'appareil	80
5.2.1. Première manipulation	81
5.2.2. Deuxième manipulation	84
5.2.3. Troisième manipulation	87
5.3. Interprétation des courbes	90
CONCLUSION.....	93

Introduction générale

Introduction générale

La mécanique des fluides est constituée par la branche de la mécanique appliquée ayant traité au comportement des fluides au repos et en mouvement (statique, cinématique et dynamique des fluides).

Depuis plusieurs siècles le savant venturi Giovanni Batista pense à augmenter le débit de l'eau qui passe dans un cylindre par un tube composé de trois parties, la première est convergente, la deuxième est le col et la troisième reprisant la divergence

Dans notre travail nous avons pensés à réaliser un banc d'essai de tube de venturi. Ce travail est composé de 5 chapitres qui sont :

Le premier chapitre représente une généralité sur la mécanique des fluides qui étudie les différents types d'écoulements des fluides dans les canalisations de différentes formes. Après, nous avons passés au deuxième chapitre qui explique l'écoulement dans le tube de venturi et l'application de théorème de Bernoulli dans ce dernier, et nous avons étudier un cas particulier c'est le tube de Pitot. Dans le troisième chapitre, on a expliqué les étapes de conception de banc d'essai de tube de venturi et les dimensions réelles de chaque composante de banc. Le chapitre quatre représente la méthode de réalisation de banc et le montage des composantes et à la fin nous obtenons la forme finale de l'appareil. Enfin le dernier chapitre c'est-à-dire cinq, on a présenté quelques résultats des manipulations de notre banc d'essai et la détermination des performances de notre appareil.

A la fin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre 1 :
Généralités sur la
mécanique de fluide

Chapitre 1

Généralités sur la mécanique de fluide

1.1. Définition du fluide

Un fluide est un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité, qui peut s'écouler c'est-à-dire subir de grandes variations de forme sous l'action de forces qui sont d'autant plus faible que ces variations de forme sont plus lentes, la notion de fluide s'oppose à celle de solide, mais l'un et l'autre sont considérés comme formés d'un grand nombre de particules matérielles extrêmement petites :

- Qui sont solidement liées entre elles dans le cas des solides.
- Qui sont libres de se déplacer les unes par rapport aux autres dans le cas d'un fluide.

La limite entre solide et fluide est toutefois difficile à préciser, certains états de la matière sont intermédiaire entre les deux :

- Ainsi l'asphalte s'écoule d'un tonneau renversé, mais garde une empreinte et se brise au choc.
- Le verre en fondant passe par toute une série d'états intermédiaires entre le solide et le liquide.

Cette difficulté n'existera pas pour les fluides courants que nous étudierons dans les conditions habituelles, parmi les fluides on distingue les liquides et les gaz.

1.2. Liquides et gaz

Les propriétés physiques les plus importantes au point de vue mécanique sont l'isotropie, la mobilité, la viscosité et la compressibilité, les fluides que nous étudierons seront isotropes, c'est-à-dire que leurs propriétés seront identiques dans toutes les directions de l'espace.

Ils seront mobiles, c'est-à-dire qu'ils n'auront pas de forme propre, ils occuperont la forme du récipient qui les contient, ou ils s'écouleront, mais la déformation peut s'accompagner ou non d'une résistance, dans le premier cas le fluide sera dit visqueux (fluide réel), et parfait dans le second, enfin, la notion de compressibilité permettra de distinguer les liquides et les gaz.

Un liquide est un fluide occupant un volume déterminé, ou du moins ce volume ne peut varier que très peu, et seulement sous l'action de fortes variations de pression ou de température. Ce sont là des cas que nous considérons comme exceptionnels, de sorte qu'en général pour un liquide, le principe de conservation de la masse se ramènera à celui de la conservation du volume.

Un gaz au contraire occupe toujours le volume maximal qui lui est offert, c'est un fluide essentiellement compressible (ou expansible), ce sont là les fluides classiques, la plupart des liquides et gaz usuels peuvent être considérés comme tels, avec une bonne approximation, l'un des buts de la mécanique étant de définir la position ou le mouvement des particules matérielles sous l'action des forces qui les sollicitent, il faut donc définir le genre de forces que nous aurons à considérer en mécanique des fluides.

1.3. Mécanique des fluides

La mécanique des fluides est constituée par la branche de la mécanique appliquée ayant trait au comportement des fluides au repos et en mouvement (statique, cinématique et dynamique des fluides). D'après les domaines d'application de la mécanique des fluides on distingue :

- La mécanique des fluides externes, et dans laquelle on a : un solide isolé et du fluide s'écoule autour de lui par exemples : trains- voitures- avions...etc.
- La mécanique des fluides internes, et dans laquelle on a : les solides limitant le fluide sont des canalisations fermées dont les parois sont en général immobiles, par exemples : écoulement des fluides dans les conduites, transport d'énergie telle que (vapeur, air comprimé... etc.).

Pour traiter un problème de mécanique des fluides, on isole par la pensée toutes les particules fluides qui se trouvent çà un instant donné à l'intérieur d'une surface fermée S et on applique les principes généraux de mécanique et de thermodynamique à cette masse fluide.

En ce qui nous concerne, ces principes se ramèneront aux trois principes de conservations suivantes :

- Principe de conservation de la masse (principe de continuité).
- Principe de conservation de la quantité de mouvement (principe fondamental de la dynamique).
- Principe de conservation de l'énergie (premier principe de la thermodynamique).

Par ailleurs, on peut classer les forces qui agissent sur les particules situées à l'intérieur de S dans les deux catégories suivantes :

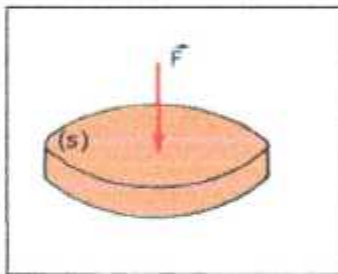
- **Forces intérieures** : les particules intérieures à S exercent les unes sur les autres des forces intérieures (forces moléculaires) égales et opposées deux à deux (principe de l'égalité de l'action et de la réaction) et qui forment par conséquent un système équivalent à zéro.
- **Forces extérieures** : Qui sont :
 - ❖ Les particules extérieures à S exercent sur les particules intérieures à S des forces extérieures (forces moléculaires). Comme ces actions sont limitées aux particules très voisines de S , on s'oppose qu'elles s'exercent uniquement sur les particules de la surface S et on les appelle forces de surface (elles sont proportionnelles aux éléments de surface).
 - ❖ Les champs de force (de pesanteur, magnétique, électrique,... etc.) exercent sur les particules intérieures à S des actions à distance qui sont proportionnelles aux éléments de volume. Ce sont les forces de volume. Les seules de ces types que nous aurons à considérer habituellement seront les forces de pesanteur.

1.3.1. Statique des fluides

La statique des fluides est la science qui étudie les conditions d'équilibre des fluides au repos. Comme la viscosité ne se manifeste que s'il y a mouvement relatif des particules (déformation), la statique des fluides visqueux (ou réels) se confond avec la statique des fluides parfaits.

1.3.1.1 La pression

La pression en un point M d'un fluide en équilibre est le quotient du module de la force normale (fluide parfait) qui s'exerce sur l'élément de surface, entourant le point M par l'aire s ; et sa valeur est indépendante de l'orientation de l'élément.



$$P \text{ (N/m}^2\text{)} = \frac{F \text{ (N)}}{S \text{ (m}^2\text{)}} \quad (1.1)$$

Figure (1.1) : Force de pression exercée sur une surface S.

➤ Différentes types de pression

- **Pression atmosphérique** : C'est la pression exercée sur la couche d'air qui entoure la terre, variable selon l'altitude et la température.

- **Pression relative ou effective** : C'est la pression mesurée par rapport à la pression atmosphérique ; celle-ci étant prise comme point de référence.

- **pression absolue** : c'est la pression mesurée par rapport au zéro absolu, c'est la somme de la pression atmosphérique et la pression relative.

- **vide ou dépression** : c'est une pression relative négative ; c'est-à-dire plus petite que la pression atmosphérique.

Si $P_{abs} > P_{atm}$ (surpression)

$$P_{abs} = P_{eff} + P_{atm}$$

Si $P_{\text{abs}} < P_{\text{atm}}$ (dépression ou vide)

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{vide}}$$

1.3.1.2. Principe fondamental de l'hydrostatique

Rapportons l'espace à trois axes Ox, Oy, Oz. Soient X, Y, Z les projections de la force de volume \vec{F} par unité de masse au point M(x,y,z), p et ρ la pression et la masse volumique en M; les équations fondamentales de la statique des fluides sont :

$$\begin{cases} \rho x - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \\ \rho y - \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \\ \rho z - \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

Soit :

$$\rho \vec{F} - \text{grad } P = 0 \quad (1.3)$$

L'équation (1.2) et (1.3) sont équivalentes, la seconde étant la traduction vectorielle des premières. Ces équations se déduisent immédiatement de l'étude de l'équilibre de cylindre droit infiniment petits, contenant le point M, et d'axes parallèles respectivement aux trois axes de coordonnées. Dans l'équation d'équilibre il faut tenir compte ici des forces de volume, car ces équations sont destinées à être intégrées dans l'espace.

Soit par exemple un petit cylindre d'axe parallèle à Oz et de section droite dS (fig 1.2).

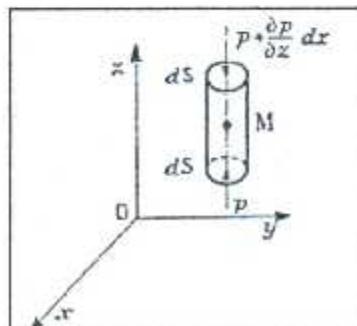


Figure (1.2) : Equilibre d'un cylindre dans le champ de pesanteur.

L'équilibre de ce cylindre se traduit par : $\sum \vec{F} = \vec{0}$ (1.4)

C'est-à-dire l'égalité à zéro de l'ensemble des forces qui agissent sur lui, donc aussi en projection sur Oz, soit :

$$P \, dS - \left(p + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) dS + \rho Z \, dS \, dz = 0 \quad (1.5)$$

Donc :

$$\rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (1.6)$$

Si les forces de volume dérivent d'un potentiel u , on a par définition :

$$\vec{F} = - \overrightarrow{\text{grad}} u \quad (1.7)$$

Il vient donc :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ \rho \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ \rho \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (1.8)$$

Soit : $\rho \overrightarrow{\text{grad}} u + \overrightarrow{\text{grad}} P = 0$ (1.9)

Les équations (1.7) et (1.8) sont équivalentes, la seconde étant la traduction vectorielle des premières.

Conséquences :

➤ Les surfaces équipotentielles sont confondues avec les surfaces isobares. En effet, les surfaces équipotentielles ($u = \text{cte}$) ont comme normales les vecteurs $\overrightarrow{\text{grad}} P$, d'après l'équation (1.8) ces deux familles de surfaces ont même normale. Elles sont donc confondues, leurs cotes varient seulement en sens inverses.

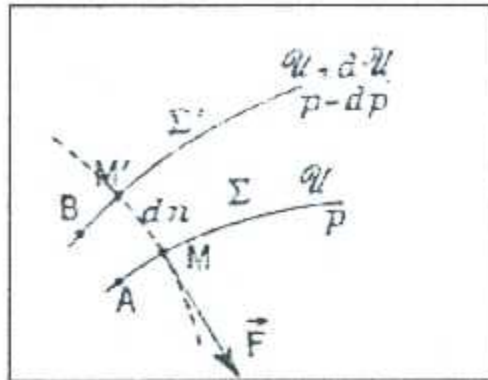


Figure (1.3) : Isobares et équipotentielle sont confondues

➤ Les surfaces isobares sont des surfaces d'égale masse volumique. Considérons en effet deux surfaces isobares (équipotentielles) infiniment voisines. Quand on se déplace sur une courbe normale ou deux surfaces, de M en M' distants de d_n , on a :

$$\overline{\text{grad } u} = \frac{du}{dn} \vec{r} \quad (1.10)$$

$$\overline{\text{grad } p} = \frac{dp}{dn} \vec{r} \quad (1.11)$$

Et vertu de l'équation (1.8) :

$$-\rho \frac{du}{dn} = \frac{dp}{dn} \quad (1.12)$$

Et par suite:

$$\rho du = dp \quad (1.13)$$

Quand on passe de la surface S à la surface S' infiniment voisine, du et dp restent constants, quel que soit le chemin MM' choisi, donc aussi leur rapport ρ . A la limite, si elles se confondent, on peut les considérer comme des surfaces d'égale masse volumique

Si maintenant les deux surfaces équipotentielles S et S' sont quelconques, et qu'on se déplace d'un point A pris sur S jusqu'au point B pris sur S', on peut écrire :

$$u_A - u_B = \int_A^B \frac{dp}{\rho} \quad (1.14)$$

La valeur de l'intégrale ne dépend pas du chemin parcouru et son calcul peut s'effectuer si on connaît la loi de variation de p en fonction de p .

Les surfaces isobares sont aussi isothermes. Puisque sur une surface isobare p et ρ restent constants il en est de même de la température T , en vertu de l'équation d'état du fluide $f(p, \rho, T) = 0$ fournie par la thermodynamique.

1.3.1.3. Statique d'un fluide incompressible dans le champ de pesanteur ; hydrostatique

Dans toute la masse de fluide nous avons :

$$\rho = \text{cte}, T = \text{cte}, \vec{F} = \text{cte}.$$

Les forces de volume se réduisent aux seules forces de pesanteur. \vec{F} représente le poids de l'unité de masse du fluide, c'est un vecteur dirigé vers le centre de la terre, de module égal à l'accélération de la pesanteur et qui dérive d'un potentiel.

a) Equation fondamentale de l'hydrostatique

Soit P un plan horizontal de référence quelconque et h la cote d'un point M comptée positivement vers le haut à partir de ce plan de référence. Le potentiel qui dérive les forces de pesanteur s'exprime par :

$$\boxed{u = gh} \quad (1.15)$$

Bien entendu ce potentiel n'est défini qu'à un constant près, celle qui caractérise la position du plan de référence par rapport à un système de référence fixe, g représente un nombre positif qui mesure l'accélération de la pesanteur. Puisque ρ est constant, les équations (1.7) ou (1.8) nous donnent :

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(p + \rho gh) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial y}(p + \rho gh) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial z}(p + \rho gh) = 0 \end{cases} \quad (1.16)$$

Soit :

$$\boxed{\overline{\text{grad}}(p + \rho gh) = 0} \quad (1.17)$$

Les équations (I.15) et (I.16) sont identiques, comme précédemment.

Elles signifient que la quantité $p + \rho gh$ ne varie pas quand, dans le champ de pesanteur, on se déplace suivant une ligne quelconque. On pourrait écrire par conséquent :

$$\boxed{\frac{\partial}{\partial s}(p + \rho gh) = 0} \quad (1.18)$$

S étant l'abscisse curviligne comptée suivant la ligne de déplacement.

L'intégrale de ces équations est donc :

$$\boxed{P + \rho gh = \text{cte}} \quad (1.19)$$

Dans tout le champ de pesanteur occupé par le fluide en équilibre. C'est l'équation fondamentale de l'hydrostatique. On a l'habitude d'appeler p_g (pression motrice) la quantité $p + \rho gh$, de sorte que l'équation précédente se réduit à :

$$\boxed{P_g = \text{cte.}} \quad (1.20)$$

Dans tout le fluide en équilibre, la pression p_g est constante. En particulier cette constante est celle qu'on peut calculer sur une surface libre éventuelle.

Comme conséquences immédiates de ces équations on tire les quatre propositions suivantes :

- Les surfaces d'égale pression dans un fluide homogène sont des plans horizontaux (plans isobares). En effet, quand $p = \text{cte}$ nous avons $h = \text{cte}$.
- Si nous avons deux fluides différents, de densités différentes, non miscible, la surface de séparation est un plan horizontal. Ceci est nécessaire puisque les surfaces isobares sont des surfaces d'égale densité. Le fluide le plus lourd est en dessous (équilibre stable). En particulier la surface libre est un plan horizontal (plan où la pression est la pression atmosphérique constante). On en déduit le « principe des vases communicants » : dans plusieurs vases de forme quelconque, communiquant entre eux

et contenant un liquide en équilibre, les surfaces libres dans les différents vases sont dans le même plan horizontal.

- La différence de pression $P_A - P_B$ entre deux points quelconques A et B pris à l'intérieur du fluide ne dépend que de la distance entre les deux points. Elle est égale au poids d'une colonne de fluide ayant comme base l'unité de surface et comme hauteur la différence de niveau entre les deux points. (c'est l'énoncé pratique du principe fondamental de l'hydrostatique.) ; Nous avons en effet :

$$P_A + \rho g h_A = P_B + \rho g h_B$$

$$P_B - P_A = \rho g (h_A - h_B) \quad (1.21)$$

Et en posant $\omega = \rho g =$ poids volumique du fluide.

$$P_A - P_B = \omega z \quad (1.22)$$

- Dans un fluide incompressible en équilibre, les variations de pression se transmettent intégralement (principe de pascal). Le « principe » se déduit immédiatement de la formule (1.22), la différence $P_B - P_A$ reste constante quelles que soient les pressions. Si P_A varie, P_B varie simultanément de la même quantité.

b) Applications

➤ liquides superposés (non miscible, non réactifs chimiquement)

Les surfaces de séparation sont horizontales et les liquides se superposent par ordre de densité décroissante $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$.

Le graphique donne la répartition des pressions en fonction de la profondeur : il est formé de lignes brisées.

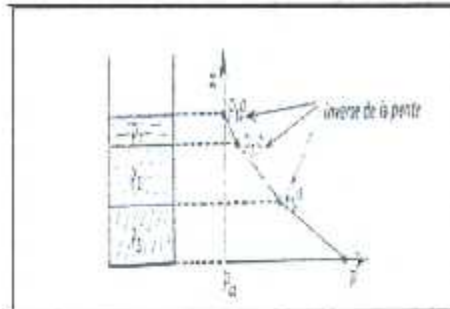


Figure (1.4) : Liquides superposés non miscibles.

Cas d'un tube en U (fig1.5). En prenant un plan de référence passant par la surface de séparation commune on a :

$$\begin{cases} P_A = P_a + \rho_1 g h_1 \\ P_B = P_a + \rho_2 g h_2 \end{cases} \quad (1.23)$$

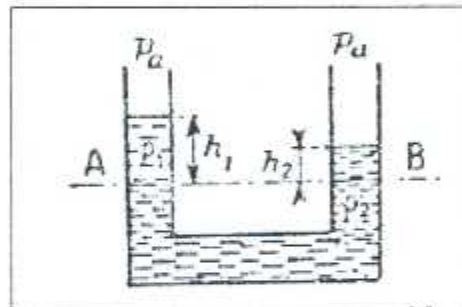


Figure (1.5) : Deux liquides non miscibles dans un tube en U.

Or ; $P_A = P_B$ puisque A et B sont dans un même fluide et dans le même plan horizontal ; donc $\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$.

➤ **Baromètres. Manomètres**

Baromètre à mercure (la pression P_M dans la chambre supérieure est nulle.)

$$P_a = \rho g h + P_M = 13.59 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \cdot 0.76 = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ atmosphère.}$$

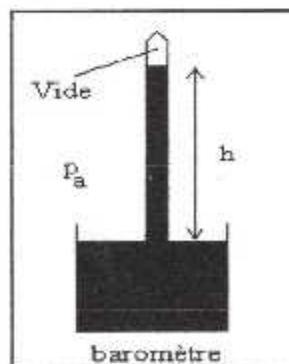


Figure (1.6) : Baromètre à mercure.

➤ Théorème d'Archimède et corps flottants

○ Théorème d'Archimède

Considérons (Fig. a) dans la figure (1.7) un corps entièrement immergé dans un fluide homogène au repos.

Il occupe un volume V et subit de la part du fluide des forces de pression.

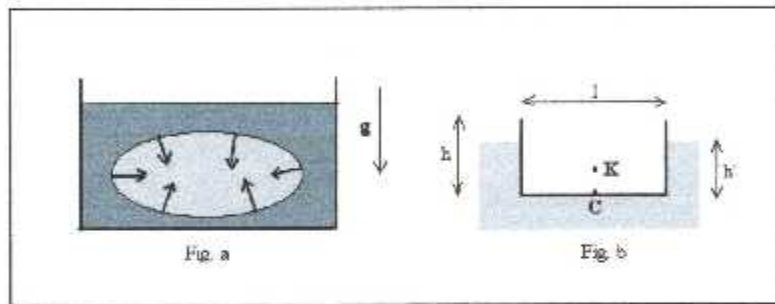


Figure (1.7) : Deux corps émergés dans un fluide homogène au repos.

" Tout corps plongé dans un fluide en équilibre est soumis de la part de celui-ci à une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du fluide de remplacement et appliquée à son centre de masse appelé centre de carène. "

Démonstration :

En effet, en l'absence de corps immergé, le fluide de remplacement serait en équilibre sous l'action des forces de pression exercées par le fluide environnant et des forces de pesanteur. La résultante des forces de pression exercées par le fluide environnant est donc l'opposé du poids du fluide de remplacement.

○ Statique des corps flottants

Lorsque le poids du liquide de remplacement est supérieur au poids du corps, seule une partie de ce dernier est immergée. Le corps est alors soumis à deux forces. Son poids, appliqué au centre de masse C , et la poussée d'Archimède appliquée au centre de carène K .

A titre d'exemple, considérons l'équilibre d'une boîte parallélépipédique à section rectangulaire ouverte flottant sur l'eau (Fig. b) dans la figure (1.7). Une telle boîte, de dimensions $L = 10 \text{ m}$, $l = 4 \text{ m}$, $h = 3 \text{ m}$ et de masse $M = 20 \text{ t}$, constitue un modèle simplifié d'une embarcation flottant sur l'eau. Elle s'enfonce dans l'eau d'une hauteur h' telle que :

$$Mg = \mu_{\text{eau}} L l h' g \text{ soit } h' = \frac{M}{\mu_{\text{eau}} L l} = 0,5 \text{ m}$$

Notons que, la boîte étant ouverte et les parois latérales de masse négligeable, le centre de masse C est situé au centre de la base rectangulaire, alors que le centre de carène K est au-dessus de lui à la distance $h'/2$. Dans ce cas, l'équilibre est stable : une légère rotation de la boîte autour de l'axe longitudinal passant par le centre de masse produit des oscillations autour de la position d'équilibre.

1.3.2. Dynamique des fluides

La dynamique des fluides est la science qui étudie le mouvement du fluide en tenant compte des forces qui entrent en jeu.

1.3.2.1. Ecoulement des fluides

L'écoulement d'un fluide est un phénomène complexe et ne se prête pas toujours à une analyse mathématique rigoureuse, contrairement aux solides, les éléments d'un fluide en mouvement peuvent se déplacer à des vitesses différentes et être soumis à des accélérations différentes.

Les trois notions importantes en ce qui concerne l'écoulement des fluides sont :

- le principe de la conservation de la masse à partir duquel on établit l'équation de continuité.
- Le principe de conservation de la quantité de mouvement (principe de la conservation de la dynamique).
- Le principe de la conservation d'énergie (1er principe de la thermodynamique).

➤ différents types d'écoulement

L'écoulement peut être un ;

- Ecoulement permanent ou stationnaire.
- Ecoulement non permanent ou variable.
- Ecoulement irrotationnel.
- Ecoulement rotationnel.

- **Écoulement permanent (stationnaire)**

Un écoulement est dit permanent ou stationnaire par rapport à un repère donné, si en tout point fixe la vitesse ainsi que toutes les quantités thermodynamiques attachées aux

particules fluides, ne varient pas avec le temps. ($\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \vec{0}$)

- **Écoulement non permanent (variable)**

Un écoulement est dit non permanent ou variable, quand les conditions en un point quelconque des fluides varient avec le temps ($\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \neq \vec{0}$).

