

TP 1

Étude de la flottaison d'un ponton

1.1 Introduction

La question de la stabilité d'un corps, tel qu'un navire, qui flotte à la surface d'un liquide, est une question d'importance évidente.

Un tel équilibre peut être stable, neutre ou instable et ce en fonction de la hauteur de son centre de gravité, et dans ce TP la stabilité d'un ponton va être étudiée à différentes hauteurs de centre de gravité. Une comparaison avec la stabilité issue d'une étude théorique peut également être faite.

1.2 Présentation du support

La disposition de l'appareil est montrée sur la figure 2.2. Un ponton de forme rectangulaire flotte dans l'eau et porte une voile en plastique, avec cinq rangées de fentes en V à des hauteurs équidistantes sur la voile. Les centres des fentes sont espacés de 7,5 mm, également disposé autour de la ligne centrale de la voile. Un poids réglable, composé de deux cylindres usinés qui peuvent être vissés ensemble, s'insère dans les fentes en V sur la voile ; ceci peut être utilisé pour changer la hauteur du centre de gravité et la gîte¹ du ponton. Un fil à plomb est suspendu à partir du centre supérieur de la voile et est utilisé conjointement avec l'échelle graduée installée sous la base de la voile pour mesurer la gîte.

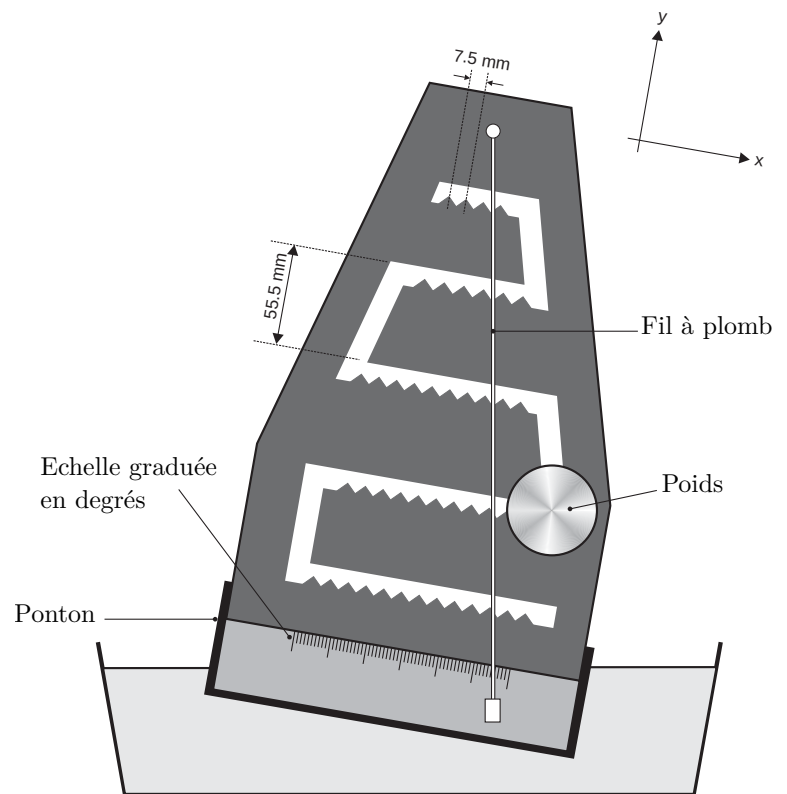


FIGURE 1.1 – Support d'étude

1. c'est le terme définissant l'inclinaison transversale causée par un phénomène intérieur (mouvement de poids à l'intérieur du navire).