- **Écoulement irrotationnel (fluide parfait)**

C'est un écoulement en dehors de la couche limite ou le vecteur tourbillon est nul ($\vec{\omega} = \frac{1}{2} \text{rot } \vec{v} = \vec{0}$), les écoulements irrotationnels s'effectuent sans échange d'énergie entre les particules fluides (écoulement conservatif) et sans perte (dû à l'absence de la viscosité).

- **Écoulement rotationnel (fluide réels ou visqueux)**

Écoulement localisé à l'intérieure de la couche limite près de la paroi ou le vecteur tourbillon est différent de zéro ($\vec{\omega} \neq \vec{0}$), les forces misent en jeu (de viscosité et d'inertie) sont sources de ;

- Rotation élémentaire de particules.
- Echange-dissipation et transformation de l'énergie entre les particules.

1.3.2.2. Le débit :

Le débit est le quotient de la quantité de fluide qui traverse une section droite de la conduite par la durée de cet écoulement.

➤ Débit-masse

Si Δm est la masse de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt , par définition le débit-masse est :

$$q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (1.24)$$

Unité : $q_m : \text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
 $m : \text{kg}$
 $t : \text{s}$

➤ Débit-volume

Si ΔV est le volume de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt , par définition le débit-volume est :

Unité : $q_v : \text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
 $V : \text{m}^3$

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1.25)$$

➤ Relation entre q_m et q_v

La masse volumique ρ est donnée par la relation :

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad \text{D'où : } \boxed{q_m = \rho q_v} \quad (1.26)$$

Remarque :

Les liquides sont incompressibles et peu dilatables (masse volumique constante) ; on parle alors d'écoulements isovolumes.

Pour les gaz, la masse volumique dépend de la température et de la pression. Pour des vitesses faibles (variation de pression limitée) et pour des températures constantes on retrouve le cas d'un écoulement isovolume.

1.3.2.3. Équation de conservation de la masse ou équation de continuité

Définitions :

- **Ligne de courant** : En régime stationnaire, on appelle ligne de courant la courbe suivant laquelle se déplace un élément de fluide. Une ligne de courant est tangente en chacun de ses points au vecteur vitesse du fluide en ce point.
- **Tube de courant** : Ensemble de lignes de courant s'appuyant sur une courbe fermée.
- **Filet de courant** : Tube de courant s'appuyant sur un petit élément de surface ΔS .
La section de base ΔS du tube ainsi définie est suffisamment petite pour que la vitesse du fluide soit la même en tous ses points (répartition uniforme).

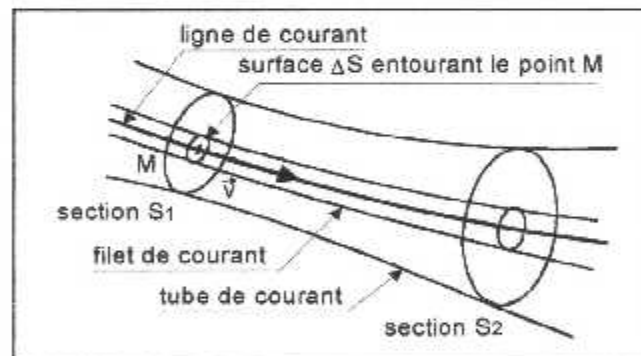


Figure (1.8) : Tube et filet de courant.

➤ Conservation du débit

Considérons un tube de courant entre deux sections S_1 et S_2 . Pendant l'intervalle de temps Δt , infiniment petit, la masse Δm_1 de fluide ayant traversé la section S_1 est la même que la masse Δm_2 ayant traversé la section S_2 .

$$q_{m1} = q_{m2}$$

En régime stationnaire, le débit-masse est le même à travers toutes les sections droites d'un même tube de courant.

Dans le cas d'un **écoulement isovolume** ($\rho = \text{Cte}$) :

$$q_{v1} = q_{v2}$$

En régime stationnaire, le débit-volume est le même à travers toutes les sections droites d'un même tube de courant.

❖ Expression du débit en fonction de la vitesse v

Le débit-volume est aussi la quantité de liquide occupant un volume cylindrique de base S et de longueur égale à v , correspondant à la longueur du trajet effectué pendant l'unité de temps, par une particule de fluide traversant S .

Il en résulte la relation importante :

$$q_v = vS$$

(1.27)

❖ Vitesse moyenne

En général la vitesse v n'est pas constante sur la section S d'un tube de courant ; on dit qu'il existe un **profil de vitesse** (à cause des forces de frottement). Le débit-masse ou le débit-volume s'obtient en intégrant la relation précédente.

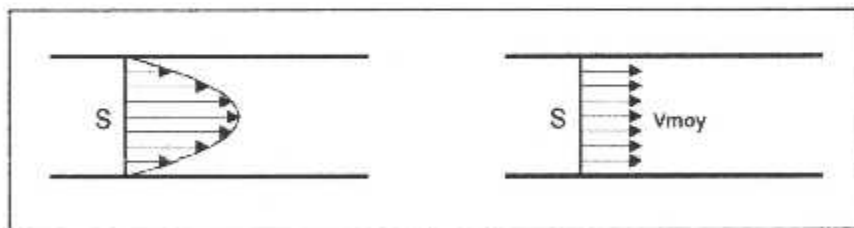


Figure (1.9) : La vitesse moyenne d'un écoulement.

Dans une section droite S de la canalisation, on appelle **vitesse moyenne v_m** la vitesse telle que :

$$v_{moy} = \frac{q_v}{S}$$

(1.28)

La vitesse moyenne v_{moy} apparaît comme la vitesse uniforme à travers la section S qui assurerait le même débit que la répartition réelle des vitesses.

Si l'écoulement est isovolume, cette vitesse moyenne est inversement proportionnelle à l'aire de la section droite.

$$q_V = v_{1moy} S_1 = v_{2moy} S_2 = Cte \quad (1.29)$$

C'est l'équation de continuité.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

La vitesse moyenne est d'autant plus grande que la section est faible.

1.3.2.4. Viscosité

Sous l'effet des forces d'interaction entre les molécules de fluide et des forces d'interaction entre les molécules de fluide et celles de la paroi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse.

On dit qu'il existe un profil de vitesse.

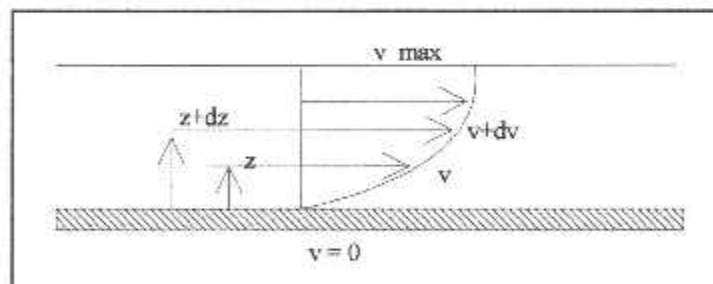


Figure (1.10) : La vitesse en fonction de hauteur z .

Si on représente par un vecteur, la vitesse de chaque particule située dans une section droite perpendiculaire à l'écoulement d'ensemble, le courbe lieu des extrémités de ces vecteurs représente le profil de vitesse. Le mouvement du fluide peut être considéré comme résultant du glissement des couches de fluide les unes sur les autres. La vitesse de chaque couche est une fonction de la distance z de cette couche au plan fixe :

$$v = v(z)$$

a) Définition de la viscosité dynamique – Loi de Newton

Considérons 2 couches contiguës distantes de dz .

La force de frottement F qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit dv , à leur surface S et inversement proportionnelle à dz :

$$F = -\eta S \frac{dv}{dz} \quad (1.30)$$

Le facteur de proportionnalité η est le **coefficient de viscosité dynamique** du fluide.

Dimension : $[\eta] = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$.

Unité :

Dans le système international (SI), l'unité de viscosité est le **Pa·s** ou **Poiseuille (Pl)** :

$$1 \text{ Pl} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

On trouve encore les tables de valeurs numériques le coefficient de viscosité dans un ancien système d'unités (CGS) : L'unité est le **Poise (Po)** ; $1 \text{ Pl} = 10 \text{ Po} = 1 \text{ da Po} = 10^3 \text{ cPo}$.

Autres unités :

La viscosité de produits industriels (huiles en particulier) est exprimée au moyen d'unités empiriques : degré ENGLER en Europe, degré Redwood en Angleterre, degré Saybolt aux USA.

Par rapport aux faits expérimentaux, on est conduit à considérer deux types de fluides :

- D'une part **les fluides newtoniens** qui satisfont à la loi de Newton. Ces fluides ont un coefficient de viscosité indépendant du gradient de vitesse. C'est le cas des gaz, des vapeurs, des liquides purs de faible masse molaire.
- D'autre part **les fluides non-newtoniens**. Ce sont les solutions de polymères, les purées, les gels, les boues, le sang, la plupart des peintures, etc.... L'étude de ces fluides relève de la rhéologie : fluides pseudo plastiques, rhéoplastiques, thixotropiques, rhéopectiques.

b) Viscosité cinématique :

Dans de nombreuses formules apparaît le rapport de la viscosité dynamique η et de la masse volumique ρ .

Ce rapport est appelé **viscosité cinématique ν** :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1.31)$$

Dimension : $[\nu] = L^2 \cdot T^{-1}$.

Unité :

Dans le système international (SI), l'unité de viscosité n'a pas de nom particulier : (m^2/s) .

Dans le système CGS, l'unité est le Stoke (St) : $1 m^2/s = 10^4 St$.

c) Influence de la température :

La viscosité des liquides diminue beaucoup lorsque la température augmente.

Ainsi pour l'eau :

à 10°C	$\eta = 1,3 \times 10^{-3} \text{ Pl}$
à 20°C	$\eta = 1,0 \times 10^{-3} \text{ Pl}$
à 90°C	$\eta = 0,3 \times 10^{-3} \text{ Pl}$

Il n'existe pas de relation rigoureuse liant η et T. On peut cependant utiliser un modèle utilisant l'équation empirique de Guzman-Andrade de la forme :

$$\eta = a e^{\frac{b}{T}}$$

(a) et (b) étant des constantes dépendant de la nature du liquide et T la température absolue. Contrairement à celle des liquides, la viscosité des gaz augmente avec la température.

1.3.2.5. Dynamique des fluides visqueux incompressibles

a) Différents régimes d'écoulement : nombre de Reynolds

Les expériences réalisées par *Reynolds* (1883) lors de l'écoulement d'un fluide dans une conduite cylindrique rectiligne, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : **laminaire et turbulent**.

En utilisant des fluides divers (viscosité différente), en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent est un **nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds** et donné par :

$$\boxed{Re = \frac{\rho v D}{\eta}} \quad \text{Ou} \quad \boxed{Re = \frac{v D}{\nu}} \quad (1.32)$$

Avec :

ρ = masse volumique du fluide, v = vitesse moyenne, D = diamètre de la conduite

η = viscosité dynamique du fluide, ν = viscosité cinématique $\boxed{\nu = \frac{\eta}{\rho}}$

L'expérience montre que :

Si $Re < 2000$ le régime est LAMINAIRE

Si $2000 < Re < 3000$ le régime est intermédiaire

Si $Re > 3000$ le régime est TURBULENT

Ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeur, le passage d'un type d'écoulement à un autre se faisant progressivement.

➤ Visualisation de l'écoulement

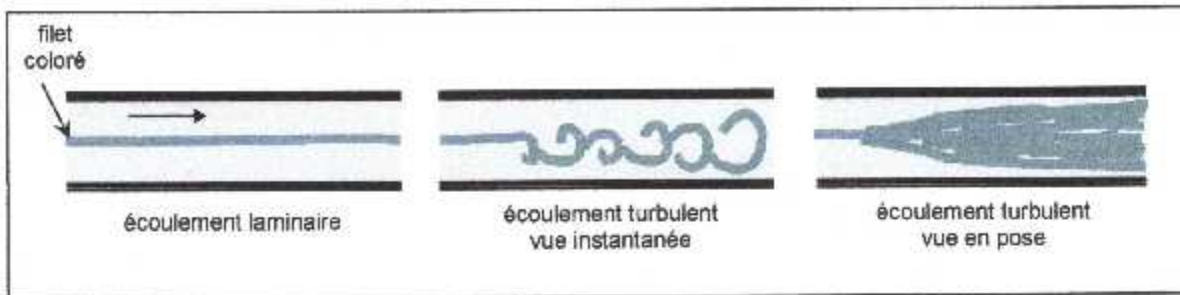


Figure (1.11) : Différents types d'écoulement.

1.3.2.6. Calcul des Pertes de Charge

Lorsqu'on considère un fluide réel, les pertes d'énergie spécifiques ou bien comme on les appelle souvent, les **pertes de charge** dépendent de la forme, des dimensions et de la rugosité de la canalisation, de la vitesse d'écoulement et de la viscosité du liquide mais non de la valeur absolue de la pression qui règne dans le liquide.

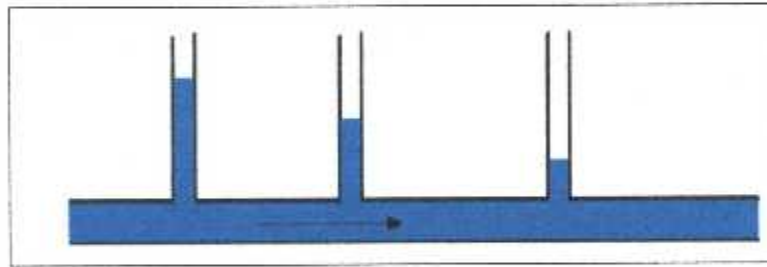


Figure (1.12) : Les pertes de charge le long d'un tube cylindrique.

La différence de pression $\Delta p = p_1 - p_2$ entre deux points (1) et (2) d'un circuit hydraulique a pour origine :

- ✓ Les frottements du fluide sur la paroi interne de la tuyauterie ; on les appelle **pertes de charge régulières ou systématiques**.
- ✓ La résistance à l'écoulement provoquée par les accidents de parcours (coudes, élargissements ou rétrécissements de la section, organes de réglage, etc...) ; ce sont les **pertes de charge accidentelles ou singulières**.

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

Le fluide caractérisé par : - sa masse volumique.

- sa viscosité cinématique ν .

Un tuyau caractérisé par : - sa section (forme et dimension) en général circulaire (Diamètre D).

- sa longueur L .

- sa rugosité k (hauteur moyenne des aspérités de la paroi).

Ces éléments sont liés par des grandeurs comme la vitesse moyenne d'écoulement v ou le débit q et le nombre de Reynolds Re qui joue un rôle primordial dans le calcul des pertes de charge.

a) Pertes de charge accidentelles

Ainsi que les expériences le montrent, dans beaucoup de cas, les pertes de charge sont à peu près proportionnelles au carré de la vitesse et donc on a adopté la forme suivante d'expression:

$$\Delta p = K \frac{\rho v^2}{2}$$

- Différence de pression (Pa).

$$\Delta h = K \frac{v^2}{2g}$$

- Perte de charge exprimée en mètres de colonne de fluide (mCF)

(1.33)

K est appelé **coefficient de perte de charge singulière** (sans dimension).

La détermination de ce coefficient est principalement du domaine de l'expérience.

b) Pertes de charge systématiques

➤ Généralités :

Ce genre de perte est causé par le frottement intérieur qui se produit dans les liquides. Il se rencontre dans les tuyaux **lisses** aussi bien que dans les tuyaux **rugueux**.

Entre deux points séparés par une longueur L , dans un tuyau de diamètre D apparaît une perte de pression Δp , exprimée sous la forme suivante :

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho v^2 L}{2 D}$$

$$\Delta h = \lambda \frac{v^2 L}{2g D}$$

Et

$$J = \frac{\Delta h}{L} = \lambda \frac{v^2}{2g D}$$

-Différence de pression (Pa) -Perte de charge exprimée en mètres de colonne de fluide (mCF) -Perte de charge linéique

λ Est un coefficient sans dimension appelé **coefficient de perte de charge linéaire**.

Le calcul des pertes de charge repose entièrement sur la détermination de ce coefficient λ .

➤ **Cas de l'écoulement laminaire : $Re < 2000$**

Dans ce cas on peut montrer que le coefficient λ est uniquement fonction du nombre de Reynolds Re ; l'état de la surface n'intervient pas et donc λ ne dépend pas de k (hauteurs moyennes des aspérités du tuyau), ni de la nature de la tuyauterie.

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

Avec

$$Re = \frac{vD}{\nu}$$

Il est alors immédiat de voir que Δh est proportionnel à la vitesse v et donc au débit q_v , ainsi qu'à la viscosité cinématique ν .

Loi de Poiseuille

Pour un **écoulement laminaire**, dans une conduite cylindrique horizontale, de longueur L , de rayon r (Diamètre D), le débit-volume du fluide est donné par :

$$q_v = \frac{\pi r^4}{8\eta L} (p_1 - p_2) = \frac{\pi r^4}{8\eta L} \Delta p = \frac{\pi D^4}{128\eta L} \Delta p \quad (1.34)$$

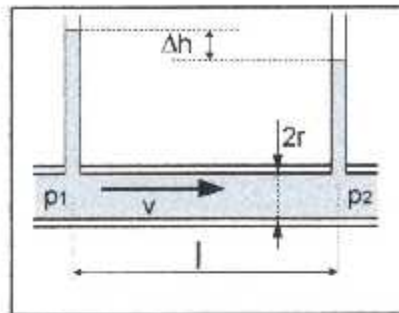


Figure (1.13) : Différence de pression le long d'un tube cylindrique.

Cas de l'écoulement turbulent : $Re > 3000$

Les phénomènes d'écoulement sont beaucoup plus complexes et la détermination du coefficient de perte de charge résulte de mesures expérimentales. C'est ce qui explique la diversité des formules anciennes qui ont été proposées pour sa détermination.

En régime turbulent l'état de la surface devient sensible et son influence est d'autant plus grande que le nombre de Reynolds Re est grand. Tous les travaux ont montré l'influence de la rugosité et on s'est attaché par la suite à chercher la variation du coefficient λ en fonction du nombre de Reynolds Re et de la rugosité k du tuyau.

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

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (1.35)$$

L'utilisation directe de cette formule demanderait, du fait de sa forme implicite, un calcul par approximations successives ; on emploie aussi en pratique des représentations graphiques.

Résolution de l'équation de Colebrook

Pour simplifier la relation précédente, on peut chercher à savoir si l'écoulement est **hydrauliquement lisse** ou **rugueux** pour évaluer la prédominance des deux termes entre parenthèses dans la relation de Colebrook.

Ce sont les formules de Karman-Nikuradse écrites séparément :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(\text{Re} \sqrt{\lambda}) - 0,8$$

-Ec turbulent lisse

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log\left(\frac{D}{2k}\right) + 1,735$$

-Ec turbulent rugueux

Remarque :

On fait souvent appel à des formules empiriques plus simples valables pour des cas particuliers et dans un certain domaine du nombre de Reynolds.

Formule de Blasius : (pour des tuyaux lisses et $\text{Re} < 10^5$) $\lambda = 0,316 \text{Re}^{-0,25}$

Formule de Nikuradse ($10^6 < \text{Re} < 10^8$)

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot \text{Re}^{-0,237}$$

Formule de Darcy (conduites en fonte) :

$$DJ = 4v^2 \left(5,07 \times 10^{-4} + \frac{13 \times 10^{-6}}{D} \right)$$

J = pertes de charge linéaire (mCF/m)

Bien d'autres relations sont utilisées dans le cas de l'eau :

Formule de Williams et Hazen (USA), formule de Strickler (EDF).

Comme en régime laminaire, le régime turbulent ne s'établit parfaitement qu'à partir d'une certaine longueur l qui dans ce cas a pour valeur approximative : $l = 10^5 D / \text{Re}$.

Pour de grandes valeurs de Re, l'influence de cette longueur ne peut être sensible que pour des tuyaux courts.

On voit donc que des formules empiriques ou des abaques sont utilisées pour avoir des ordres de grandeur corrects des pertes de charge: il est bien entendu que des calculs très précis sont inutiles, car les installations sont toujours dimensionnées avec un coefficient de sécurité permettant une adaptation à des fonctionnements imprévus.

En conclusion, pour diminuer l'ensemble des pertes de charge dans une canalisation, afin de diminuer les coûts de fonctionnement dus aux pompes, il faut:

- . diminuer la longueur de canalisation
- . diminuer le nombre d'accidents sur la canalisation
- . diminuer le débit de circulation
- . augmenter le diamètre des canalisations
- . faire circuler des liquides le moins visqueux possibles
- . utiliser des matériaux de faible rugosité

Il est néanmoins évident que le procédés de fabrication impose parfois des contraintes d'ordre supérieur (viscosité élevée des produits utilisés, débits forts imposés...).

Chapitre 2 :

L'effet de VENTURI

Chapitre 2

L'effet de venturi

2.1. Théorème de Bernoulli

Une balle de ping-pong reste en lévitation lorsqu'elle est placée dans un jet d'air vertical provenant par exemple d'un sèche-cheveux. Si la balle se déplace latéralement, la vitesse d'écoulement devient plus grande en A qu'en B. La différence de pression ($P_b - P_a > 0$) ramène la balle au centre du jet assurant la stabilité de l'équilibre.

On peut même incliner le jet d'un angle assez grand ($\gg 45^\circ$) par rapport à la verticale sans que la balle ne tombe, comme le montre les figures ci-dessous.

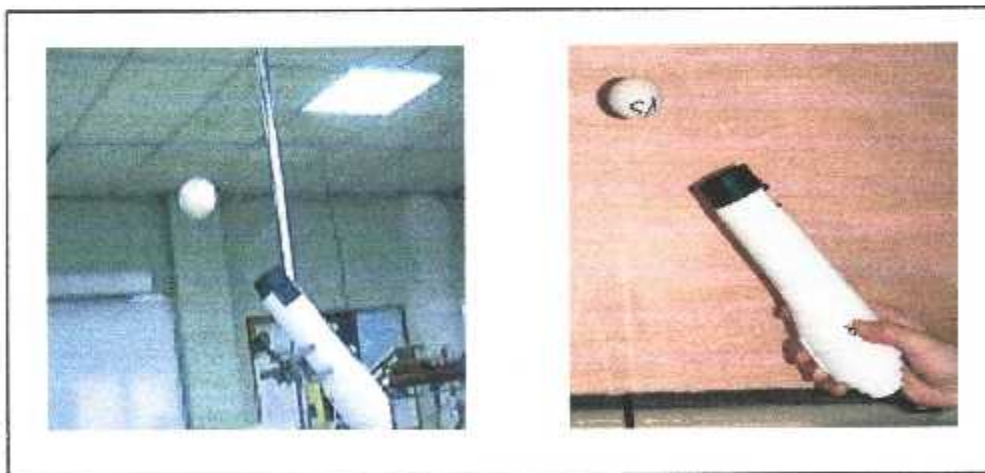


Figure (2.1) : Expérience de balle de ping-pong.

. Phénomène des papiers aspirés :

Une feuille de papier est aspirée lorsqu'on souffle dessus. Lorsqu'on tient deux feuilles de papier l'une en face de l'autre et que l'on souffle dans l'espace libre entre elles, les feuilles se rapprochent au lieu de s'écarter.

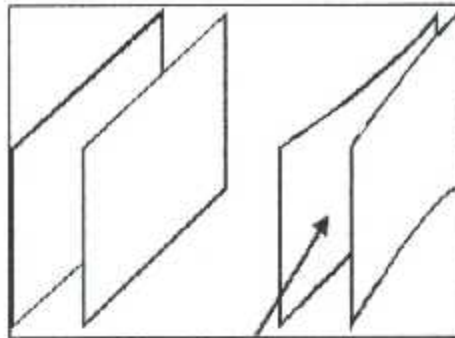


Figure (2.2) : Expérience Des Papiers Aspirés.

Conclusion : La pression d'un fluide diminue lorsque sa vitesse augmente.

Démonstration

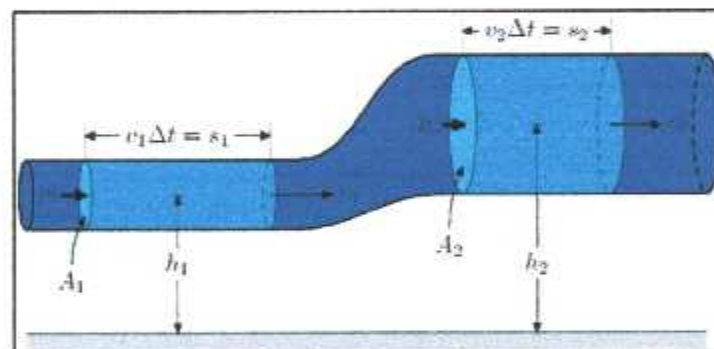


Figure (2.3) : Ecoulement dans un divergent.

Tube de courant du fluide. On indique les pressions (p), altitudes (h), vitesses (v), longueurs (s) et sections (A).

Soit le système fermé contenu à l'instant t entre x_1 et x_2 et à $t + \Delta t$ entre $x_1 + v_1 \cdot \Delta t$ et $x_2 + v_2 \cdot \Delta t$.

Le fluide est incompressible, la masse Δm contenue entre x_1 et x_2 doit être identique à la masse contenue entre $x_1 + v_1 \cdot \Delta t$ et $x_2 + v_2 \cdot \Delta t$. Ce que l'on peut ramener ici à la conservation du débit massique: $\Delta t \cdot v_1 \cdot A_1 \cdot \rho = \Delta t \cdot v_2 \cdot A_2 \cdot \rho$.

Toutes les forces qui s'exercent (forces pressantes et poids) sont conservatives (il n'y a pas d'effet visqueux). On peut donc appliquer le théorème de conservation de l'énergie mécanique au système:

$$\boxed{\Delta E_{pp} + \Delta E_k = W} \quad (2.1)$$

Où

$\Delta E_k = \Delta m(v_2^2 - v_1^2)/2$ est la variation d'énergie cinétique du système.

$\Delta E_{pp} = \Delta mgh_2 - \Delta mgh_1$ est la variation d'énergie potentielle de pesanteur du système.

$W = p_1 A_1 \cdot (v_1 \Delta t) - p_2 A_2 \cdot (v_2 \Delta t)$ est le travail des forces de pressions.

Soit

$$\boxed{\frac{1}{2} \Delta m v_2^2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2 + \Delta m g h_2 - \Delta m g h_1 = p_1 A_1 \cdot (v_1 \Delta t) - p_2 A_2 \cdot (v_2 \Delta t)} \quad (2.2)$$

D'où, en divisant par Δm :

$$\boxed{\frac{v_1^2}{2} + g h_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + g h_2 + \frac{p_2}{\rho}} \quad (2.3)$$

Et donc:

$$\boxed{\frac{v^2}{2} + g h + \frac{p}{\rho} = C} \quad (2.4)$$

On peut remarquer que la démonstration est faite dans le contexte particulier d'un écoulement obéissant à la géométrie de la figure. Cependant, pour un écoulement quelconque en régime permanent, on pourra toujours définir au voisinage d'une ligne de courant une section sur laquelle la vitesse est homogène, et raisonner comme précédemment.

2.1.1. Équation de Bernoulli pour les fluides compressibles

La démonstration est identique à celles pour les fluides compressibles: elle s'appuie sur la conservation du débit et de l'énergie, Mais on doit prendre en compte dans la variation d'énergie du système la variation d'énergie interne du fluide entre t et $t + \Delta t$.

La conservation de l'énergie appliquée au système devient alors:

$$\frac{1}{2}\Delta mv_2^2 - \frac{1}{2}\Delta mv_1^2 + \Delta mgh_2 - \Delta mgh_1 + \Delta mu_2 - \Delta mu_1 = p_1 A_1 \cdot (v_1 \Delta t) - p_2 A_2 \cdot (v_2 \Delta t) \quad (2.5)$$

D'où

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 + u_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + u_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad (2.6)$$

Si on note l'enthalpie spécifique ω , dans le cas d'un gaz parfait, on vérifie $\gamma = \frac{\omega}{u}$

Comme $\omega = u + \frac{p}{\rho}$ on a $\omega = \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{p}{\rho}$

Donc dans ce cas,

$$\frac{v^2}{2} + gh + \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{p}{\rho} = \text{constante} \quad (2.7)$$

2.1.2. Théorème de Bernoulli pour les différents écoulements incompressible

2.1.2.1. Théorème de Bernoulli pour un écoulement permanent d'un fluide parfait incompressible

Un fluide parfait est un fluide dont l'écoulement se fait sans frottement.

On considère un écoulement permanent isovolume d'un fluide parfait, entre les sections S_1 et S_2 , entre lesquelles il n'y a aucune machine hydraulique, (pas de pompe, ni de turbine).

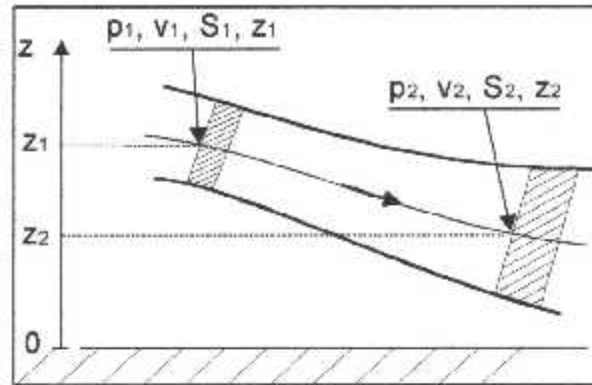


Figure (2.4) : Ecoulement dans une conduite.

Soit m la masse et V le volume du fluide qui passe à travers la section S_1 entre les instants t et $t+\Delta t$. Pendant ce temps la même masse et le même volume de fluide passe à travers la section S_2 . Tout se passe comme si ce fluide était passé de la position (1) à la position (2). En appliquant le théorème de l'énergie cinétique à ce fluide entre les instants t et $t+\Delta t$ (la variation d'énergie cinétique est égale à la somme des travaux des forces extérieures : poids et forces pressantes), on obtient :

$$\rho \frac{v^2}{2} + \rho g z + p = \text{Cte} \quad (2.8)$$

P est la pression statique.

$\rho g z$ Est la pression de pesanteur

$\rho \frac{v^2}{2}$ Est la pression cinétique.

Tous les termes s'expriment en pascal.

En divisant tous les termes de la relation précédente par le produit ρg , on écrit tous les termes dans la dimension d'une hauteur (pressions exprimées en mètres de colonne de fluide).

$$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} = H = \text{Cte} \quad (2.9)$$

H est la Hauteur totale.

$\frac{P}{\rho g}$ est la Hauteur de Pression.

Z est la cote.

$\frac{v^2}{2g}$ est la Hauteur cinétique.

$z + \frac{P}{\rho g}$ est la Hauteur piézométrique.

2.1.2.1.1. Cas d'un écoulement (1)→(2) sans échange de travail

Lorsque, dans un écoulement d'un fluide parfait, il n'y a aucune machine (ni pompe ni turbine) entre les points (1) et (2) d'une même ligne de courant, la relation de Bernoulli peut s'écrire sous l'une ou l'autre des formes suivantes :

$$\boxed{\frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) + \rho g(z_2 - z_1) + (p_2 - p_1) = 0} \quad (2.10)$$

Ou

$$\boxed{\frac{1}{2g}(v_2^2 - v_1^2) + (z_2 - z_1) + \frac{(p_2 - p_1)}{\rho g} = 0} \quad (2.11)$$

2.1.2.1.2. Cas d'un écoulement (1)→(2) avec échange d'énergie

Lorsque le fluide traverse une machine hydraulique, il échange de l'énergie avec cette machine sous forme de travail ΔW Pendant une durée Δt . La puissance P échangée est

$$\boxed{P = \frac{\Delta W}{\Delta t}} \quad (2.19)$$

Unités : P en watt (W).

W en joule (J).

t en seconde (s).

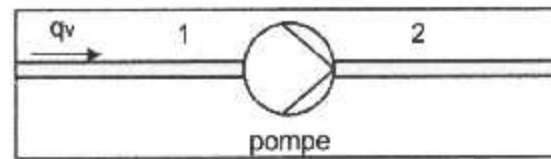


Figure (2.5) : Ecoulement dans une pompe.

- $P > 0$ si l'énergie est reçue par le fluide (ex. : pompe).
- $P < 0$ si l'énergie est fournie par le fluide (ex. : turbine).

Si le débit-volume est q_v , la relation de Bernoulli s'écrit alors :

$$\frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (z_2 - z_1) + (p_2 - p_1) = \frac{P}{q_v} \quad (2.12)$$

2.2. Application du Théorème de Bernoulli

2.2.1. Tube de Pitot

L'utilisation de sondes de pression pour la mesure de la vitesse d'un fluide est couramment utilisée. On distingue deux types de sondes, suivant qu'elles permettent la mesure du module de la vitesse uniquement, ou du module et de la direction. En ce qui nous concerne, seul le premier type nous intéresse. Nous utilisons ici un tube de PITOT, qui est une "machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux" selon sa première définition. Cette méthode de mesure a été inventée par Henri PITOT qui, en 1732, imagina ce tube pour mesurer les pressions totales.

Le physicien DARCY le compléta, permettant ainsi la mesure simultanée des deux pressions totale et statique. C'est enfin, PRANDTL qui pensa à utiliser ce tube dans une canalisation pour y relever, en chaque point, ces mêmes pressions et obtenir ainsi les vitesses locales (le tube de PRANDTL utilisant un orifice à la paroi de la veine pour prendre la pression statique).

2.2.1.1 Principe du tube de Pitot :

Le tube de PITOT double permet la détermination de la vitesse locale grâce à la mesure d'une différence entre la pression statique P_s et la pression totale P_t .

En fluide incompressible, l'équation de BERNOULLI nous donne une expression de la pression totale au point d'arrêt du tube (vitesse nulle en ce point) :

$$P_t = P_s + \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (2.13)$$

(Le terme $\frac{1}{2}\rho V^2$ correspond à la pression dynamique et ρ étant la masse Volumique du fluide et V la vitesse moyenne incidente).

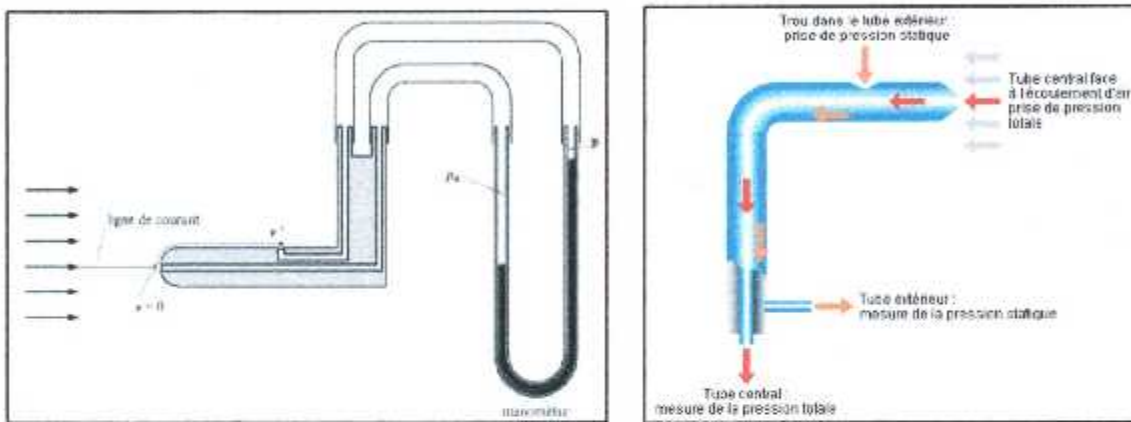


Figure (2.6) : Tube de Pitot.

-Connaissant la pression statique P_s , la pression totale P_t et la masse volumique ρ , on en déduit la vitesse V :

$$V = \sqrt{\frac{P_t - P_s}{\frac{1}{2}\rho}} \quad (2.14)$$

-Cette équation permet alors de déterminer la vitesse du fluide dans lequel évolue la sonde de Pitot.

2.2.2. Écoulement d'un liquide contenu dans un réservoir – Théorème de Torricelli

Considérons un réservoir muni d'un petit orifice à sa base, de section s et une ligne de courant partant de la surface au point (1) et arrivant à l'orifice au point (2).

En appliquant le théorème de Bernoulli entre les points (1) et (2).

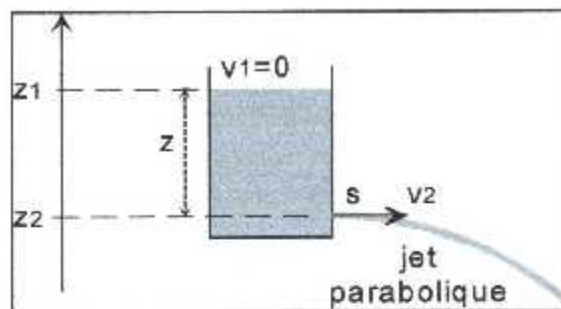


Figure (2.7) : Ecoulement dans Un réservoir.

$$\rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g z_1 + p_1 = \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho g z_2 + p_2$$

Or $p_1 = p_2 =$ pression atmosphérique.

Et $v_1 \ll v_2$ d'où $v_2 = \sqrt{2gz}$

La vitesse d'écoulement est la même que la vitesse de chute libre entre la surface libre et l'orifice, quelle que soit la masse volumique du liquide.

2.2.3. Effet Magnus

Si maintenant la conduite reste de section constante mais que l'on met un obstacle à l'intérieur ; l'obstacle diminue la section, on a donc le même effet. Si cet obstacle est un cylindre tournant, d'axe perpendiculaire à l'axe de la canalisation, alors le frottement accélère le fluide d'un côté et le ralentit de l'autre. On a donc une diminution de pression d'un côté et une augmentation de l'autre, le cylindre subit une force : c'est l'effet Magnus (l'on considère souvent l'effet Magnus dans l'air, qui est un fluide compressible, mais le principe général reste le même).

Si la canalisation a une section constante, et qu'elle ne présente pas d'obstacle, alors la vitesse est constante. Si l'altitude varie, alors l'équation de Bernoulli nous indique que la pression varie à l'opposé de l'altitude. On peut évaluer alors la pression dynamique :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \quad (2.15)$$

2.3. Effet venturi

➤ Il se présente sous la forme d'un tube cylindrique présentant un étranglement et muni de deux manomètres : l'un avant l'étranglement et l'autre sur l'étranglement, comme le montre la figure ci-dessous.

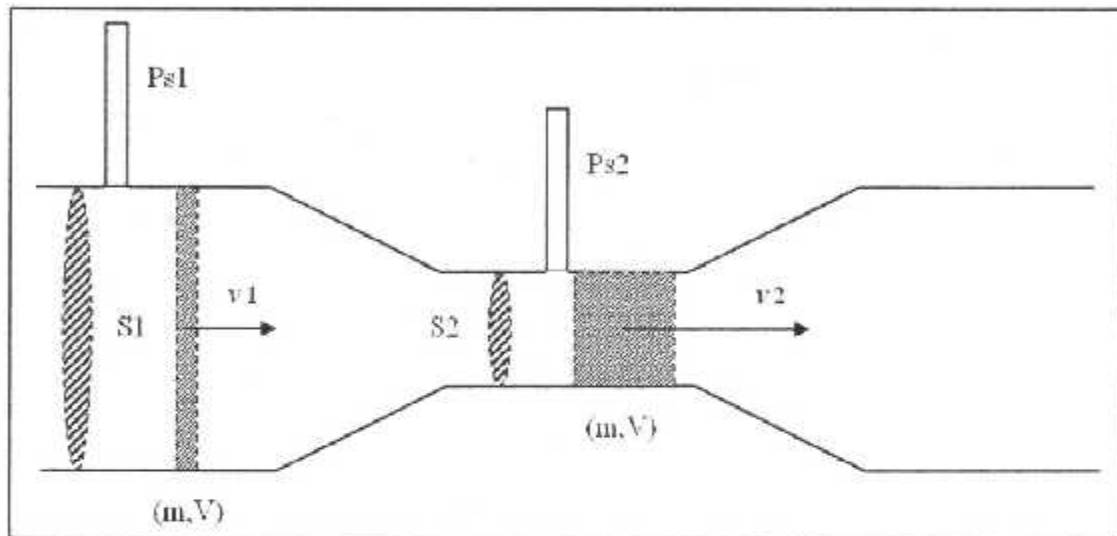


Figure (2.8) : Tube de venturi

➤ Le tube de venturi est un appareil de mesure qui a été utilisé depuis long temps pour la mesure de débit dans une conduite. Il est constitué essentiellement d'un convergent, d'un col et d'un divergent. Dans le convergent, la vitesse de fluide en écoulement augmente ce qui correspond à une diminution de la pression. La mesure de la valeur de cette diminution de la pression permet de déduire la valeur de débit. En traversant le col, le fluide passe par un divergent ou il reprend sa vitesse initiale et remonte en pression.

2.3.1 Le Rôle de tube de venturi

- vérifier la loi de Bernoulli.
- mesurer le débit au moyen d'une tube de Venturi.
- étudier la perte de charge le long du tube.

2.3.2 Théorie du Venturi

Le théorème de Bernoulli non généralisé implique que la vitesse soit uniforme dans les deux sections de mesure. Lorsqu'il n'en est pas ainsi, on peut appliquer le théorème de Bernoulli généralisé sur une surface fermée Σ . Alors, dans un écoulement permanent, s'il n'y a aucune puissance fournie ou reçue à l'intérieur d'un volume de contrôle, nous avons :

2.3.2.1 Étude en fluide parfait

$$\int_{\Sigma} \left(p + \rho g z + \rho \frac{V^2}{2} \right) V, ds = 0 \quad (2.16)$$

En supposant que la vitesse est uniforme dans une section droite, l'équation précédente, écrite entre la section 1 et la section 2 (col), devient :

$$V_1 S_1 \left(p_1 + \rho g z_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} \right) - V_2 S_2 \left(p_2 + \rho g z_2 + \rho \frac{V_2^2}{2} \right) \quad (2.17)$$

Par ailleurs, l'équation de conservation de la masse s'écrit :

$$q_v = V_1 S_1 = V_2 S_2 \quad (2.18)$$

Ce qui donne, en notant la pression motrice $p_g = p + \rho g z$:

$$p_{g,1} + \rho \frac{V_1^2}{2} = p_{g,2} + \rho \frac{V_2^2}{2} \quad (2.19)$$

En utilisant à nouveau la conservation du débit, on peut écrire :

$$p_{g,1} - p_{g,2} = \rho g (h_1 - h_2) = \rho \frac{V_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right] \quad (2.20)$$

Avec h_1 et h_2 les hauteurs d'eau correspondant à chacune des prises sur le manomètre différentiel. Il vient alors :

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2}} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (2.21)$$

On en déduit l'expression théorique du débit :

$$Q_{v,th} = V_2 S_2 = \frac{S_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2}} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (2.22)$$

Pour un fluide incompressible parfait (de viscosité nulle) en écoulement stationnaire indépendant du temps, dans le champ de pesanteur terrestre, la quantité :

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z \quad (2.23)$$

se conserve sur une ligne de courant (par exemple, la ligne de courant \mathcal{L}) : c'est ce qui constitue le **théorème de Bernoulli**.

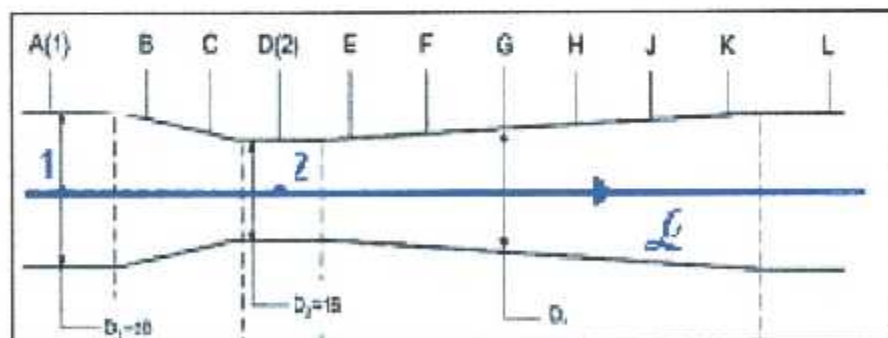


Figure (2.9) : Ligne de courant.

L'écoulement de l'eau se fait à température constante donc la masse volumique de l'eau ρ_{eau} est constante. Le débit-masse Q_m est constant en écoulement stationnaire or

$Q_m = \rho v S = \rho Q_v$ donc le débit-volume Q_v est constant également. (**Equation de continuité**).

En appliquant l'équation de continuité entre les sections S_1 et S_2 , on a :

$$V_1 S_1 = V_2 S_2 \quad (2.24)$$

Quand la section diminue, la vitesse d'écoulement augmente ($S \searrow, v \nearrow$).

Le théorème de Bernoulli appliqué entre les points 1 et 2 appartenant à la ligne de courant \mathcal{L} s'écrit :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g z_2 \quad (2.25)$$

Z représente la côte d'un point ; ici, $z_1 = z_2$ donc :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad \{E1\} \quad (2.26)$$

Puisque $S_1 > S_2$ alors $v_1 < v_2$ donc :

$$\frac{1}{2} \rho V_1^2 < \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad \text{et} \quad p_1 > p_2$$

Lorsque la pression dynamique $\frac{1}{2} \rho v^2$ augmente, la pression statique p diminue.

On remplace dans {E1} les vitesses en fonction du débit-volume: $V_1 = \frac{Q_v}{S_1}$ et $V_2 = \frac{Q_v}{S_2}$

Ce qui donne :

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho Q_v^2 \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right) \quad \{E2\} \quad (2.27)$$

Détermination de la différence de pression $p_1 - p_2$

La vitesse d'écoulement v est constante. Dans une section droite pour un fluide parfait donc la quantité $\frac{1}{2}\rho v^2$ l'est également. Ce qui permet d'écrire $p + \rho gz = \text{cste}$ dans la section droite S .

Dans le tube manométrique à la verticale de S , l'eau est au repos (dans le champ de pesanteur) donc la relation de la statique des fluides est applicable soit :

$$P + \rho gz = \text{cste} \quad (2.28)$$

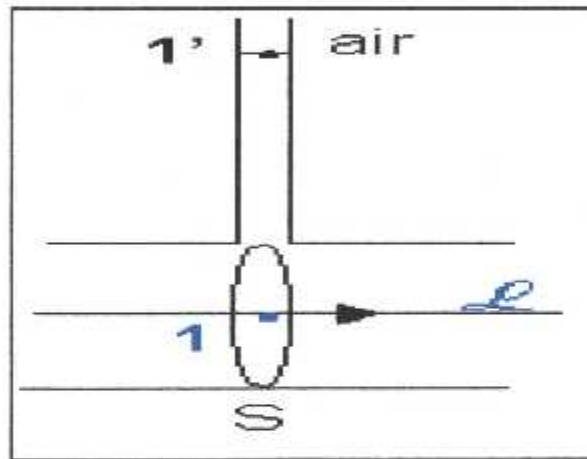


Figure (2.10) : Différence de pression entre deux points.