1.3 Rappel théorique sur la stabilité des corps flottants

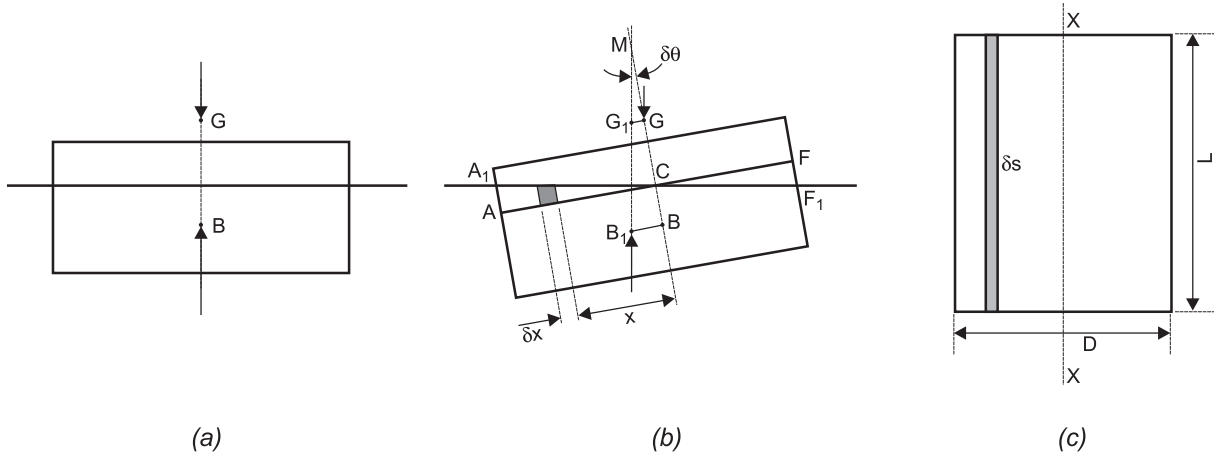


FIGURE 1.2 – Déviation de la stabilité d'un ponton

Considérons le ponton rectangulaire représenté flottant à l'équilibre avec une quille² symétrique, comme indiqué en section transversale sur la figure 1.2-(a). Le poids du corps flottant agit verticalement vers le bas à travers son centre de gravité G et est équilibré par une force de poussée égale et opposée agissant vers le haut par le centre de poussée B , qui se trouve au centre de gravité du liquide déplacé par le ponton.

Pour étudier la stabilité du système, considérons un petit déplacement angulaire $\delta\theta$ à partir de la position d'équilibre comme indiqué sur la figure 1.2-(b). Le centre de gravité du liquide déplacé par le ponton passe de B à B_1 . La ligne d'action verticale de la force de poussée est représentée sur la figure et coupe le prolongement de la ligne BG en M , le métacentre.

Les forces égales et opposées à travers G et B_1 exercent un couple sur le ponton, et à condition que M se trouve au-dessus de G (comme le montre la figure 1.2-(b)) ce couple agit dans le sens de restaurer le ponton à quille symétrique, c-à-d le ponton est stable. Si, toutefois, le métacentre M se trouve en dessous du centre de gravité G , le sens du couple est d'augmenter le déplacement angulaire et le ponton se trouve instable. Le cas particulier de la stabilité neutre se produit lorsque M et G coïncident.

La figure 1.2-(b) montre clairement comment la hauteur métacentrique GM peut être établie expérimentalement en utilisant le poids réglable (de masse ω) pour déplacer le centre de gravité latéralement de G .

Supposons que le poids ajustable est déplacé d'une distance δx de sa position centrale. Si le poids de tout l'ensemble flottant est W , alors le mouvement correspondant du centre de gravité de l'ensemble dans une direction parallèle à la base du ponton est $\frac{\omega}{W}\delta x_1$. Si ce mouvement produit une nouvelle position d'équilibre W à une gîte $\delta\theta$, alors sur la figure 1.2-(b), G_1 est la nouvelle position du centre de gravité de l'ensemble, c-à-d.

$$GG_1 = \frac{\omega}{W}\delta x_1 \quad (1.1)$$

Maintenant, géométriquement sur cette figure nous avons

$$GG_1 = GM \cdot \delta\theta \quad (1.2)$$

2. partie plongeante du ponton

En éliminant GG_1 entre ces deux équations nous aurons

$$GM = \frac{\omega}{W} \cdot \frac{\delta x_1}{\delta \theta} \quad (1.3)$$

par passage à la limite :

$$GM = \frac{\omega}{W} \cdot \frac{dx_1}{d\theta} \quad (1.4)$$

La hauteur métacentrique peut donc être déterminée en mesurant $\frac{dx_1}{d\theta}$ connaissant ω et W . En dehors des déterminations expérimentales, BM peut être calculé à partir de la mesure du ponton et du volume de liquide déplacé.