Finalement, il est possible d'écrire la relation « $p + \rho gz = \text{cste}$ » entre le point 1 et le point 1' (en contact avec l'air atmosphérique).

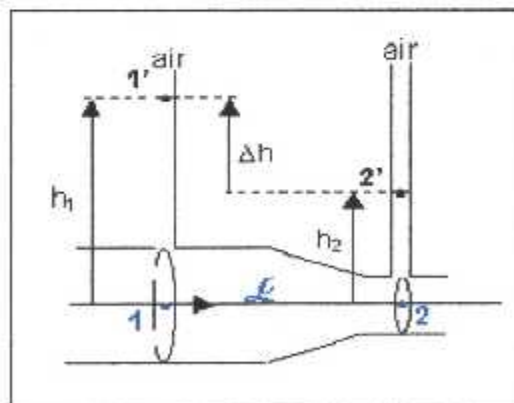


Figure (2.11) : Différence de pression entre deux sections différes.

Entre les points 1 et 1' :

$$P_1 + \rho g z_1 = P_{1'} + \rho g z_{1'} \quad (2.29)$$

Or $p_{1'} = p_{atm}$ donc : $P_1 - P_{atm} = \rho g h_1$ (1)

De même, entre les points 2 et 2' : $P_2 - P_{atm} = \rho g h_2$ (2)

En faisant (1) - (2) : $P_1 - P_2 = \rho g \Delta h$

En remplaçant dans {E2} :

$$\rho g \Delta h = \frac{1}{2} \rho Q_V^2 \left(\frac{1}{S_2^2} - \frac{1}{S_1^2} \right) \quad (2.30)$$

Ce qui donne la relation finale du débit :

$$Q_V = S_1 S_2 \sqrt{\frac{2g}{S_1^2 - S_2^2}} \cdot \sqrt{\Delta h} \quad (2.31)$$

En posant : $C = S_1 S_2 \sqrt{\frac{2g}{S_1^2 - S_2^2}}$, (coefficient lié aux dimensions du Venturi)

$$Q_V = C \cdot \sqrt{\Delta h} \quad (2.32)$$

2.3.2.2. Étude en fluide réel (visqueux)

Si l'on ne néglige pas la viscosité, le théorème de Bernoulli conduit à :

$$V_1 S_1 \left(p_{f,1} + \rho \frac{V_1^2}{\gamma} \right) - V_2 S_2 \left(p_{f,2} + \rho \frac{V_2^2}{\gamma} \right) = P_f \quad (2.33)$$

Où le terme supplémentaire correspond à la puissance dissipée par la viscosité du fluide ($P_f > 0$). Dans ces conditions, le débit mesuré $q_{v,exp}$ est plus faible que le débit théorique obtenu en fluide parfait, et l'on a :

$$q_{v,exp} = C_q q_{v,th} \quad (2.34)$$

Où $C_q < 1$ est le coefficient de débit qui est fonction de la géométrie du tube et du nombre de Reynolds de l'écoulement.

2.3.3. Perte de charge due au Venturi

Appliquons l'équation (2.8) entre les sections 1 et 11 où l'on a : $S_1 = S_{11} \Rightarrow V_1 = V_{11}$

Il vient :

$$P_{g,1} - P_{g,11} = \frac{P_f}{v_2 s_2} = \frac{P_f}{q_v} \quad (2.35)$$

Soit encore :

$$h_1 - h_{11} = \frac{P_f}{\rho g q_v} \quad (2.36)$$

On pose habituellement :

$$\frac{P_f}{\rho g q_v} = \varepsilon \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.37)$$

Où ε est un nombre sans dimension, d'où :

$$h_1 - h_{11} = \varepsilon \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.38)$$

Où ε , coefficient de perte de charge du Venturi, est fonction de la géométrie du Venturi et du nombre de Reynolds Re .

$$Q_v = S_1 S_2 \cdot \sqrt{\frac{2g}{s_2^2 - s_1^2}} \sqrt{\Delta h} \quad (2.39)$$

En posant: $C = S_1 S_2 \sqrt{\frac{2g}{v_1^2 - v_2^2}}$, (coefficient lié aux dimensions du venturi).

$$Q_v = C \cdot \sqrt{\Delta h}$$

(2.40)

2.3.4. Venturi utilisé en débitmètre

Principe :

Pour mesurer le débit d'un fluide en écoulement dans une conduite, il est possible d'utiliser un tube de Venturi installé sur la conduite.

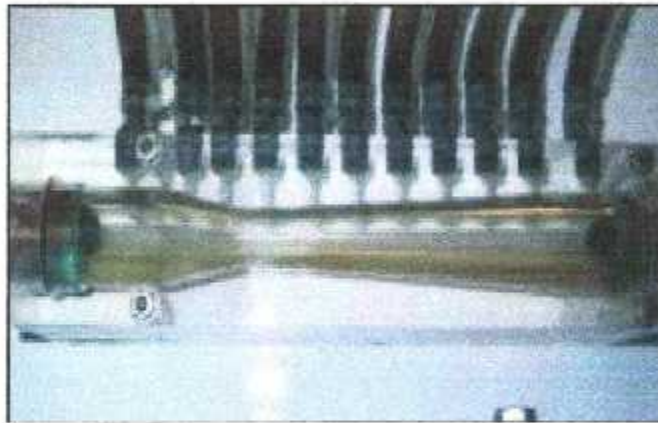


Figure (2.12) : Tube de venturi.

En mesurant la différence de pression entre l'entrée du convergent et le col du tube de Venturi, il est possible d'accéder au débit de l'écoulement.



Figure (2.13) : Les tubes manométriques.

La photo précédente montre les tubes manométriques du Venturi. La hauteur d'eau y est d'autant plus faible que la pression dans le Venturi est faible et la vitesse d'écoulement élevée.

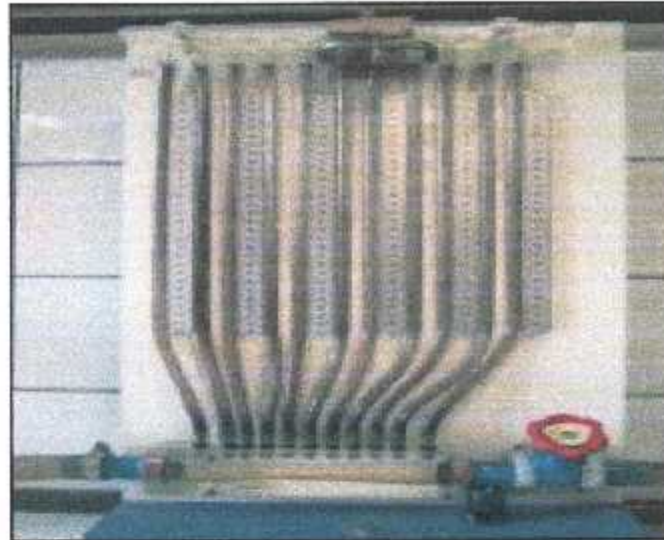


Figure (2.14) : Banc hydraulique de tube de venturi.

La connaissance du débit par ce type de procédé est très utilisée dans l'industrie (diaphragme, Tuyère, Venturi).

Le schéma de l'installation est donné ci-dessous :

Hypothèse : le débit d'entrée indiqué par la position du flotteur du rotamètre est égal au débit en sortie du Venturi (le volume d'eau retenu dans les tubes manométriques du Venturi est négligeable).

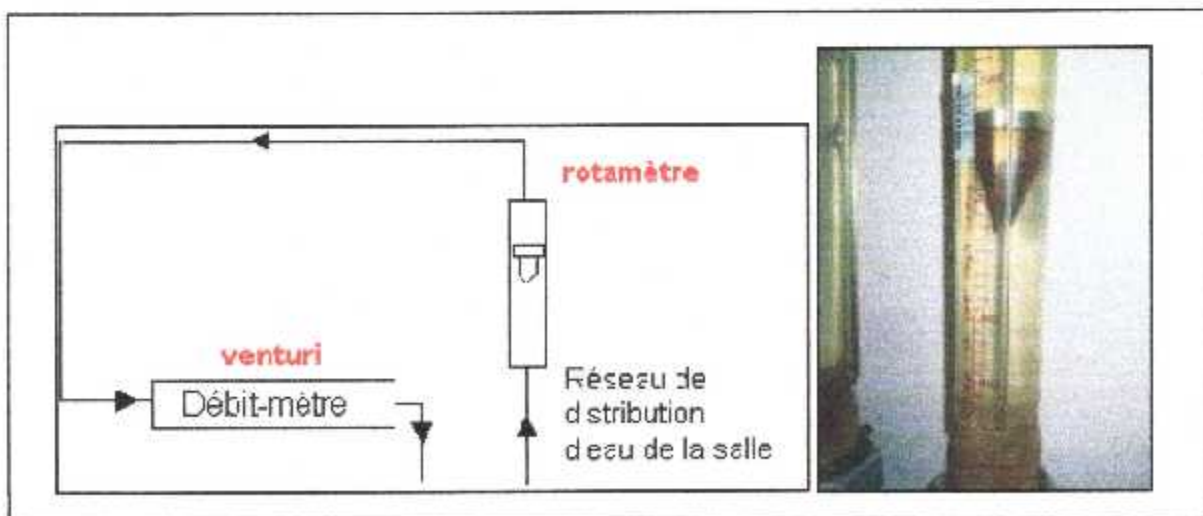


Figure (2.15) : Le schéma de l'installation de venturi.

Par application du théorème de Bernoulli et de l'équation de continuité, et en assimilant l'eau à un fluide parfait, on trouve à partir de l'étude théorique que le débit s'écrit :

$$Q_v = C \cdot \sqrt{\Delta h} \quad (2.41)$$

Avec $C = 9,62 \cdot 10^{-4}$ (uSI) pour le Venturi étudié.

Donc : $Q_v = 9,62 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\Delta h}$

Les mesures effectuées par un binôme d'étudiants ont permis de tracer le graphe suivant :

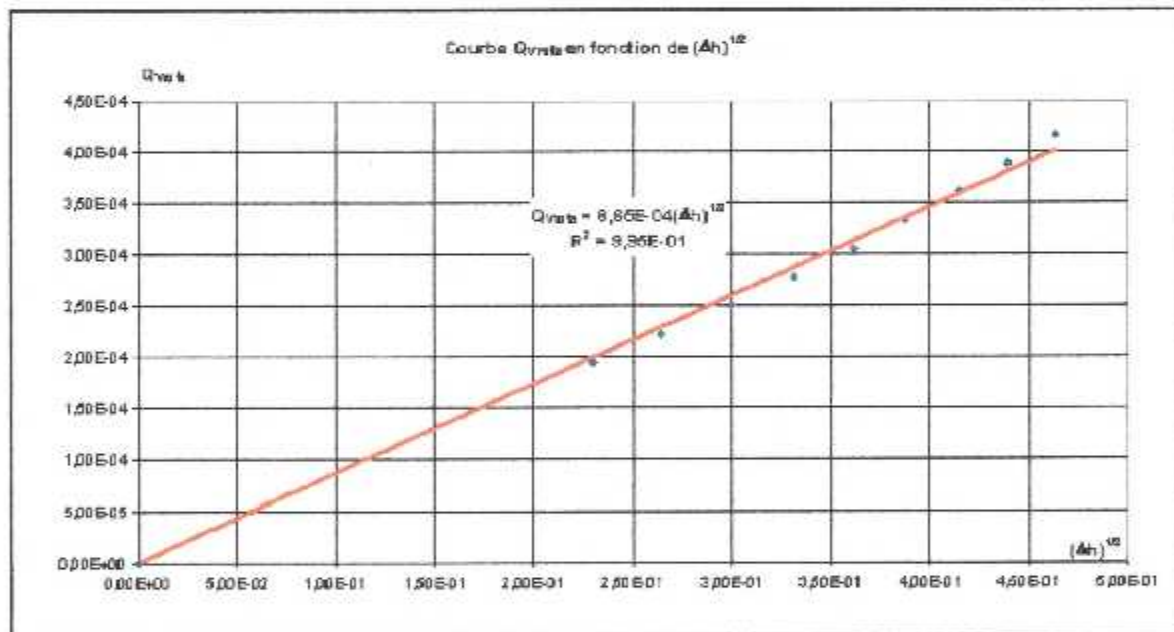


Figure (2.16) : Courbe de débit volumique de rotamètre en fonction de différence de hauteur.

Les mesures obtenues permettent de tracer le graphe $Q_{V\text{rota}} = f(\sqrt{\Delta h})$: les points sont corrélés de façon satisfaisante (coefficient R^2 proche de 1) avec le modèle choisi (droite linéaire) comme l'étude théorique le prévoit.

Le coefficient directeur de la droite obtenue ($8,65 \cdot 10^{-4}$) est inférieur au coefficient C ($9,62 \cdot 10^{-4}$) calculé à partir de l'étude théorique du Venturi.

Ceci est dû au fait que la viscosité de l'eau en écoulement n'est pas nulle (on ne peut plus alors dire que la vitesse est la même en tout point d'une section droite) et qu'il existe donc une perte de charge dans l'appareil.

Pour tenir compte de cela, on introduit un coefficient k tel que :

$$Q_{V\text{rota}} = k Q_{V\text{venturi}} \quad (2.42)$$

Soit : $Q_{V\text{rota}} = k C \sqrt{\Delta h}$, ce qui donne $k \cdot C = 8,65 \cdot 10^{-4}$
Et donc :

$$K = \frac{8,65 \cdot 10^{-4}}{9,62 \cdot 10^{-4}} = 0,90$$

La valeur indiquée de k est une valeur moyenne, en réalité k est fonction du débit d'écoulement comme l'indique le graphe suivant :

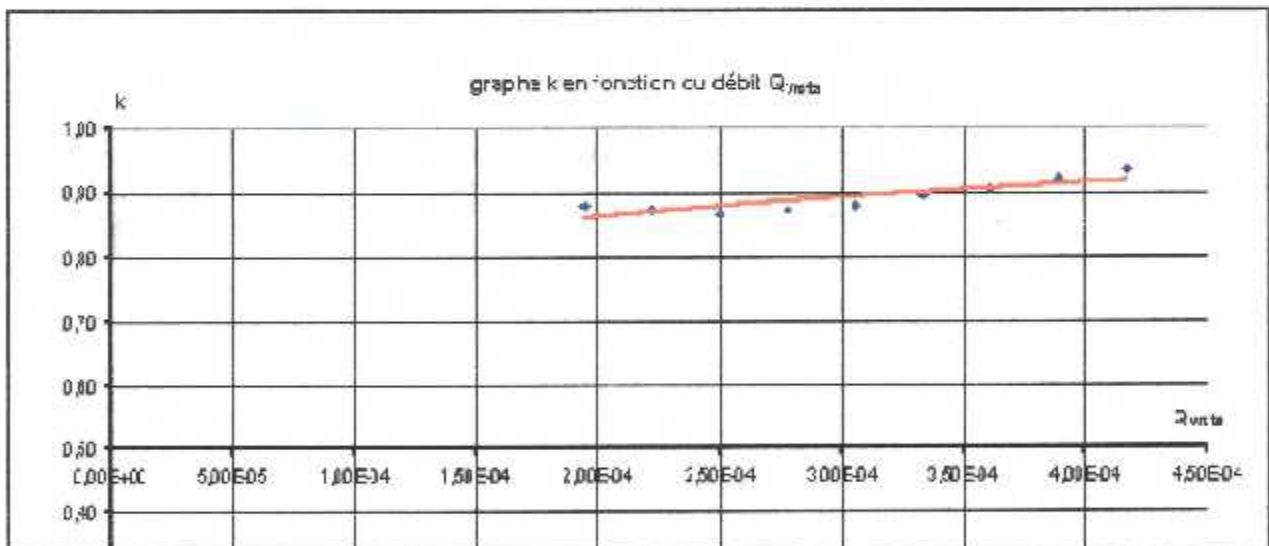


Figure (2.17) : Graphe de k en fonction de débit volumique de rotamètre.

La tendance observée est que k augmente lorsque le débit augmente. (k varie de 0,88 à 0,93 lorsque le débit varie de 700 L/h à 1500 L/h). En général, ce phénomène est constaté sur un venturi de type industriel (équipé d'un transmetteur de différence de pression entre l'amont et le col de l'appareil). Cette courbe est établie par le constructeur du débit-mètre.

Pour comprendre comment se répartissent les pertes de charge dans l'appareil, il est possible de tracer les graphes superposés de la répartition des pressions (théoriques et réelles) dans le venturi.

En abscisse est portée la distance d comptée à partir de la première prise de pression. En ordonnée est portée la grandeur :

$$P_n - P_1 = \rho g (h_n - h_1) \quad (2.43)$$

En effet, pour un fluide parfait (écoulement sans perte de charge, vitesse identique en tout point d'une section droite), le théorème de Bernoulli appliqué sur la ligne de courant passant par les points 1 et n donne (avec $z_1 = z_n$) :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_n + \frac{1}{2} \rho V_n^2 \quad (2.44)$$

Soit :

$$P_n - P_1 = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_n^2) \quad \{E\} \quad (2.45)$$

Or, il a été montré dans la théorie du venturi que :

$$P_1 - P_2 = \rho g \Delta h = \rho g (h_1 - h_2) \quad (2.46)$$

Ce qui permet d'écrire entre les points 1 et n que :

$$P_n - P_1 = \rho g (h_n - h_1) \quad (2.47)$$

Or par définition du débit : $V_1 = \frac{Q_v}{S_1}$ et $V_n = \frac{Q_v}{S_n}$

En remplaçant dans {E}:

$$p_h - p_1 = \frac{1}{2} \rho \mathcal{Q}_v^2 \left(\frac{1}{S_1^2} - \frac{1}{S_h^2} \right) \quad (2.48)$$

La répartition théorique des pressions (sans perte de charge) dans le venturi (pour un débit Q donné) ne dépend, avec les hypothèses énoncées, que des sections mises en jeu dans le venturi.

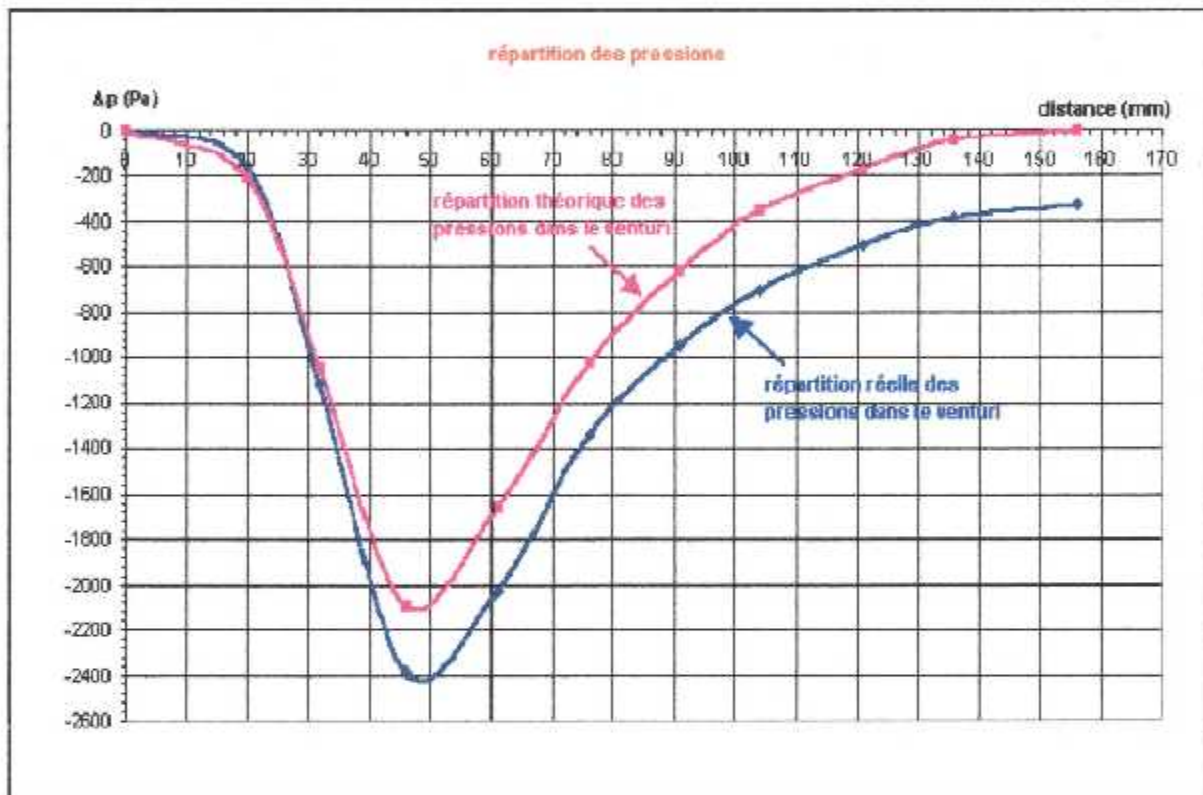


Figure (2.19) : Répartition de pression théorique et pratique.

Pour les mesures, le débit est fixé à $Q = 1,60 \cdot 10^{-3}$ L/h.

Le graphe montre que la courbe réelle de répartition des pressions est très proche de la courbe théorique dans le convergent (les pertes de charge y sont donc très faibles).

Les 2 courbes montrent un écart à partir du col du venturi ainsi que dans le divergent (cet écart est à peu près constant sur la longueur du divergent : en effet, la perte de charge dans un élargissement progressif ne dépend (à débit donné) que de l'angle au sommet du cône du divergent. Les mesures obtenues montrent que la perte de charge totale dans le venturi

représente 13,6% de la différence des pressions entre l'amont du convergent et le col du venturi et que cette perte de charge est créée essentiellement à partir du col.

Chapitre 3 :
Conception de banc d'essai
de tube de venturi

Chapitre 3

Conception d'un banc d'essais de tube de venturi

Avant la réalisation de n'importe quel projet ou système il faut passer par la phase de conception qui présente la définition de chaque élément et leurs positions et dimension.

3.1. Les composantes de l'appareil

3.1.1. Le tube de venturi

Le tube de venturi est une conduite composée de deux cônes, dans notre réalisation on a choisi deux cônes identiques de verre transparent, comme la figure ci-dessous montre.

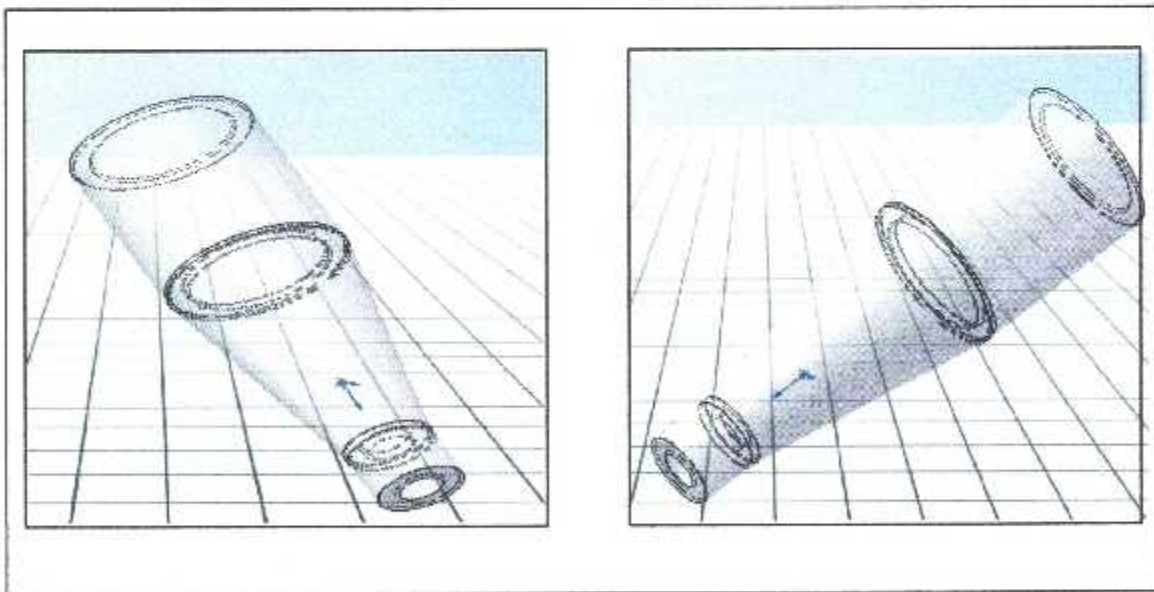


Figure (3.1) : Cône en verre transparent.