En se référant à nouveau à la figure 1.2-(b), on peut noter que le moment de rappel autour de B , dû au déplacement du centre de poussée vers B_1 , est produit par la poussée supplémentaire représentée par le triangle AA_1C d'un côté de la ligne médiane et la poussée réduite représentée par le triangle FF_1C de l'autre. L'élément ombré sur la figure 1.2-(b) et (c) a une surface δs en vue de dessus et une hauteur $x\delta\theta$ en coupe verticale, de sorte que son volume soit $x\delta s\delta\theta$. Le poids du liquide déplacé par cet élément est $w x \delta s \delta \theta$, où w est le poids spécifique du liquide, et c'est la poussée supplémentaire due à l'élément. Le moment de cette force de poussée élémentaire autour de B est $w x^2 \delta s \delta \theta$, de sorte que le moment total de rétablissement autour de B est donné par l'expression :

$$w \delta \theta \int x^2 ds$$

où l'intégrale s'étend sur toute la surface du ponton au niveau de la surface de l'eau. L'intégrale peut être désignée par I , où :

$$I = \int x^2 ds \quad (1.5)$$

le moment quadratique de l'aire de s autour de l'axe XX .

Le moment total de rétablissement autour de B peut aussi être écrit comme la force de poussée totale, wV , dans laquelle V est le volume de liquide déplacé par le ponton, multiplié par le bras de levier BB_1 . L'écriture de ce produit avec l'expression du moment de rappel total obtenu ci-dessus donne :

$$wV \cdot BB_1 = w \delta \theta \int x^2 ds \quad (1.6)$$

Sachant que $BB_1 = BM \cdot \delta \theta$ (à partir de la figure 1.2-(b)) nous aboutissons à :

$$BM = \frac{I}{V} \quad (1.7)$$

Ce résultat, qui ne dépend que des dimensions du ponton et du volume de liquide qu'il déplace, servira à vérifier l'exactitude de l'expérience. Elle s'applique à un corps flottant de toute forme, à condition que I soit pris autour d'un axe passant par le centroïde de la surface du corps au niveau de la surface de l'eau, l'axe étant perpendiculaire à l'endroit où se produit le déplacement angulaire. Pour un ponton rectangulaire, B se trouve à une profondeur en dessous de la surface de l'eau égale à la moitié de la profondeur totale d'immersion, et I peut facilement être évalué en termes de dimensions du ponton comme :

$$I = \int x^2 ds = \int_{-D/2}^{D/2} x^2 L dx = \frac{1}{12} L D^3 \quad (1.8)$$

1.4 Précautions à prendre et entretien

Après utilisation, l'eau dans le réservoir doit être versée et le ponton et le réservoir doivent être essuyés avec un chiffon non pelucheux. Le ponton ne doit jamais être laissé flottant en permanence dans l'eau.

1.5 Procédure expérimentale

La masse totale de l'appareil (y compris les deux poids magnétiques, mais pas le poids des cylindres mobiles) est inscrite sur une étiquette apposée sur le boîtier de la voile. La hauteur du centre de gravité peut être trouvée comme suit (voir la figure 1.3) :

- i. Ajuster les deux poids magnétiques à la base du ponton.
- ii. Placer le crochet du cordon de centre de gravité à travers le trou sur le côté de la voile, en s'assurant que le petit poids est bien suspendu et libre d'osciller de l'autre côté.
- iii. Fixez le poids ajustable dans la fente en V sur la ligne médiane de la rangée la plus petite et suspendez le ponton à l'extrémité libre du cordon épais. Marquez le point où le fil à plomb croise la ligne centrale de la voile avec un marqueur ou autre.
- iv. Répéter le paragraphe (iii) pour les quatre autres lignes.