3.1.1.1. Perçage

C'est l'opération de faire des trous cylindriques dans les deux cônes pour les prises de pression. la figure ci-dessous montre ça :

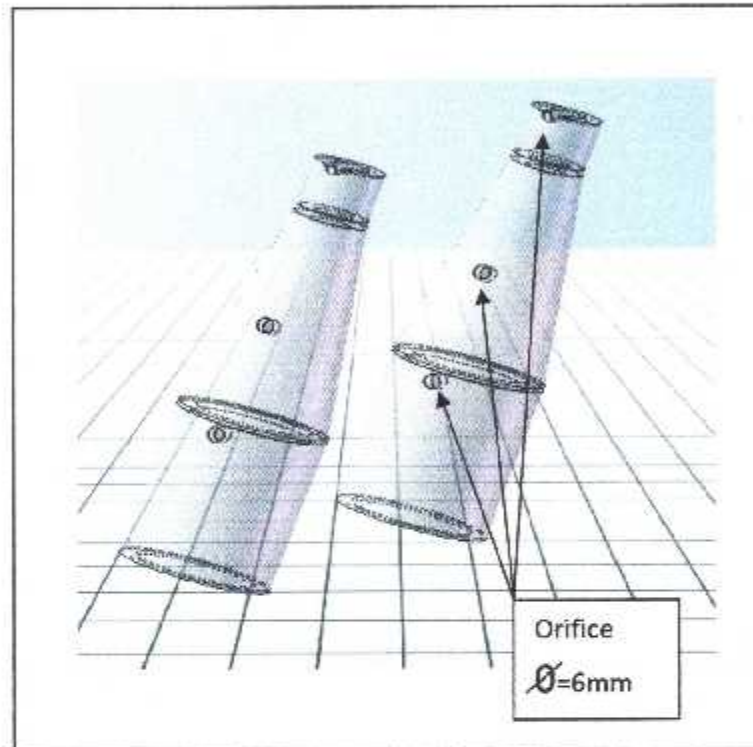


Figure (3.2) : Les cônes après le perçage.

3.1.1.2. Les prises de pression

Ce sont des tubes cylindriques, métalliques montés dans les orifices réalisés par le perçage, sa forme est comme les rivets. Avec les dimensions suivantes :

Diamètre extérieur	= 6mm
Diamètre intérieur	= 4mm.
Longueur	= 30mm.

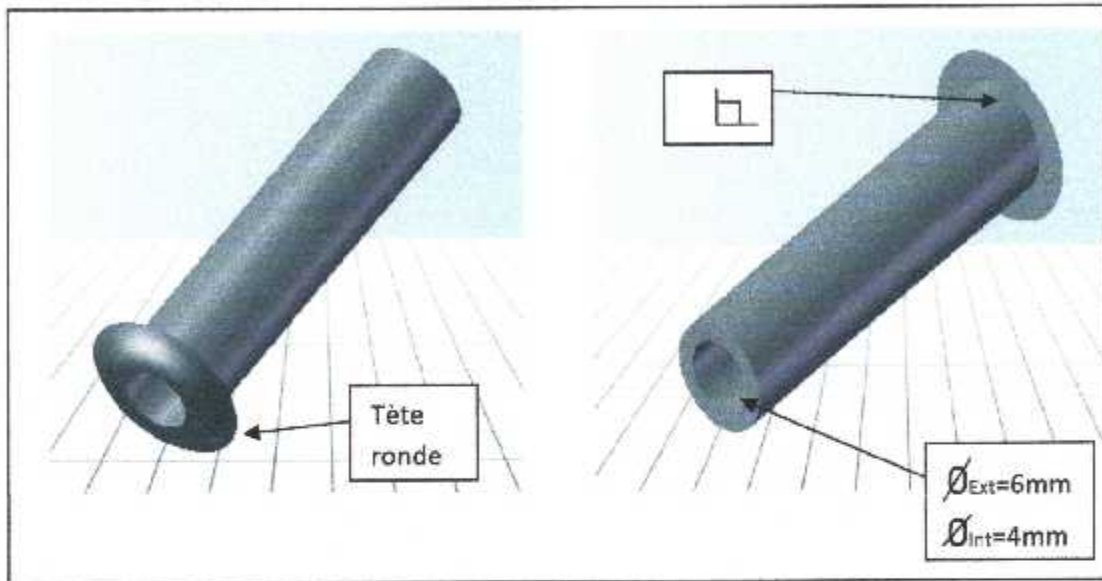


Figure (3.3) : Les prises de pression.

3.1.1.3. Assemblage

L'assemblage est de faire monter deux pièces ou plus pour former une seule pièce, dans notre réalisation nous avons utilisés l'assemblage plusieurs fois, Premièrement nous avons assemblés les prises de pression dans chaque cône et après nous avons assemblés les deux cônes pour obtenir la forme de tube de venturi (convergent - col - divergent).

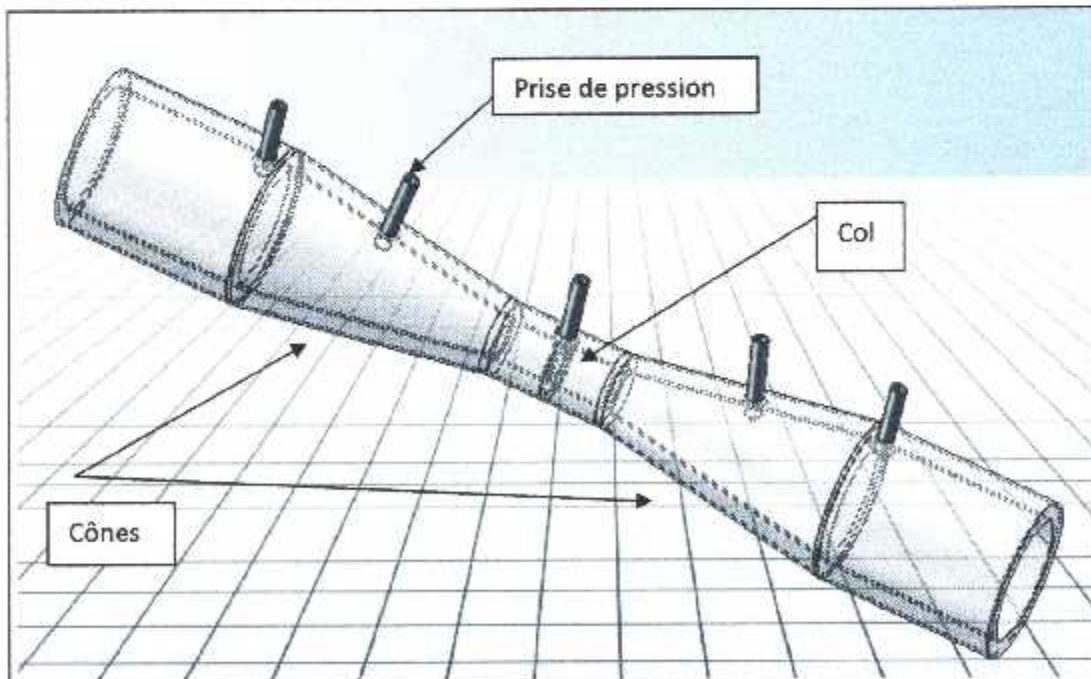


Figure (3.4) : Assemblage de tube de venturi.

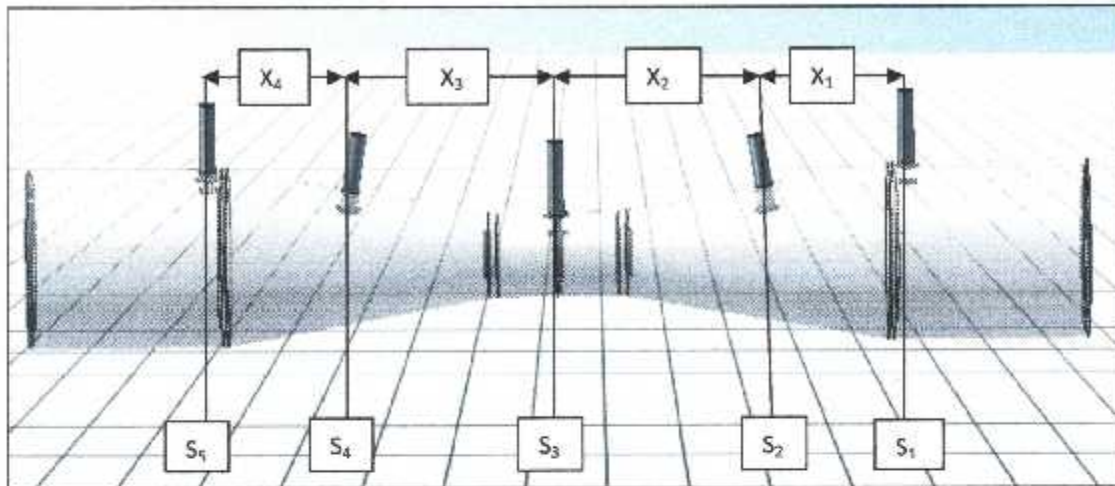


Figure (3.5) : Schéma dimensionnel de tube de venturi.

Les deux cônes qu'on a utilisés avec les dimensions suivantes :

3.1.1.4. Les sections

La section 01 « L'entrée de la convergence » :

Diamètre intérieur = 47 mm.

Diamètre extérieur = 57 mm.

Epaisseur = $(D \text{ extérieur} - D \text{ intérieur})/2 = 5 \text{ mm.}$

La section 02 « Dans la partie convergente » :

Diamètre intérieur = 29.42 mm.

Diamètre extérieur = 39.42 mm.

Epaisseur = $(D \text{ extérieur} - D \text{ intérieur})/2 = 5 \text{ mm.}$

La section 03 « le col » :

Diamètre intérieur = 16 mm.

Diamètre extérieur = 26 mm.

Epaisseur = $(D \text{ extérieur} - D \text{ intérieur})/2 = 5 \text{ mm.}$

La section 04 « Dans la partie divergente »

Diamètre intérieur = 29.42mm.

Diamètre extérieur = 39.42mm.

Epaisseur = $(D \text{ extérieur} - D \text{ intérieur})/2 = 5 \text{ mm.}$

La section 05 « La sortie de la partie divergente » :

Diamètre intérieur = 47 mm.

Diamètre extérieur = 57 mm.

Epaisseur = $(D \text{ extérieur} - D \text{ intérieur})/2 = 5 \text{ mm}$.

3.1.1.5. Les longueurs (horizontale, sur l'axe)

-La longueur totale de tube : = 340 mm.

-Les distances entre les prises de pression :

Entre section 01 et 02 : $x = 64.3 \text{ mm}$.

Entre section 02 et 03 : $x = 59.45 \text{ mm}$.

Entre section 03 et 04 : $x = 59.45 \text{ mm}$.

Entre section 04 et 05 : $x = 64.3 \text{ mm}$.

3.1.2. Le support

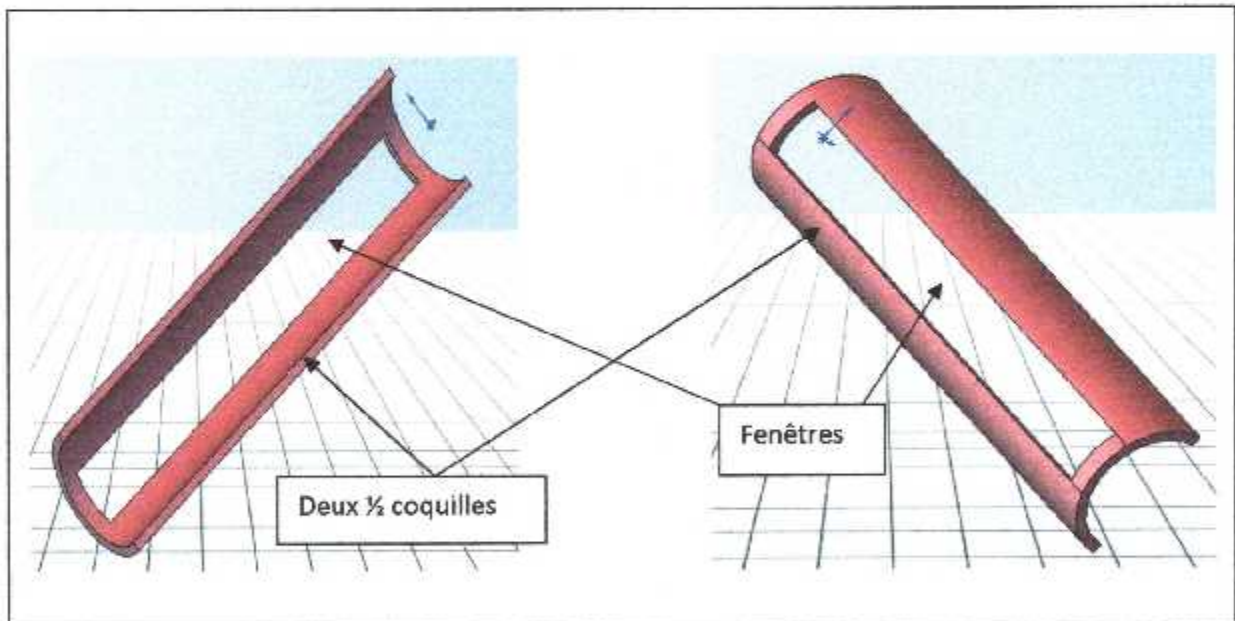


Figure (3.6) : Lc support.

Dans l'étape suivante, nous avons assemblés le tube de venturi avec son support.

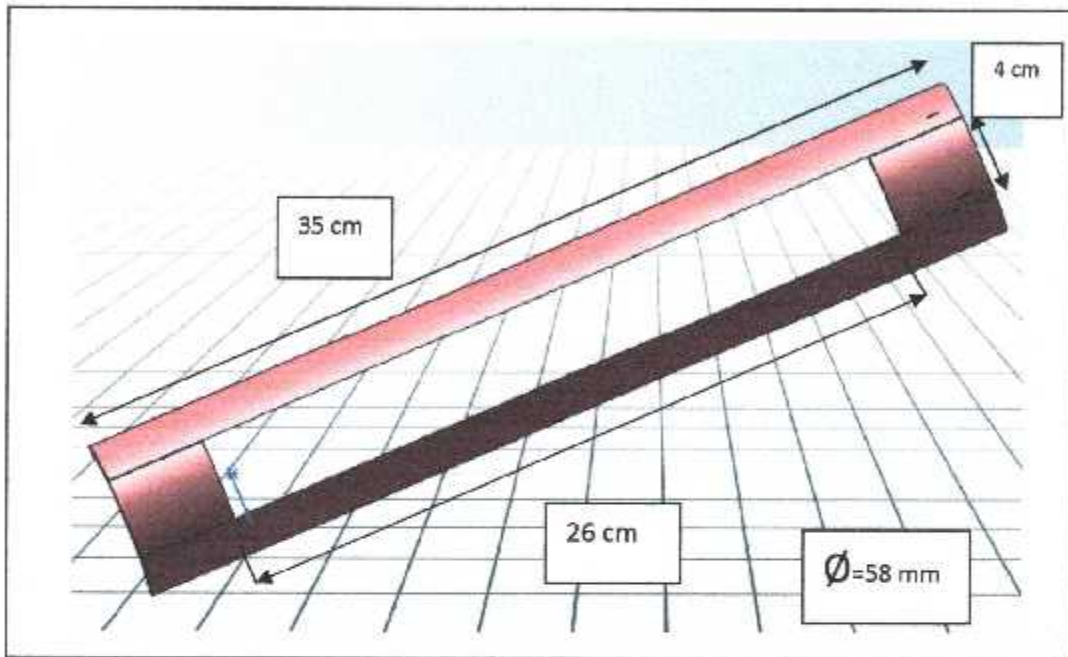


Figure (3.7) : Schéma dimensionnel de support.

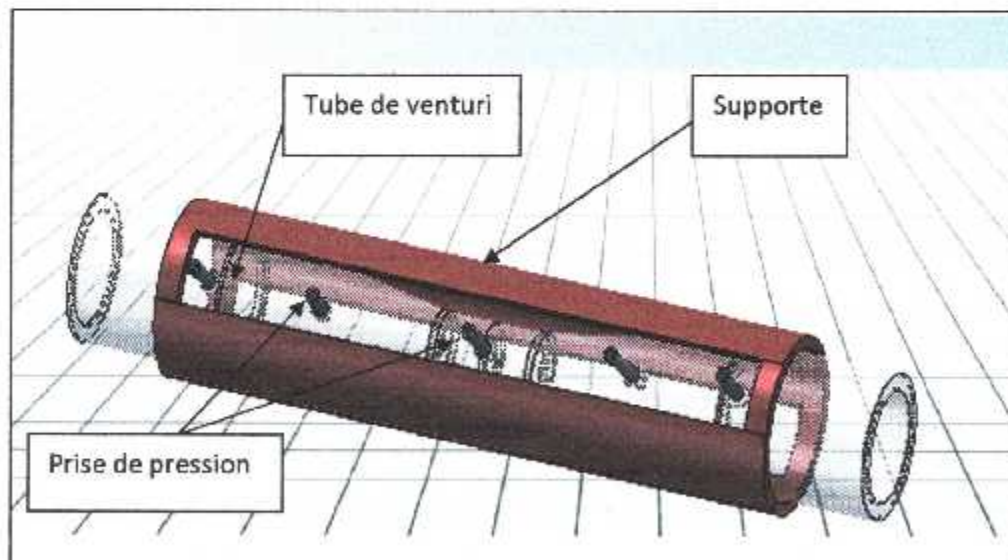


Figure (3.8) : Vue complète de tube de venturi.

3.1.3. La table

C'est l'élément sur laquelle qu'on pose le tube de venturi et les différentes composantes de notre banc d'essais.

La table qu'on a utilisée dans ce travail est constituée par deux étages avec les dimensions suivantes :

- *Première étage.*

La longueur = 40cm.
 La largeur = 40cm.
 L'épaisseur = 2 cm.
 L'hauteur = 30cm.

- *Deuxième étage.*

La longueur = 80cm.
 La largeur = 60 cm.
 L'épaisseur = 2 cm.
 L'hauteur = 90 cm.

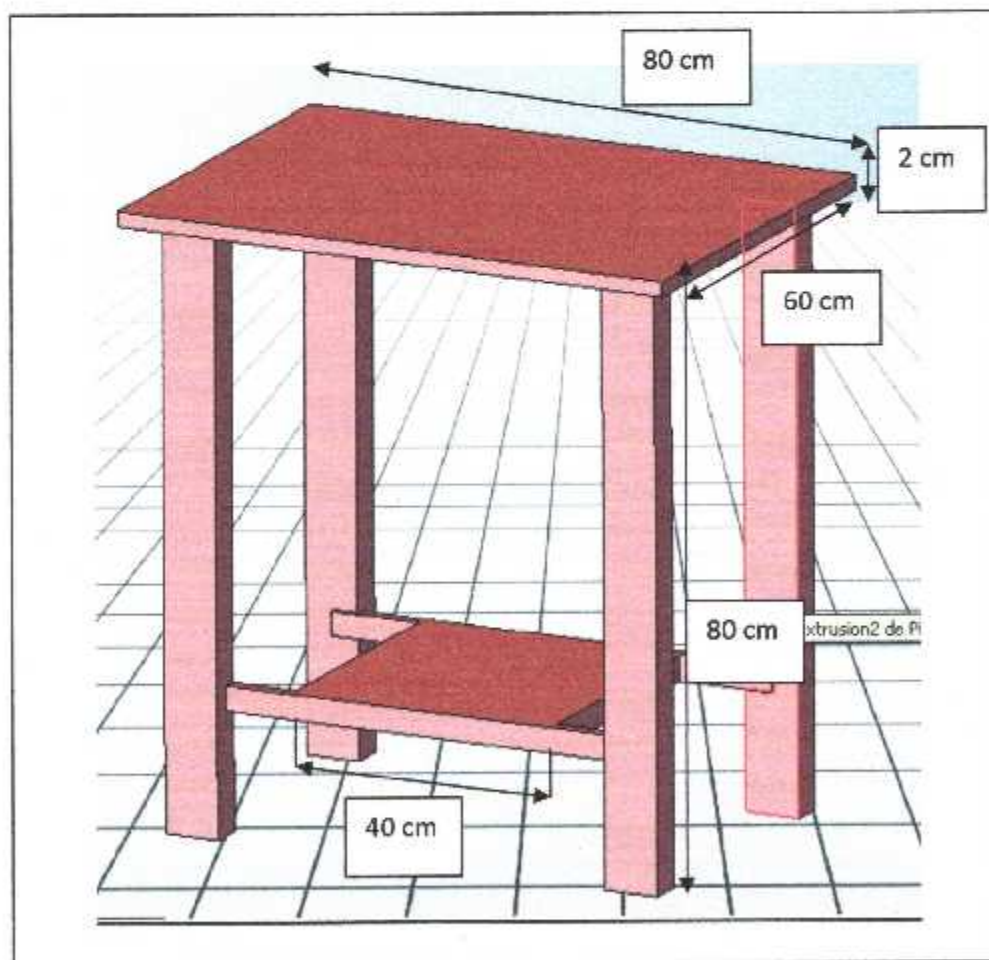


Figure (3.9) : La table.

3.1.4. Le tableau des manomètres

C'est un contre plaquer de forme rectangulaire placé verticalement sur la table dont le rôle est de porté les manomètres et les informations nécessaire concernant le tube de venturi et la méthode d'utilisation de ce système équipé par une zone blanche graduée millimétriquement pour la lecture des hauteurs de pression.

- *Les dimensions de Tableau*

Longueur = 100 cm.

Largeur = 80 cm.

L'épaisseur = 1 cm

Les dimensions de la zone de lecture

Longueur = 80cm.

Largeur = 60 cm.

L'épaisseur = 0.5 cm

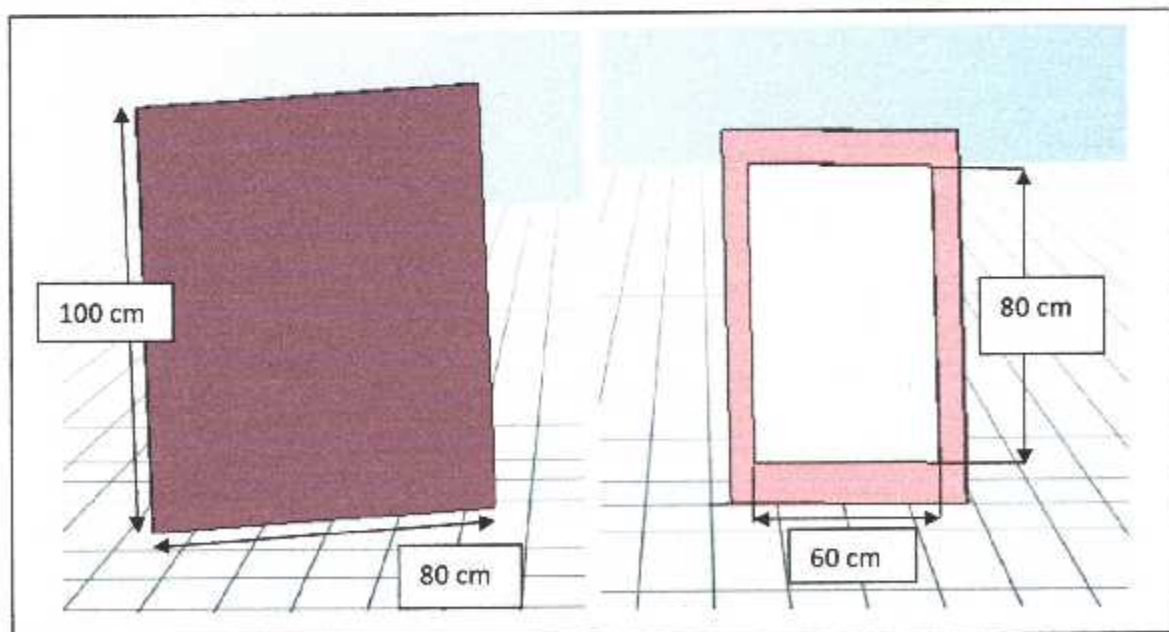


Figure (3.10) : Tableau d'affichage.

3.1.5. Les manomètres

Un manomètre est un tube transparent, mesure la pression d'un fluide, il est placé verticalement sur l'axe de l'écoulement, lié directement à l'air ambiant (Il existe plusieurs méthodes pour déterminer une pression d'un écoulement dans une conduite).

Pour notre travail, nous avons utilisés cinq tubes transparents de 8mm de diamètre et 75 cm de longueur installés sur le tableau d'affichage.

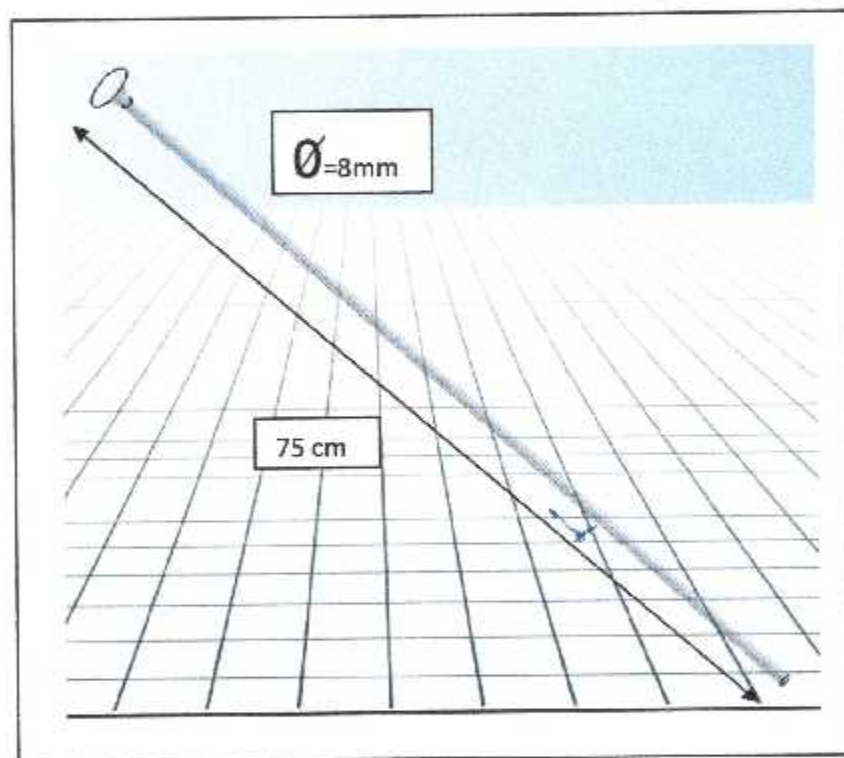


Figure (3.11) : Tube de mesure (hauteur de pression).

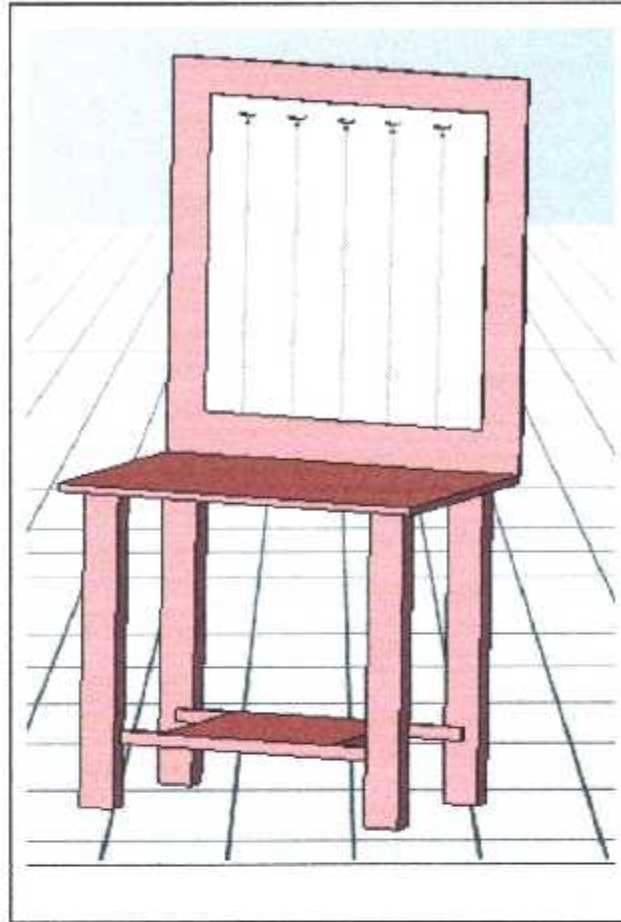


Figure (3.12) : L'assemblage (table + tableau + tube de mesure).

3.1.6. Le réservoir

C'est un récipient, cuve qui permet de contenir une réserve de gaz ou d'un liquide. Notre réservoir a une forme parallélépipédique ouverte en haut, avec un orifice de refoulement. Il est caractérisé par :

- Matière de construction : verre transparent de 0.5 cm d'épaisseur.

- Dimensions :

Le réservoir :

Longueur	= 60 cm.
Largeur	= 25 cm.
Hauteur	= 45 cm.

L'orifice de refoulement.

Diamètre a l'intérieur = 26mm

Diamètre a l'extérieur = 34mm

Le volume de réservoir = longueur x largeur x hauteur

$$V = 60 \times 25 \times 45$$

$$V = 67500 \text{ cm}^3$$

$$V = 0.067500 \text{ m}^3 \quad \longleftrightarrow$$

$$v = 67.5 \text{ litres}$$

Le réservoir monté sur une table des mesures suivantes.

Longueur = 60 cm.

Largeur = 25 cm.

Hauteur = 35 cm.

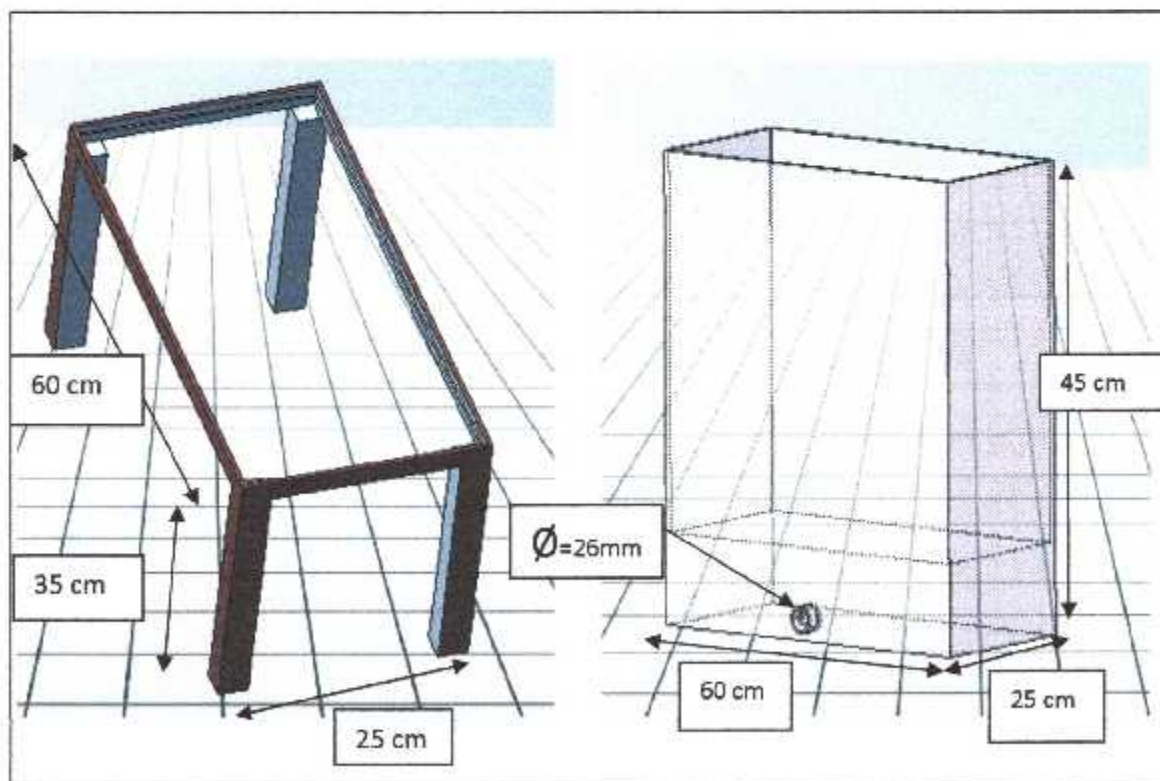


Figure (3.13): Schéma dimensionnel de réservoir.

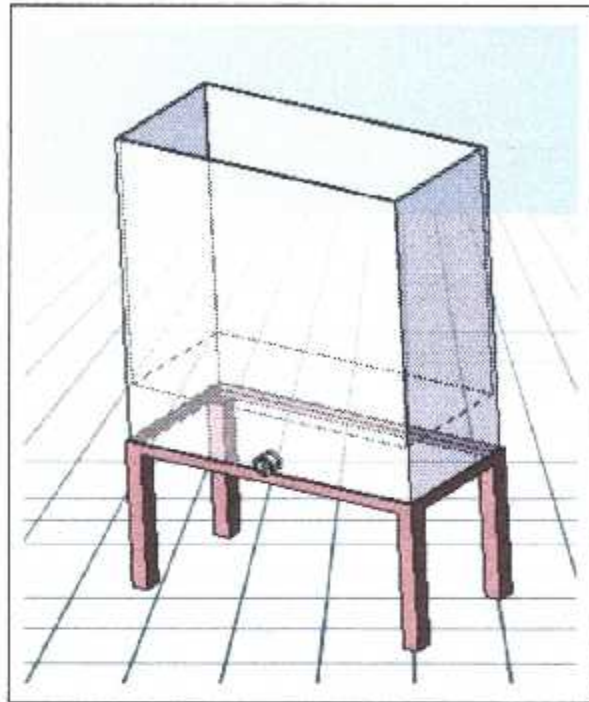


Figure (3.14) : Le réservoir.

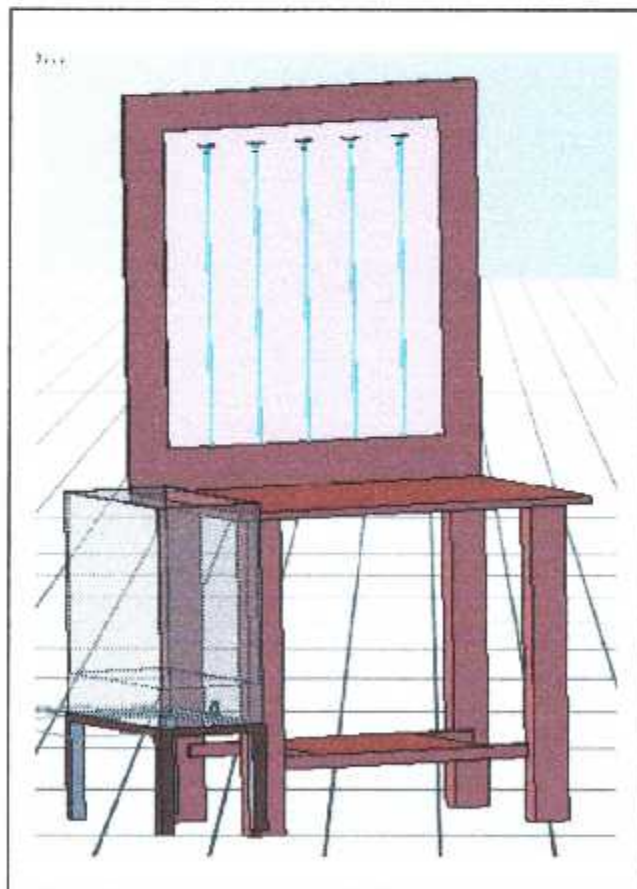


Figure (3.15) : L'assemblage (figure (3.13) + figure (3.14)).

3.1.7. La pompe :

Les pompes sont des appareils permettant le transfert d'énergie entre le fluide et un dispositif mécanique convenable. Suivant les conditions d'utilisation, ces machines communiquent au fluide soit principalement de l'énergie potentielle par accroissement de la pression en aval, soit de l'énergie cinétique par la mise en mouvement du fluide.

Notre réalisation a besoin d'une pompe avec un débit entre 30l/min et 50 l/min comme un débit maximal.

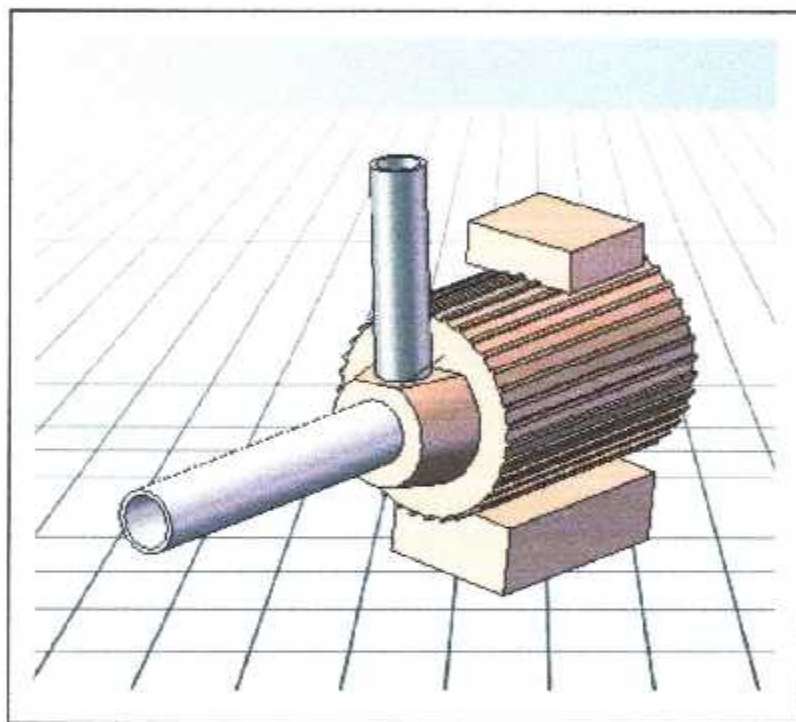


Figure (3.16) : La pompe.

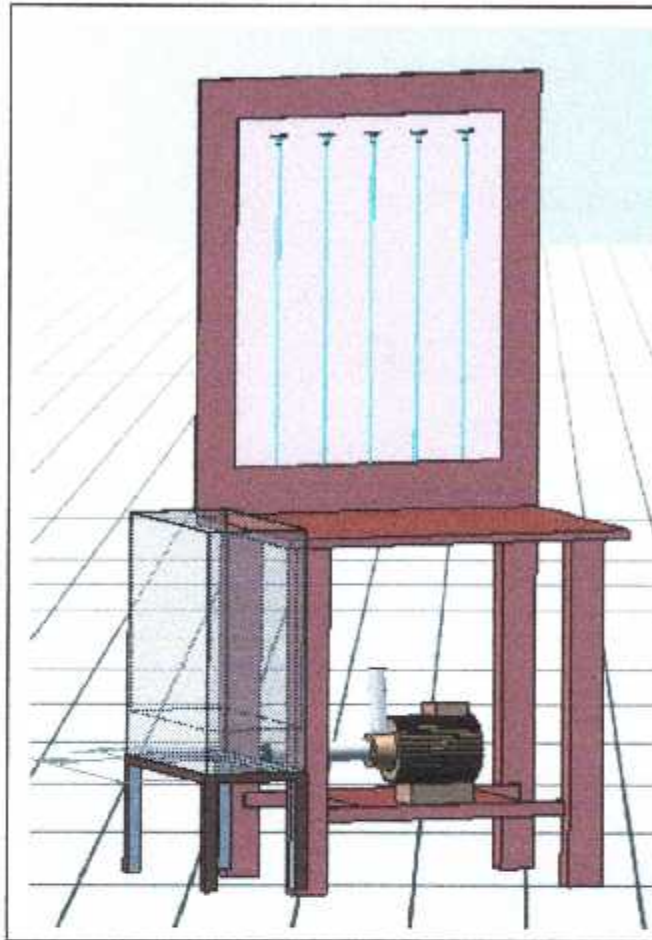


Figure (3.17) : L'assemblage (figure (3.15) + figure (3.16)).

3.1.8. Les vannes

Ces éléments sont définis comme des régulateurs du débit de liquide.

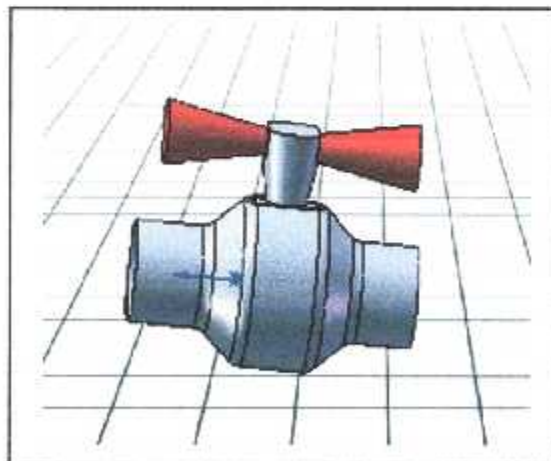


Figure (3.18) : La vanne.

-Les dimensions de la vanne :

Diamètre extérieur = 49 mm.

Diamètre intérieur = 40 mm.

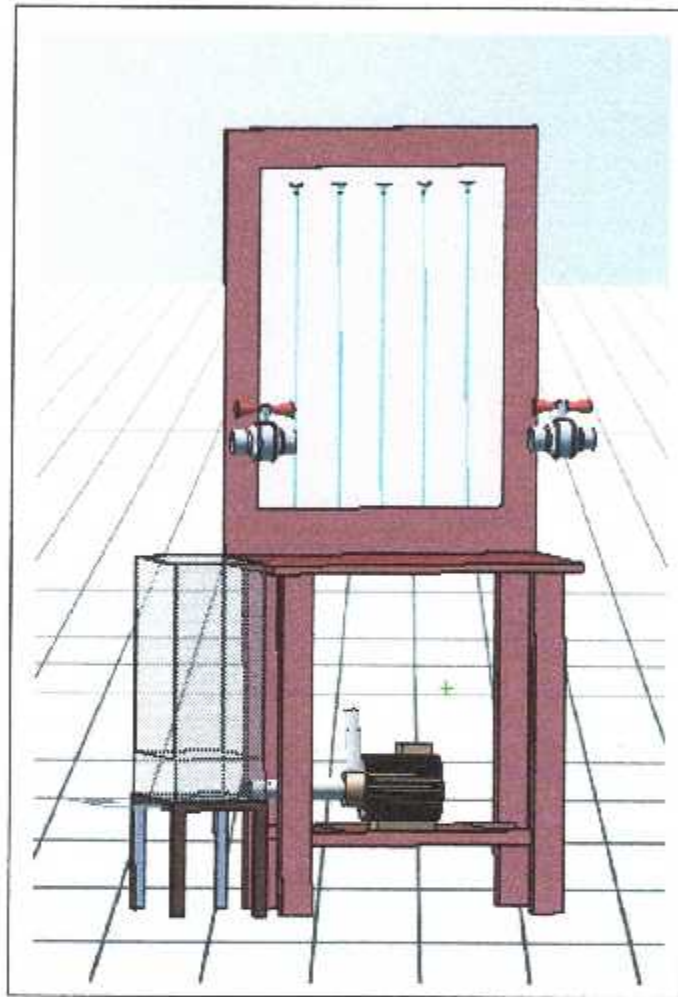


Figure (3.19) : Positions des vannes dans le banc d'essais.

3.1.9. Les canalisations

Ce sont des tubes cylindriques en plastique (tigre) dans les parties suivantes :

- entre le réservoir et la pompe.
- entre la pompe et la vanne (avant le tube de venturi).
- entre la vanne et le tube de venturi.
- entre le tube de venturi et le réservoir passant par une vanne.

-Les tubes utilisés ont les dimensions suivantes :

Diamètre extérieur = 34 mm.

Diamètre intérieur = 26 mm.

Nous utilisons les canalisations dans plusieurs lieux avec les dimensions suivantes :

- **Entre la vanne et la pompe :** diviser en quatre parties.

1 ^{ère} partie : entre la vanne et le premier coude :	l ₁ = 220 mm.
2 ^{ème} partie : entre le premier coude et le deuxième coude :	l ₂ = 350 mm.
3 ^{ème} partie : entre le deuxième coude et le troisième coude :	l ₃ = 500 mm.
4 ^{ème} partie : entre le troisième coude et la pompe :	l ₄ = 120 mm.
- **Entre la pompe et le réservoir :** diviser en deux parties.

1 ^{ère} partie : entre la pompe et le raccorillon.	l ₅ = 18 mm.
2 ^{ème} partie : entre le raccorillon et le réservoir :	l ₆ = 19 mm.
- **Entre la deuxième vanne et le réservoir :**

	l ₇ = 310 mm.
--	--------------------------

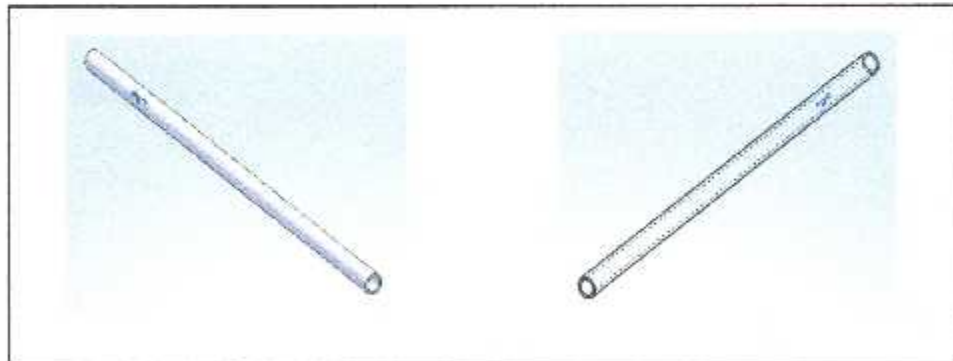


Figure (3.20) : Les tubes de canalisation.

3.1.10. Les coudes

Pour la réalisation de banc on a besoin d'utiliser 4 coudes dans les emplacements suivants :

- Entre la vanne et la pompe: trois coudes.
- Entre la deuxième vanne et le réservoir : un coude.

3.1.11. Le débitmètre

Un débitmètre est un appareil destiné à mesurer le débit d'un fluide (liquide ou gazeux) ; Selon le niveau du débit et la nature du fluide. Le principe du débitmètre adapté est très variable ; certains sont basés sur la mesure de la vitesse du fluide ; on utilisera dans ce cas un tube de Pitot, un débitmètre à turbine, un débitmètre à ultrasons et un débitmètre ionique.