Avec le poids réglable situé au centre de l'une des rangées, laissez le ponton flotter dans l'eau et positionnez les deux poids magnétiques sur la base du ponton pour ajuster le navire. Lorsque le bateau a été ajusté correctement, le poids réglable peut être déplacé de chaque côté de la ligne médiane pour chacune des cinq rangées. À chaque position, le déplacement peut être déterminé par l'angle que le fil à plomb du sommet de la voile fait avec l'échelle sur le logement de la voile.

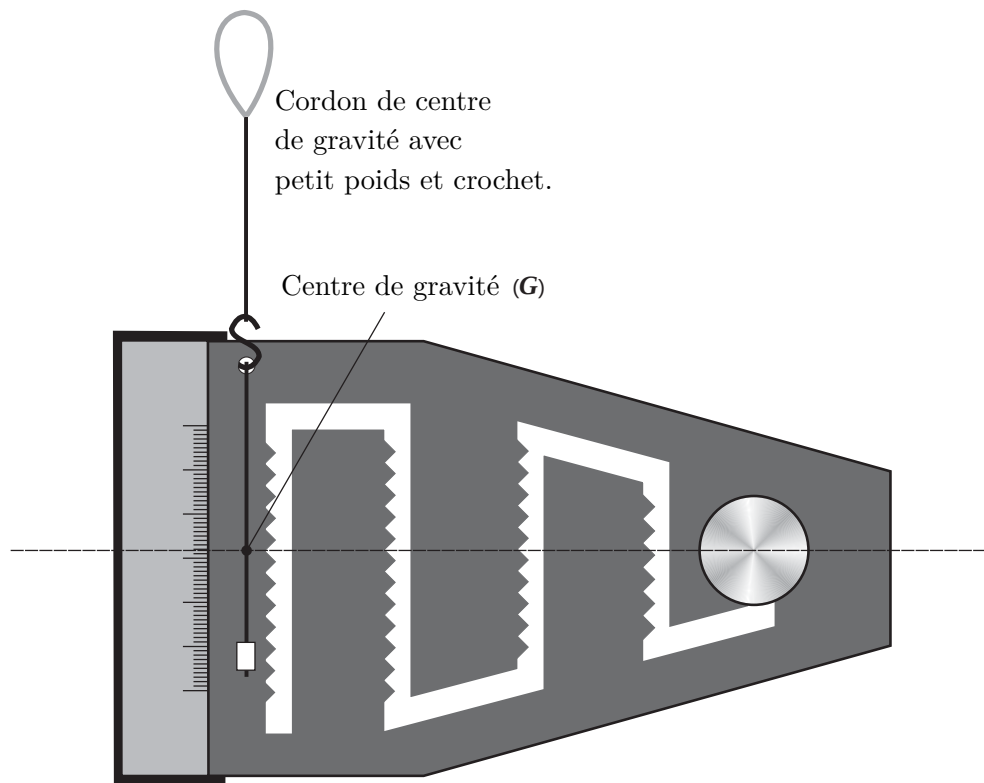


FIGURE 1.3 – Détermination expérimentale du centre de gravité

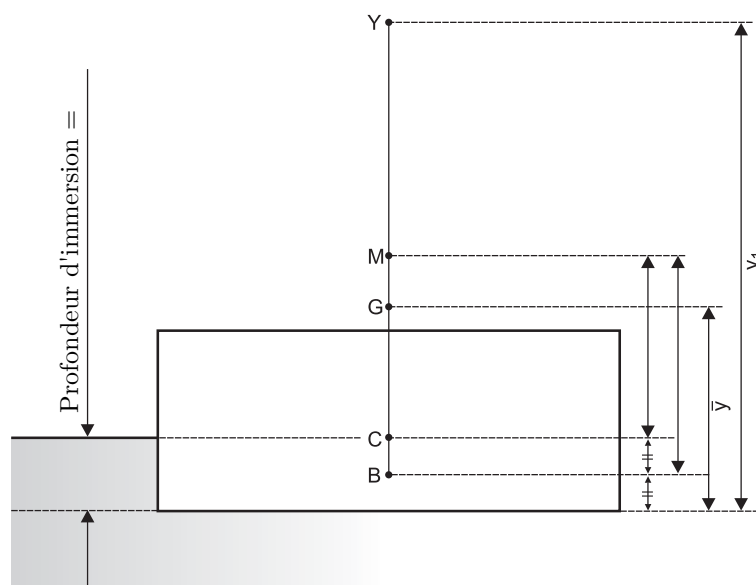


FIGURE 1.4 – Dimensions standards du Ponton

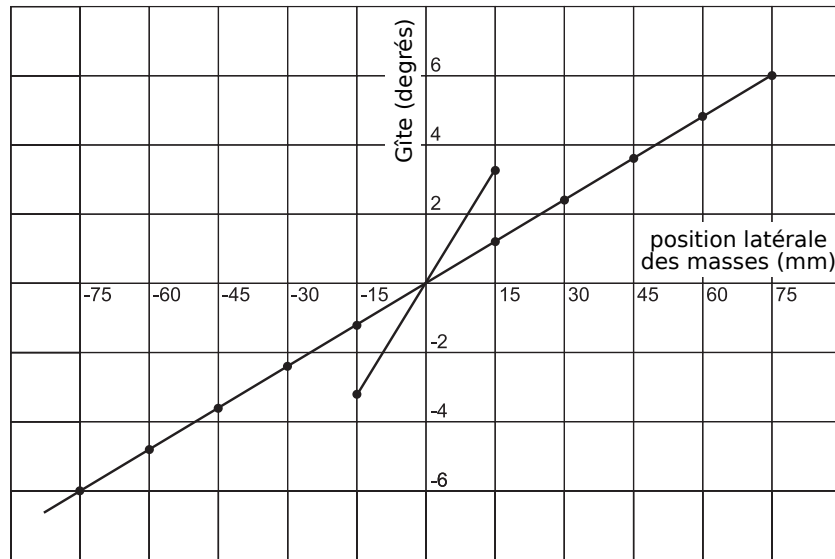


FIGURE 1.5 – variation de gîte en fonction de la position latérale de masse (les hauteurs présentés sont la maximale et minimale)

1.6 Résultats et interprétations

Masse totale de l'ensemble flottant (W)	=	kg
Masse ajustable (ω)	=	kg
Largeur du ponton (D)	=	m
Longueur du ponton (L)	=	m
Moment quadratique de surface $I = \frac{LD^3}{12}$	=	m^4
Volume d'eau déplacé $V = \frac{W}{1000}$	=	m^3
Hauteur du métacentre au-dessus du centre de poussée $BM = \frac{I}{V}$..	=	m
Profondeur d'immersion du ponton $= \frac{V}{LD}$	=	m
Profondeur du centre de poussée $CB = \frac{V}{2 \cdot LD}$	=	m

Il est suggéré que la figure 1.4 soit complétée pour y être référée à chaque fois que l'appareil est utilisé. Notez que lors de la mesure des hauteurs \bar{y} et y_1 , il convient de mesurer à partir du fond intérieur du ponton, l'épaisseur du fond de tôle doit être ajoutée aux mesures de \bar{y} et y_1 . La position de G (et donc la valeur de \bar{y}) et une valeur correspondante de y ont été marquées précédemment dans l'expérience lorsque l'ensemble était équilibré.

La hauteur de \bar{y} et G au-dessus de la base varie avec la hauteur y du poids ajustable au-dessus de la base, selon l'équation :

$$\bar{y} = y_1 \frac{\omega}{W} + A \quad (1.9)$$

où A est une constante qui se rapporte au centre de gravité du ponton et à la hauteur du poids

réglable.

En utilisant un ensemble de résultats pour le centre de gravité du ponton et la hauteur du poids ajustable, alors \bar{y} et y_1 peuvent être mesurées et la constante A calculée. Cela peut ensuite être utilisé dans les calculs pour les hauteurs suivantes de \bar{y} et y_1 qui peuvent être vérifiées par rapport aux marquages effectués précédemment

Les valeurs des gîtes produits par le mouvement latéral et la hauteur du poids ajustable y_1 doivent être reportées sur le tableau 1. Un graphique (figure 1.5) pour chaque hauteur y_1 , de position latérale du poids ajustable par rapport aux gîtes, peut alors être tracé.