- On peut également utiliser la mesure de la perte de charge (perte de pression) ou pression différentielle entre un repère amont et un repère aval, ceci à l'aide d'une plaque à orifice, d'une tuyère (comme dans le cas d'un débitmètre à tube de Venturi), d'un débitmètre électromagnétique, d'un débitmètre à effet vortex ou d'un débitmètre à diaphragme.
- Il existe aussi le débitmètre massique.
- Enfin, on peut utiliser le fluide pour entraîner quantitativement des dispositifs mécaniques mobiles :
 - débitmètre à pistons.
 - débitmètre à rotors.
 - débitmètre à turbine.

Dans notre réalisation nous avons besoin d'un débitmètre mais on ne le trouve pas, nous avons pensés de calculer le débit par une éprouvette de volume de 1 litre, un chronomètre et on calcul le débit par la relation : $Q_v = V / t$.

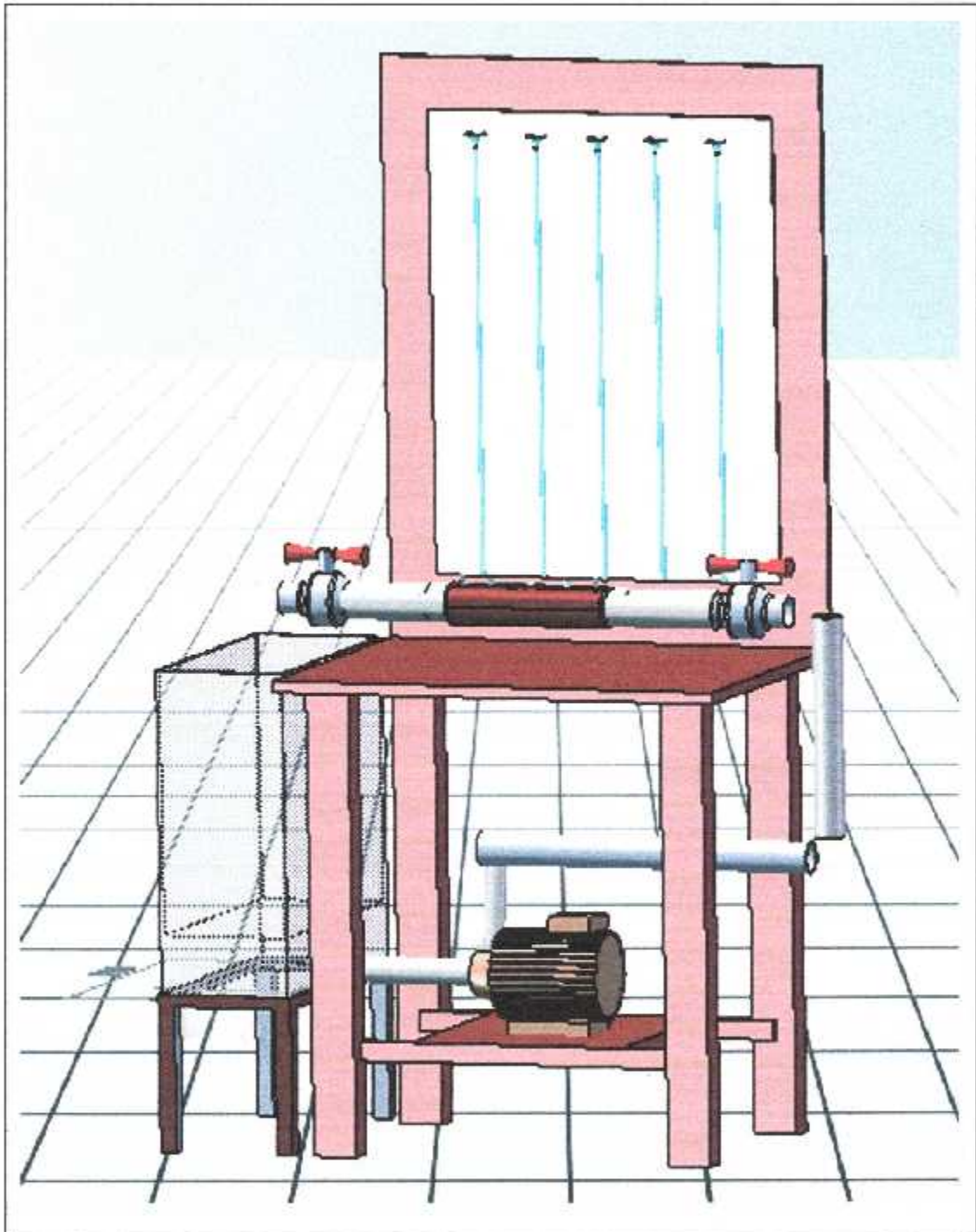


Figure (3.20) : Schéma de banc d'essais de tube de venturi.

Chapitre 4 :
Réalisation de banc
d'essai de tube de venturi

Chapitre 4

Réalisation de banc d'essai de tube de venturi

4.1. Réalisation de tube de venturi

4.1.1. Les cônes en verre

Nous faire notre réalisation de ce tube (venturi) à partir des bouteilles.

-Première étape :

Nous allons faire une coupe de cette bouteille dans sa partie inférieure.

-Deuxièmes étape :

On faire maintenant des trous dans chaque bouteille, pour monter les prises de pression comme le figure ci-dessous montre :

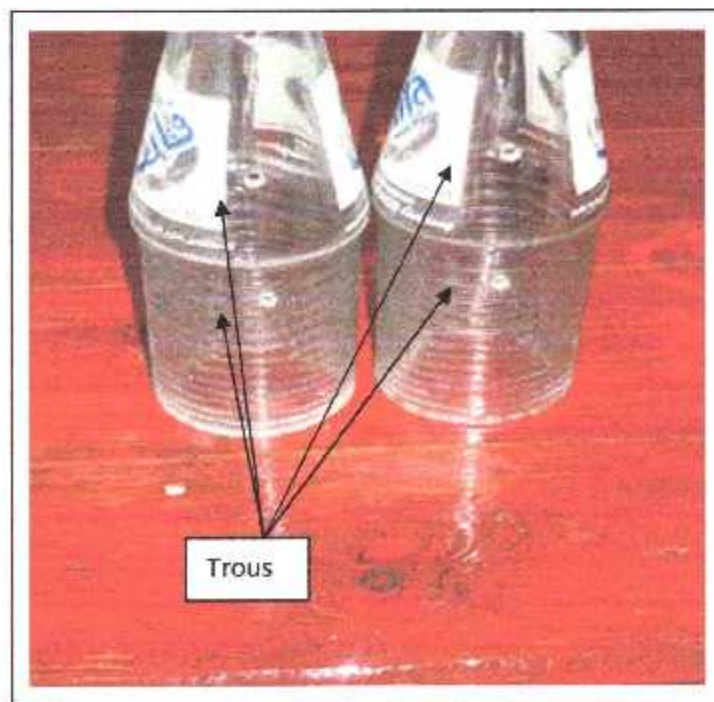


Figure (4.1) : Les trous des prises de pression.

-Troisième étape :

Maintenant on doit lier les deux bouteilles pour réaliser la convergence et la divergence et monter les prises de pression comme la figure suivante montre « figure 03 »

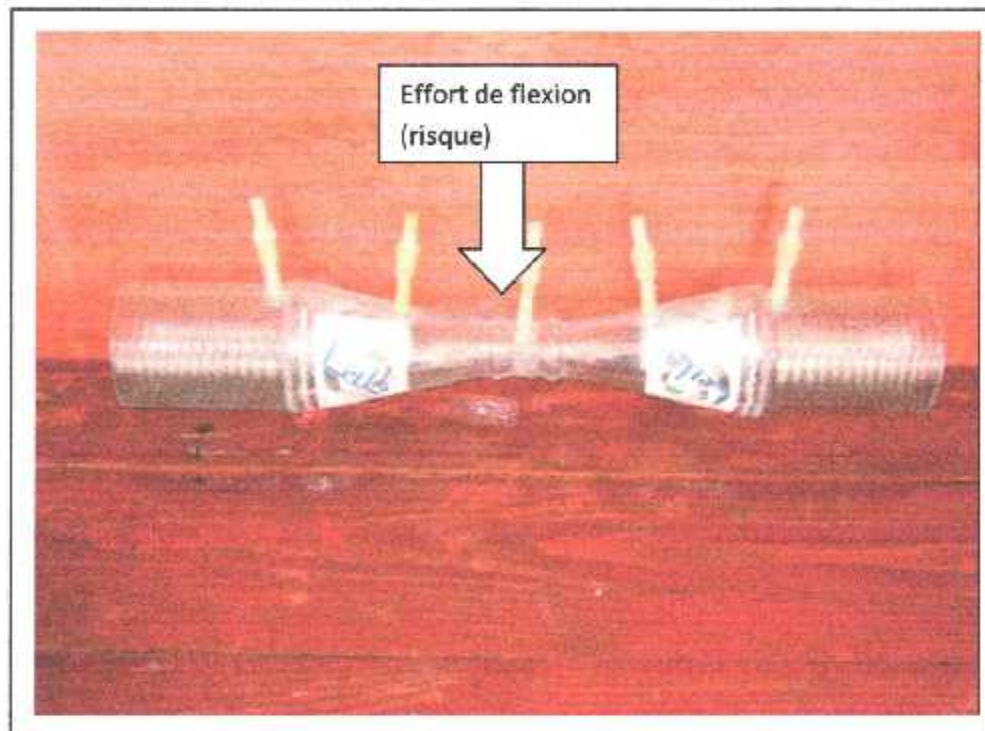


Figure (4.2) : Le tube de venturi.

4.1.2. Les prises de pression

Pour les prises de pression on a utilisé les rivets.

4.1.3. Le support de tube de venturi

Ce support est composé de deux parties identiques de bois, la figure (4.3) présente ces deux parties, et fixer entre eux par deux collets.

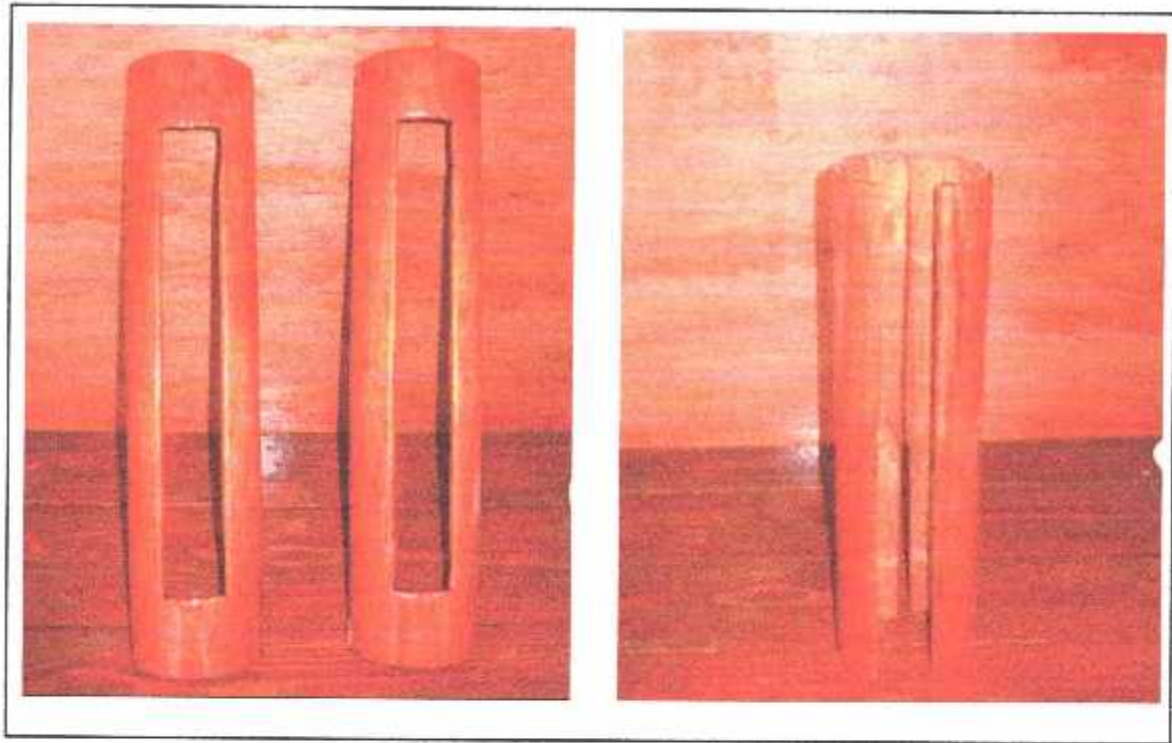


Figure (4.3) : les deux un demi coquais de support.

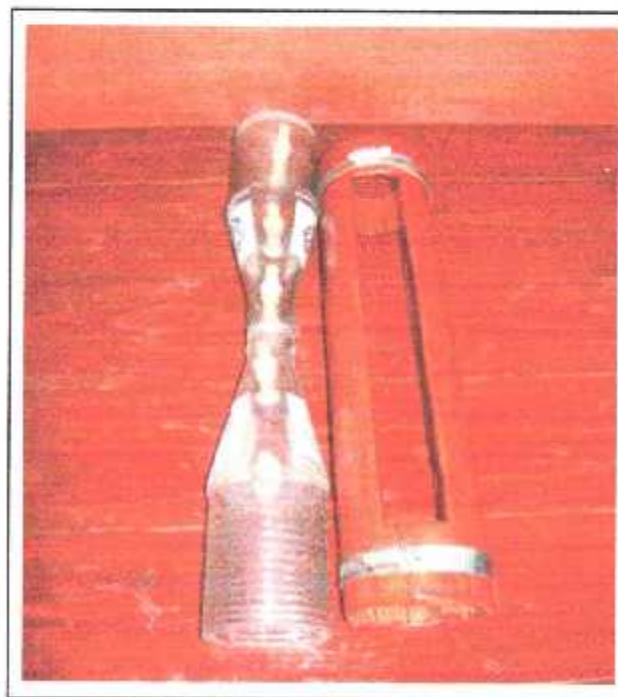


Figure (4.4) : Le tube et leur support.

Après la réalisation de support maintenant on peut mettre Notre tube de venturi à l'intérieur de ce support pour éviter la cassure de tube de venturi, on a arrivé à la forme finale de tube de venturi comme la figure (4.5) montre :



Figure (4.5) : L'assemblage de tube avec le support.

4.1.4. La table de banc d'essai

Dans notre réalisation, nous préférons la table en bois.

Notre table comporte aussi la table des manomètres, avec la zone de lecture des hauteurs.

✓ *Le rôle de la table :*

Elle est Comporte tout les composants de banc.



Figure (4.6) : La table réelle de banc.

4.1.5. La burette

Une burette est un accessoire de laboratoire permettant d'ajouter au goutte-à-goutte un liquide dans un récipient.

Elle est composée d'un tube en verre d'environ 1 cm de diamètre (il existe plusieurs tailles), gradué (généralement en dixième de millilitres), munie à son embouchure d'un robinet permettant de faire varier le flux du liquide, et ouvert à son autre extrémité.

Historiquement, le robinet était fabriqué en verre, qui était lubrifié afin de faciliter le mouvement de celui-ci. De nos jours, la plupart des burettes sont équipées de robinets en Téflon, ce qui évite les problèmes reliés aux blocages. En effet, plusieurs titrages nécessaires l'utilisation de bases fortes, telles que l'hydroxyde de sodium. L'hydroxyde de sodium, en plus de dissoudre à long terme la silice composant le verre, réagit également avec le dioxyde de carbone présent dans l'air afin de former des carbonates de sodium, qui peuvent alors obstruer l'interstice entre le robinet et la burette, empêchant le premier de tourner.

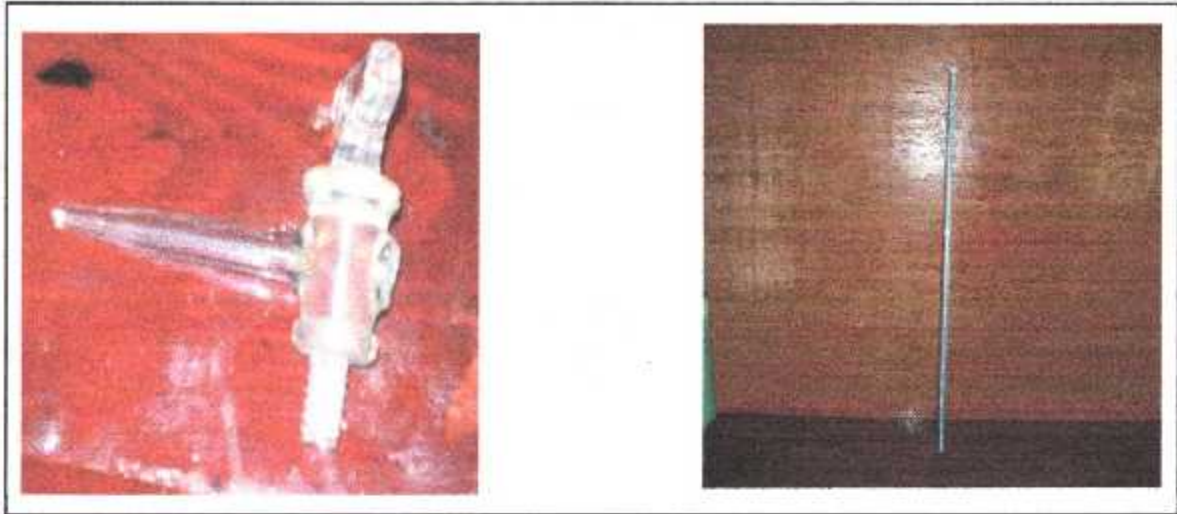


Figure (4.7) : La burette utilisée comme un manomètre.

4.1.6. Le réservoir :

C'est l'élément de stockage, dans notre réalisation nous préférons la matière en verre pour obtenir un réservoir avec un support en bois ; comme la figure (4.8) montre.



Figure (4.8) : Le réservoir réel de banc.

4.1.7. La pompe d'eau :

On utilise une pompe de marque chinoise portant le nom « LINZ ELECTRIC », avec les caractéristiques montrées dans la figure suivante « figure 4.9 »

Notre pompe est alimenté a travers d'un coupe courant (Switch), consiste de deux boutons, l'une vert « START » et l'autre rouge « STOP ».



Figure (4.9) : Caractéristiques de la pompe.



Figure (4.10) : La coupe courant.

4.1.8. Les vannes :

Elles sont les régulateurs de débit d'écoulement, dans notre réalisation on a utilisés deux vannes après et avant le tube, pour la protection de tube à la surpression.



Figure (4.11) : La vanne réclle.

4.1.9. L'éprouvette de mesure de débit :

Nous avons calculés le débit par le remplissage d'un éprouvette (volume) et compter le temps a partir d'un chronomètre (le temps), et appliquer la relation $Q_v = v/t$.



Figure (4.12) : L'éprouvette.

4.2. Le montage de banc :

Le montage de notre banc passe par les étapes suivantes :

- ✓ Le montage de réservoir et leur table en fer pour obtenir un réservoir mobile.
- ✓ Le montage de réservoir mobile avec la table de banc.
- ✓ Le montage des canalisations dans les places bien déterminé « dans le chapitre précédent ».
- ✓ Le montage des vannes avec le tube « l'une après et l'autre avant le tube ».
- ✓ Le montage des burettes dans la table des manomètres.
- ✓ Le montage de pompe dans notre circuit hydraulique.

En fin nous avons obtenus la forme finale de notre banc comme la figure suivante montre.



Figure (4.13) : La forme finale de banc.

Chapitre 5 :

Manipulations

Chapitre 5

Manipulation sur le système venturi

5.1. Le but de la manipulation

Le but principal de cette manipulation est de faire apparaître l'évolution des paramètres de l'écoulement le long d'un venturi et d'en déduire les caractéristiques de celui-ci.

5.2. Manipulation sur l'appareil

Pour étudier le coefficient c du venturi il est nécessaire de relever les valeurs (h_1 - h_2) pour différents débits q . dans un premier temps il est nécessaire d'effectuer la mise à zéro des manomètres. Pour cela il faut classer les paches d'air de l'appareil en ouvrant la vanne d'alimentation de banc hydraulique et la vanne de réglage de débit placée à la sortie de l'appareil. Au bout de quelques minutes on referme peu à peu la vanne de réglage du débit pour augmenter la pression dans le venturi afin dans les tubes manométriques et l'air contenu dans le collecteur. Lorsque l'eau atteint le niveau désiré dans les tubes on referme la vanne d'alimentation de banc. Les deux étant fermées, la valeur n'est soumise qu'à une pression modérée. les pieds réglables du support sont ensuite manœuvrés pour mettre l'appareil de niveau. Après cette mise à niveau d'une part, le plan des tubes manométriques doit être vertical et d'autre part tous les tubes manométriques doivent indiquer la même valeur.

Correspond au maximum de (h_1 - h_2), c'est-à-dire celle qui donnera h_1 pratiquement au maximum de l'échelle et h_2 pratiquement au minimum. On obtient cette condition en ouvrent simultanément et progressivement les vannes du banc hydraulique. L'ouverture de ces vannes entrainera une augmentation du débit et donne une différence h_1 et h_2 . Au cas où cette condition est difficile à atteindre il est possible d'introduire ou de retirer de l'air des collecteurs par la valve placée à l'une de ses extrémités. Le débit volumique est mesuré en recueillant l'eau sortant de l'appareil dans le réservoir de mesure de débit du banc.

5.2.1. Première manipulation

➤ Calcul de débits

Pour la première manipulation on a obtenu les résultats suivant :

Tableau (5.1) : Différentes valeurs de volumes et de temps.

Les volumes(l)	Le temps(s)
0.465	2.66
0.967	5.77
0.734	4.50

On applique la relation $q=v/t$ pour calculer les débits :

Tableau (5.2) : Calcule de débits de la première manipulation.

$Q_1=v_1/t_1$	$(4.65 \cdot 10^{-4}) / 2.66$	$1,748 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
$Q_2=v_2/t_2$	$(9.67 \cdot 10^{-4}) / 5.77$	$1,675 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
$Q_3=v_3/t_3$	$(7.34 \cdot 10^{-4}) / 4.50$	$1,631 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

On applique la relation $Q_{\text{moy}} = \sum Q/n$ pour calculer le débit moyen de l'écoulement :

$$Q_{\text{moy}} = \sum Q/n \implies Q_{\text{moy}} = ((1,748 + 1,675 + 1,631) \cdot 10^{-4}) / 3$$

$$Q_{\text{moy}} = 1,648 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 0.1648 \text{ l/s.}$$

➤ Calcul des vitesses

On applique la relation $V=Q_{moy}/S$ pour calculer les vitesses de l'écoulement :

Tableau (5.3) : Calcul de vitesses d'écoulement.

$V1=Q_{moy}/S1$	$(1.648 \times 10^{-4}) / (17,3406 \times 10^{-4})$	0.095 m/s
$V2=Q_{moy}/S2$	$(1.648 \times 10^{-4}) / (6,7944 \times 10^{-4})$	0.2425 m/s
$V3=Q_{moy}/S3$	$(1.648 \times 10^{-4}) / (2,009 \times 10^{-4})$	0.8203 m/s
$V4=Q_{moy}/S4$	$(1.648 \times 10^{-4}) / (6,7944 \times 10^{-4})$	0.2425 m/s
$V5=Q_{moy}/S5$	$(1.648 \times 10^{-4}) / 1,73406 \times 10^{-4}$	0.095 m/s

➤ Calcul de l'énergie cinétique

Pour calculer l'énergie cinétique en applique la relation $E_c = v^2/2g$ en mcf.

Tableau (5.4) : Calcul de l'énergie cinétique.

$V_1^2/2g$	4.599×10^{-4} mcf
$V_2^2/2g$	29.972×10^{-4} mcf
$V_3^2/2g$	$343,96 \times 10^{-4}$ mcf
$V_4^2/2g$	29.972×10^{-4} mcf
$V_5^2/2g$	4.599×10^{-4} mcf

Le graphe d'énergie cinétique en fonction de longueur de tube de venturi :

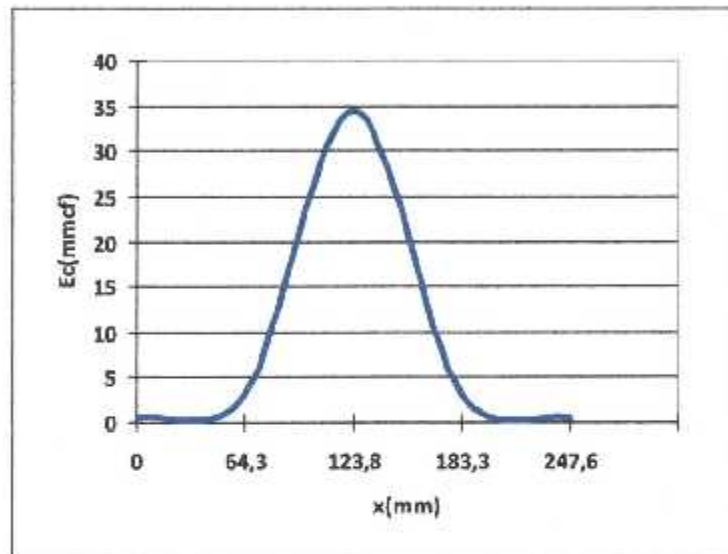


Figure (5.1) : Graphe d'énergie cinétique en fonction de longueur de tube « 1ere manipulation »

➤ Lecture de la pression statique

Et pour les tubes manométriques en lire les hauteurs de pression suivant :

Tableau (5.5) : Les hauteurs manométriques.

h_1	0.14m
h_2	0.133m
h_3	0.043m
h_4	0.096m
h_5	0.101m

Le graphe de pression statique en fonction de la longueur de tube :

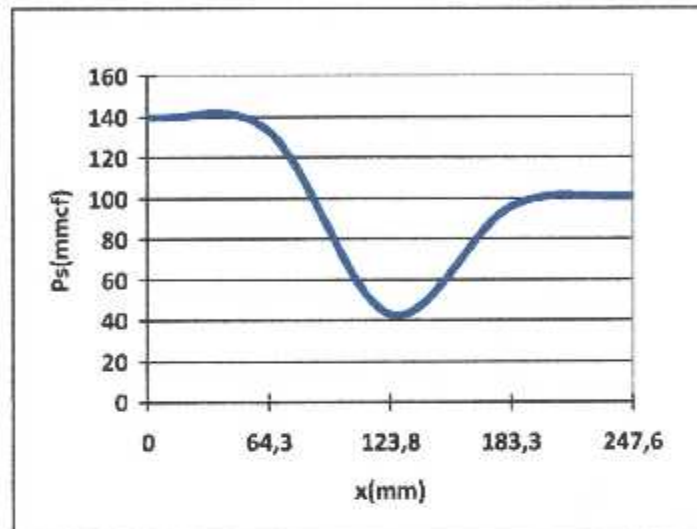


Figure (5.2) : graphe de pression statique en fonction de longueur de tube « 1ere manipulation »

➤ Calcul de la pression totale

Pour calculer les pressions totales en applique La relation $P_t = P + \frac{V^2}{2g} = h + \frac{V^2}{2g}$

Tableau (5.6) : Calcule de pressions totales dans différentes prises de pression.

$P_{t1} = P_1 + \frac{V^2}{2g} = h_1 + \frac{V^2}{2g}$	0.14045 mcf
$P_{t2} = P_2 + \frac{V^2}{2g} = h_2 + \frac{V^2}{2g}$	0.13599 mcf
$P_{t3} = P_3 + \frac{V^2}{2g} = h_3 + \frac{V^2}{2g}$	0.01013 mcf
$P_{t4} = P_4 + \frac{V^2}{2g} = h_4 + \frac{V^2}{2g}$	0.09899 mcf
$P_{t5} = P_5 + \frac{V^2}{2g} = h_5 + \frac{V^2}{2g}$	0.10145 mcf

Le graphe de pression totale en fonction de la longueur de tube de venturi :

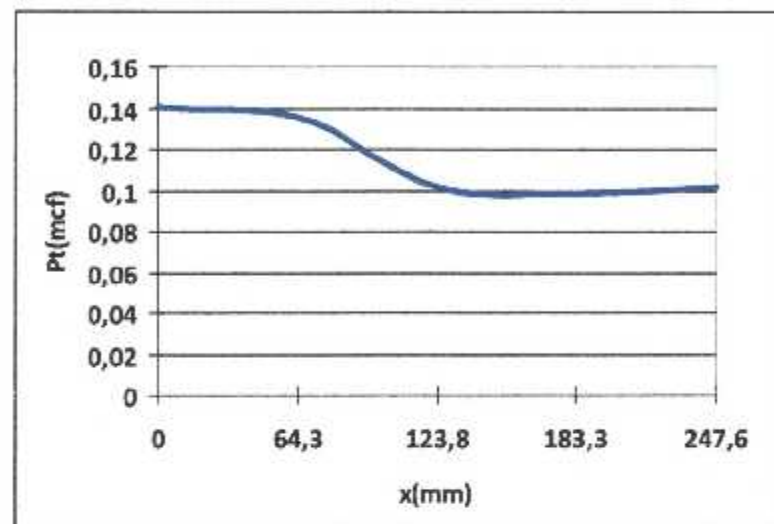


Figure (5.3) : Graphe de pression totale en fonction de longueur de tube « 1ere manipulation »

5.2.2. Deuxième manipulation

➤ Calcul du débit

Pour la Deuxième manipulation on a obtenne les résultats suivant :

Tableau (5.7) : Les volumes et les temps de la deuxième manipulation.

Les volumes		Le temps	
V1' =	$9.12 \times 10^{-4} \text{ m}^3$	T1' =	2.43 s
V2' =	$9.84 \times 10^{-4} \text{ m}^3$	T2' =	2.82 s
V3' =	$8.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$	T3' =	2.24 s

On applique la relation $q=v/t$ pour calculer les débits :

Tableau (5.8): Calcule de débits de la deuxième manipulation.

$Q1' = V1' / t1'$	$(9.12 \times 10^{-4}) / 2.43$	$3.753 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
$Q2' = V2' / t2'$	$(9.84 \times 10^{-4}) / 2.82$	$3.489 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
$Q3' = V3' / t3'$	$(8.5 \times 10^{-4}) / 2.24$	$3.794 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Le débit moyen :

$$Q'_{\text{moy}} = \sum Q' / n \implies Q'_{\text{moy}} = ((3.753 \times 10^{-4}) + (3.489 \times 10^{-4}) + (3.794 \times 10^{-4})) / 3$$

$$Q'_{\text{moy}} = 3.678 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 0.3678 \text{ l/s.}$$

➤ Calcul des vitesses

On applique la relation $V=Q_{\text{moy}}/S$ pour calculer les vitesses de l'écoulement :

Tableau (5.9) : Calcule de vitesses d'écoulement de deuxième manipulation.

$V_1' = Q'_{\text{moy}} / S_1$	$(3.678 \times 10^{-4}) / (17,3406 \times 10^{-4})$	0.2121 m/s
$V_2' = Q'_{\text{moy}} / S_2$	$(3.678 \times 10^{-4}) / (6,7944 \times 10^{-4})$	0.5413 m/s
$V_3' = Q'_{\text{moy}} / S_3$	$(3.678 \times 10^{-4}) / (2,009 \times 10^{-4})$	1.8307 m/s
$V_4' = Q'_{\text{moy}} / S_4$	$(3.678 \times 10^{-4}) / (6,7944 \times 10^{-4})$	0.5413 m/s
$V_5' = Q'_{\text{moy}} / S_5$	$(3.678 \times 10^{-4}) / (17.3406 \times 10^{-4})$	0.2121 m/s

➤ Calcul de l'énergie cinétique

Pour calculer l'énergie cinétique en applique la relation $E_c = v^2/2g$ en mcf.

Tableau (5.10) : Calcul d l'énergie cinétique de deuxième manipulation.

$V_1^2/2g$	22.928×10^{-4}
$V_2^2/2g$	149.3×10^{-4}
$V_3^2/2g$	1708.18×10^{-4}
$V_4^2/2g$	149.3×10^{-4}
$V_5^2/2g$	22.928×10^{-4}

Le graphe d'énergie cinétique en fonction de longueur de tube de venturi :

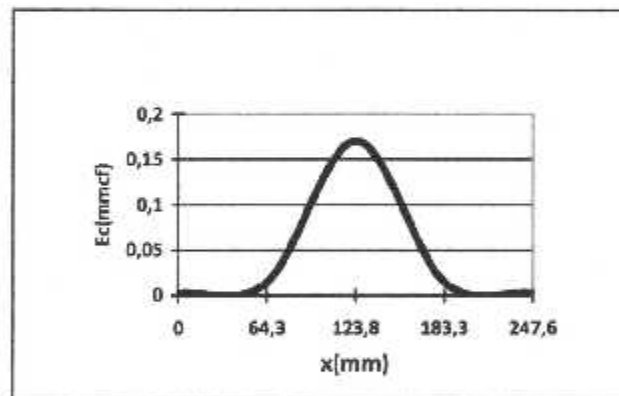


Figure (5.4) : Graphe d'énergie cinétique en fonction de longueur de tube « 2eme manipulation »

➤ Lecture de la pression statique

Et pour les tubes manométriques en lire les hauteurs de pression suivant :

Tableau (5.11) : Les hauteurs manométriques de deuxième manipulation.

H_1'	0.470	mcf
H_2'	0.457	mcf
H_3'	0.121	mcf
H_4'	0.272	mcf
H_5'	0.294	mcf

Le graphe de pression statique en fonction de la longueur de tube :

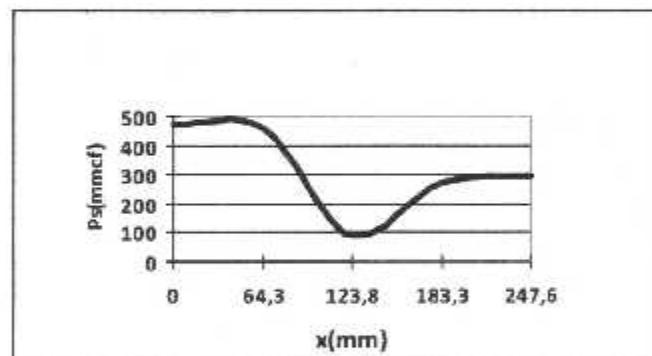


Figure (5.5) : Graphe de pression statique en fonction de longueur de tube « 2 eme manipulation »

➤ Calcul de la pression totale

Pour calculer les pressions totales en applique La relation $P_t = P + (V^2/2g) = h + (V^2/2g)$

Tableau (5.12) : Calcule de pression totale dans différentes prises de pression de deuxième manipulation.

$P_{t1}=P_1-(V^2/2g)=h_1+(V^2/2g)$	$22.928 \times 10^{-4} - 0.470 = -0.4722$ mcf
$P_{t2}=P_2+(V^2/2g)=h_2+(V^2/2g)$	$149.3 \times 10^{-4} + 0.457 = 0.4719$ mcf
$P_{t3}=P_3+(V^2/2g)=h_3+(V^2/2g)$	$1708.18 \times 10^{-4} + 0.121 = 0.2918$ mcf
$P_{t4}=P_4+(V^2/2g)=h_4+(V^2/2g)$	$149.3 \times 10^{-4} + 0.272 = 0.28693$ mcf
$P_{t5}=P_5+(V^2/2g)=h_5+(V^2/2g)$	$22.928 \times 10^{-4} + 0.294 = 0.2962$ mcf

Le graphe de pression totale en fonction de la longueur de tube de venturi :

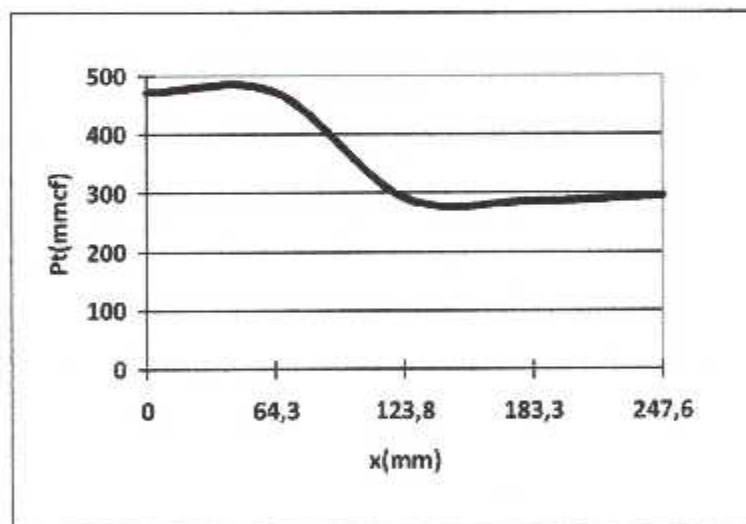


Figure (5.6) : graphe de pression totale en fonction de longueur de tube « 2eme manipulation »

5.2.3. Troisième manipulation

➤ Calcul de débit

Pour la Troisième manipulation on a obtenu les résultats suivant :

Tableau (5.13) : Les volumes et les temps de troisième manipulation.

Les volumes	Le temps
$V_1'' = 9.30 \times 10^{-4} \text{ m}^3$	$T_1'' = 2.44 \text{ s}$
$V_2'' = 5.80 \times 10^{-4} \text{ m}^3$	$T_2'' = 1.51 \text{ s}$
$V_3'' = 9.09 \times 10^{-4} \text{ m}^3$	$T_3'' = 2.42 \text{ s}$

On applique la relation $q=v/t$ pour calculer les débits :

Tableau (5.14): Calcule de débits de troisième manipulation.

$Q_1'' = V_1''/t_1''$	$(9.30 \times 10^{-4})/2.44$	$3.811 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
$Q_2'' = V_2''/t_2''$	$(5.80 \times 10^{-4})/1.51$	$3.841 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
$Q_3'' = V_3''/t_3''$	$(9.09 \times 10^{-4})/2.42$	$3.756 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Le débit moyen :

$$Q''_{\text{moy}} = \sum Q''/n \iff Q''_{\text{moy}} = ((3.811 \times 10^{-4}) + (3.841 \times 10^{-4}) + (3.756 \times 10^{-4}))/3$$

$$Q''_{\text{moy}} = 3.802 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 0.3802 \text{ l/s.}$$

➤ Calcul des vitesses

On applique la relation $V=Q_{\text{moy}}/S$ pour calculer les vitesses de l'écoulement :

Tableau (5.15) : Calcul de vitesses d'écoulement de troisième manipulation.

$V_1'' = Q''_{\text{moy}}/S_1$	$(3.802 \times 10^{-4}) / (17,3406 \times 10^{-4})$	0.2192	m/s
$V_2'' = Q''_{\text{moy}}/S_2$	$(3.802 \times 10^{-4}) / (6,7944 \times 10^{-4})$	0.5595	m/s
$V_3'' = Q''_{\text{moy}}/S_3$	$(3.802 \times 10^{-4}) / (2,009 \times 10^{-4})$	1.8924	m/s
$V_4'' = Q''_{\text{moy}}/S_4$	$(3.802 \times 10^{-4}) / (6,7944 \times 10^{-4})$	0.5595	m/s
$V_5'' = Q''_{\text{moy}}/S_5$	$(3.802 \times 10^{-4}) / (17,3406 \times 10^{-4})$	0.2192	m/s

➤ Calcul de l'énergie cinétique

Pour calculer l'énergie cinétique en applique la relation $E_c = v^2/2g$ en mcf.

Tableau (5.16) : Calcul de pressions dynamiques de troisième manipulation.

$V_1''^2/2g$	0.00244 mcf
$V_2''^2/2g$	0.01595 mcf
$V_3''^2/2g$	0.18252 mcf
$V_4''^2/2g$	0.01595 mcf
$V_5''^2/2g$	0.00244 mcf

Le graphe d'énergie cinétique en fonction de longueur de tube de venturi :

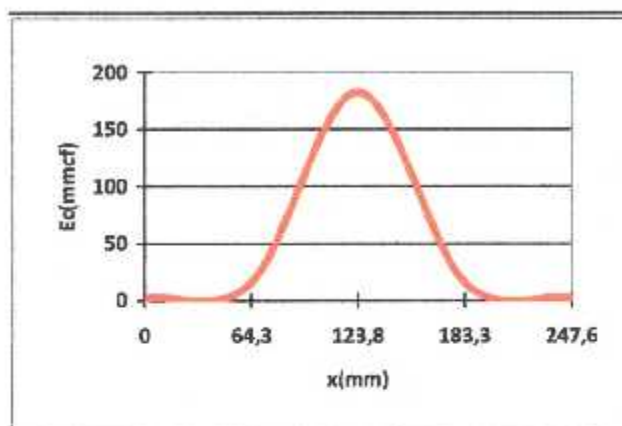


Figure (5.7) : Graphe d'énergie cinétique en fonction de longueur de tube « 3eme manipulation »

➤ Lecture de la pression statique

Et pour les tubes manométriques en lire les hauteurs de pression suivant :

Tableau (5.17) : Les hauteurs manométriques de troisième manipulation.

H_1''	0.485 mcf
H_2''	0.472 mcf
H_3''	0.125 mcf
H_4''	0.281 mcf
H_5''	0.303 mcf

Le graphe de pression statique en fonction de la longueur de tube :

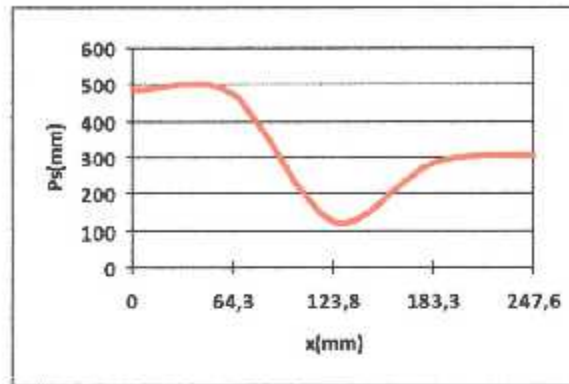


Figure (5.8) : Graphe de pression totale en fonction de longueur de tube « 2eme manipulation »

➤ Calcul de la pression totale

Pour calculer les pressions totales en applique La relation $P_t = P + (V^2/2g) = h + (V^2/2g)$

$P''_{t1} = P_1 + (V^2/2g) = h''_1 + (V^2/2g)$	487.44 mcf
$P''_{t2} = P_2 + (V^2/2g) = h''_2 + (V^2/2g)$	487.95 mcf
$P''_{t3} = P_3 + (V^2/2g) = h''_3 + (V^2/2g)$	307.52 mcf
$P''_{t4} = P_4 + (V^2/2g) = h''_4 + (V^2/2g)$	296.95 mcf
$P''_{t5} = P_5 + (V^2/2g) = h''_5 + (V^2/2g)$	305.44 mcf

Le graphe de pression totale en fonction de la longueur de tube de venturi :

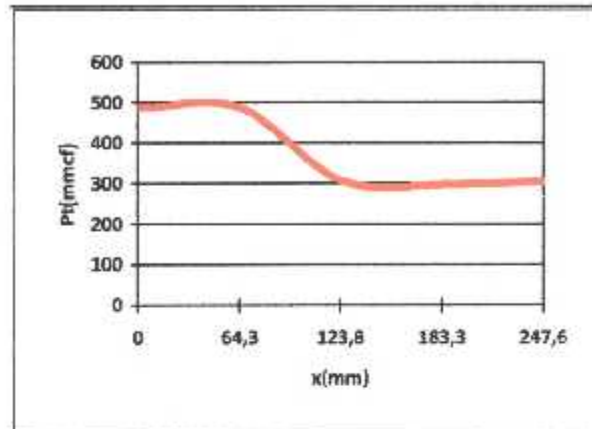


Figure (5.9) : Graphe de pression totale en fonction de longueur de tube « 3eme manipulation »

5.3. Interprétation des courbes

- Les courbes de pression statique en fonction de la longueur de tube :

Nous remarquons que les courbes de pression statique en fonction de la longueur de tube diminuent la valeur de pression statique jusqu'au col, après le col la pression statique augmente jusqu'à la cinquième prise ; mais cette augmentation sera différente par rapport à la première, la cause de cette diminution est les pertes de charges singulières et régulières. On a justifié la diminution de pression statique par la diminution de section parce que le débit constant $qv = v \cdot s$; quand la vitesse augmente alors la section diminue, ce qui nous donne une diminution de pression statique.

- Les courbes d'énergie cinétique en fonction de la longueur de tube :

Les courbes d'énergie cinétique en fonction de la pression totale constituent de deux parties ; la première partie est l'augmentation d'énergie à cause de l'augmentation de la vitesse ($E_c = \frac{V^2}{2g}$) jusqu'au col dont l'énergie cinétique est maximale ($V_{col} \text{ max}$) et la deuxième partie représente une diminution d'énergie cinétique à cause de la divergence ($S \uparrow \Leftrightarrow V \downarrow$) alors l'énergie diminue.

- Les courbes de pression totale en fonction de longueur de tube :

Les pressions totales en fonction de la longueur de tube représentent une forme d'une ligne droite puis diminué au niveau de col, en fluide parfait la pression totale reste constante car la pression statique augmente de même valeur que la pression dynamique diminue ($P_t = P_s + P_d$), mais en pratique cette résultat est difficile a obtenir, dans notre travail les courbes de pression totale subit une diminution en fonction de la longueur de tube a cause des pertes de charges, d'énergie, et les frottements.

Conclusion générale

Conclusion

A l'issue de ce modeste travail qu'on vient de réalisés, on pense atteindre les objectifs tracés préalablement à savoir la réalisation d'un banc d'essai qui étudie l'écoulement dans un venturi.

Nous avons commencé notre travail avec une brève description sur les généralités de la mécanique du fluide à savoir la statique, la dynamique des fluides et l'application de ses propriétés au phénomène du tube de venturi.

La réalisation de notre banc d'essai et les résultats des expériences appliquées nous ont permet de comprendre très bien le phénomène de venturi afin de faire une approche entre la théorie et la pratique pour mieux illustrer le phénomène.

En fin, nous espérons avoir su apporter les réponses entourant ce sujet et surtout le banc d'essai du tube de venturi malgré quelques difficultés et les moyens qui sont limités, qui j'espère permettait aux futures étudiants en aéronautique de faire les travaux pratiques.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

Les livres :

- 1/ Pierre-Antoine BOIS. "Introduction à la mécanique théorique des fluides",
Universités physique, Paris, 2000, p417.

- 2/ Inge l.Ryhming. " dynamique des fluides", presses polytechniques romandes, Paris,
deuxième édition 1991, p461.

- 3/R. Comolet. "mécanique expérimentale des fluides", tome I, Masson paris, 1979,
p234.

- 4/C.Jacob, introduction mathématique à la mécanique des fluides, Gauthier-Villars,
1959.

- 5/ M.Giqueaux, mécanique des fluides théorique, librairie polytechnique, 1967.

Sites internet :

- 1/ http://fr.wikibooks.org/wiki/Hydrodynamique_des_fluides_parfaits.
- 2/ http://fr.wikiversity.org/wiki/MÃ©canique_des_fluides/Statique_des_fluides.
- 3/ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Burette>.
- 4/<http://www.cidip.com>
- 5/<http://javaboutique.internet.com/Venturi>.