Remarque : Déterminez quel côté de la ligne d'axe de la voile à être choisi négatif, puis indiquez les gîtes sur ce côté négatif.

Tableau 1 : Valeurs des gîtes pour des hauteurs et positions de poids réglables.

Hauteur du poids réglable y_1 [mm]	Gîtes pour le déplacement latéral du poids réglable à partir de la ligne centrale de voile x_1 [mm]														
	52.5	45	37.5	30	22.5	15	7.5	0	7.5	15	22.5	30	37.5	45	52.5

D'après la figure 1.5, pour les cinq valeurs de y et les valeurs correspondantes de $dx_1/d\theta$ peuvent être extraites. En utilisant l'équation 4, les valeurs de GM peuvent être obtenues. En utilisant l'équation 9 et connaissant la profondeur d'immersion, les valeurs de CG peuvent être déduites. De plus, puisque $CM = CG + GM$, les valeurs de CM peuvent être calculées. Les valeurs ci-dessus doivent être calculées et disposées sous forme de tableau, comme indiqué dans le tableau 2.

Tableau 2 : Détermination des hauteurs métacentriques
à partir des résultats expérimentaux.

Hauteur du poids réglable y_1 [mm]	Hauteur de G au-dessus de la surface de l'eau CG [mm]	$\frac{dx_1}{d\theta}$ [mm/°]	Hauteur métacentrique GM [mm]	Hauteur de M au-dessus de la surface de l'eau CM [mm]

Les valeurs de $dx_1/d\theta$ peuvent maintenant être tracées par rapport à CG , la hauteur de G au-dessus de la surface de l'eau. L'extrapolation de cette parcelle indiquera la valeur limite de CG au dessus de laquelle le ponton sera instable.

TP 2

Centre de Poussée

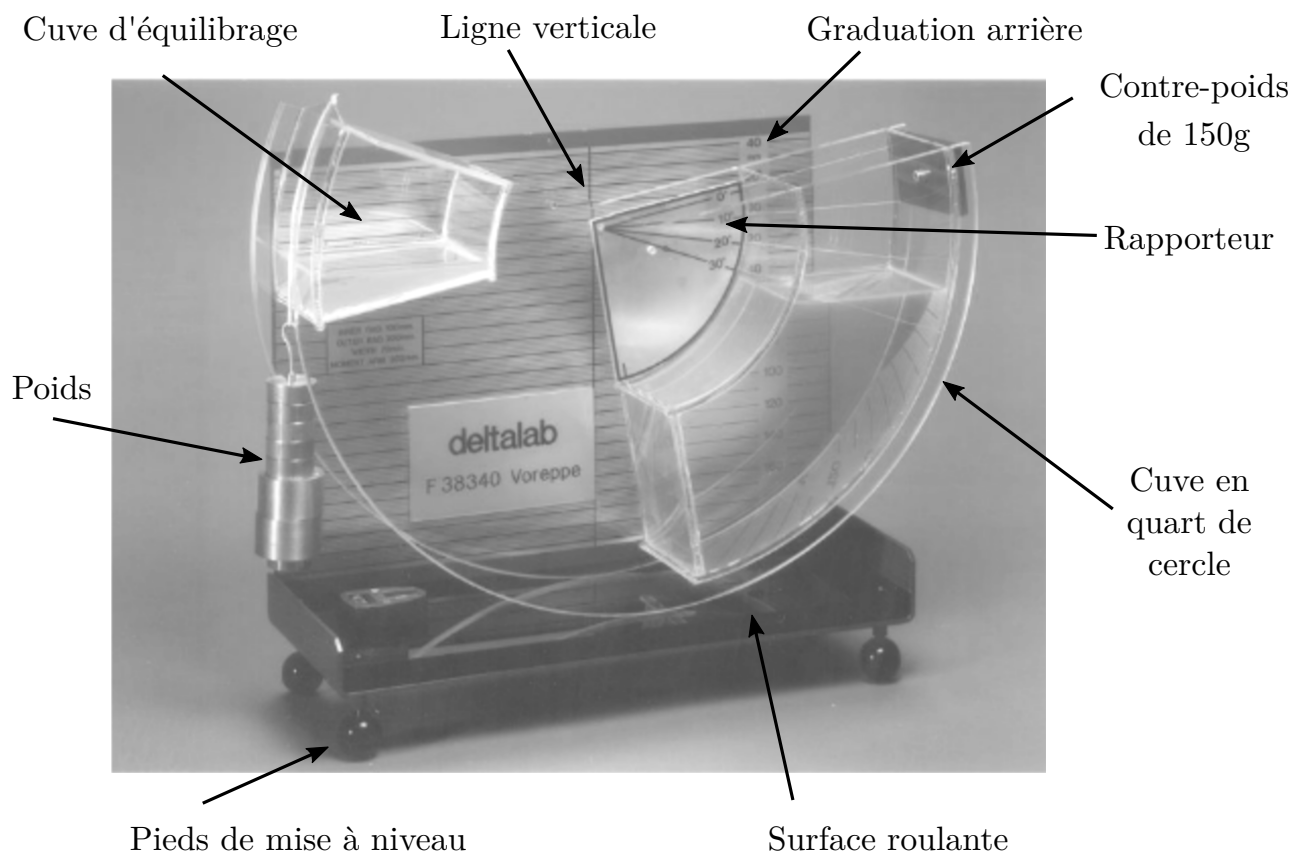


FIGURE 2.1 – Appareil d'étude du centre de poussée.

2.1 Introduction

Dans l'exercice de leur fonction, les ingénieurs sont souvent amenés à calculer les forces exercées par les fluides sur les structures qui les retiennent afin de procéder à leur conception et par suite à entamer la phase de dimensionnement. Ces actions mécaniques constituent des torseurs comprenant la résultante des forces de pression ainsi que leur moment résultant. Les déterminer revient donc à suivre la procédure suivante :

- détermination de l'intensité, la direction, le sens et le point d'application de la résultante,

— détermination de l'intensité, la direction et le sens du moment résultant.

2.2 But du TP

Le but de ce TP est de mesurer la force de poussée exercée par un fluide sur une surface plane ayant une inclinaison θ avec la verticale descendante et de procéder à la détermination de la position de son point d'application.

2.3 Description de l'appareil

L'appareil utilisé est représenté sur la figure 2.1. C'est un récipient ayant la forme d'un quart de coaxial de forme cylindrique, monté sur un bloc semi-circulaire permettant de le faire pivoter sur une surface plane. Les axes des parois cylindriques du coaxial coïncident avec le centre de rotation du récipient ; ainsi les forces de pression agissant sur les parois latérales de ce coaxial ont un moment résultant nul. Le seul moment non nul est celui qui résulte des forces de pression exercées par le liquide sur la surface plane limitant le quart du coaxial. Ce moment est mesuré à l'aide des masses marquées suspendues à un support monté sur le bloc semi-circulaire du côté opposé au coaxial.

Un deuxième récipient placé du même côté que le support de poids permet l'équilibrage du premier récipient et assure son maintien à différentes inclinaisons.

L'angle d'inclinaison de la surface plane par rapport à la verticale et son contenu d'eau se mesurent à l'aide de l'échelle fixée au niveau du panneau arrière.

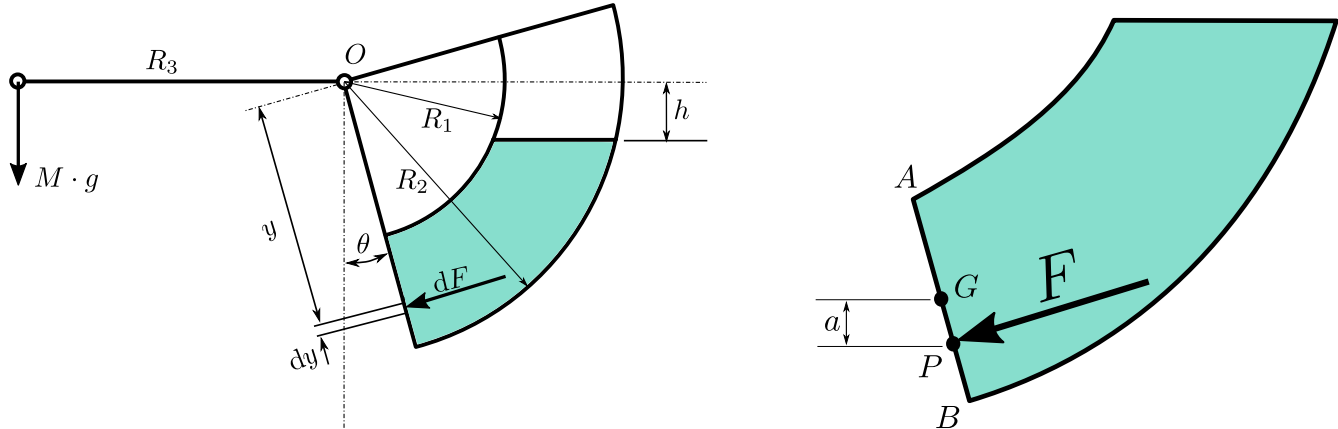


FIGURE 2.2 – Schéma de l'appareil d'étude du centre de poussée.

2.4 Partie théorique

Cette expérience consiste à déterminer la poussée qui s'exerce sur une surface plane rectangulaire, de longueur L et dont la largeur est la trace AB , inclinée d'un angle θ (figure 2.2). G étant le centre de gravité de la plaque, P est le centre de poussée c'est-à-dire le point d'application de la résultante des forces hydrostatiques sur la plaque.

On se propose de déterminer analytiquement l'intensité de la force, sa direction et son sens, de déterminer en fonction de θ , la position de P par rapport à G .

On appliquera les résultats dans ce TP, en distinguant les deux cas suivants :

- plaque totalement immergée
- plaque partiellement immergée.

Démarche théorique

1. Déterminer dF en fonction de ρ , g , y , θ , $h_0 = \frac{h}{\cos(\theta)} = h \sec \theta$ et b épaisseur du cadran.
2. Calculer F pour les cas $h_0 < R_1$ et $h_0 > R_1$.
3. Déterminer dM_o en fonction de ρ , g , y , θ , h_0 et b épaisseur du cadran.
4. Démontrer que pour les cas $h_0 < R_1$ et $h_0 \geq R_1$, M_o est donné par :

$$M_o = \rho \cdot g \cdot b \cdot \cos(\theta) \left\{ \left[\frac{R_2^3 - R_1^3}{3} \right] - h_0 \left[\frac{R_2^2 - R_1^2}{2} \right] \right\} \quad \text{pour } h_0 < R_1 \quad (2.1)$$

$$M_o = \rho \cdot g \cdot b \cdot \cos(\theta) \left\{ \left[\frac{R_2^3 - h_0^3}{3} \right] - h_0 \left[\frac{R_2^2 - h_0^2}{2} \right] \right\} \quad \text{pour } h_0 \geq R_1 \quad (2.2)$$

5. Dédurre la position du centre de poussée P dans les deux cas.

2.5 Partie expérimentale

2.5.1 Mode opératoire

Il est impératif de manipuler avec beaucoup de précaution et de soin la surface et les bords de roulement de la cuve lors de l'utilisation de l'appareil.

1. Dévisser le bouton moleté de serrage qui verrouille la cuve au panneau arrière et l'accrocher derrière l'appareil.
2. Mettre le plateau de base bien horizontal en vissant ou dévissant les pieds et en vous aidant du niveau à bulle.
3. Placer la cuve sur la surface de roulement. Vérifier que la graduation du panneau arrière se met bien à niveau de sorte que la ligne zéro passe par le centre de rotation et s'aligne avec la ligne zéro du bac.
4. Fixer le support de poids au cordon, équilibrer l'appareil de sorte à amener le plan immergé à la verticale (position 0°) en versant doucement de l'eau dans la cuve d'équilibrage.
5. Une fois équilibrée la cuve doit être réglée de façon à ce que l'axe de rotation du cylindre coïncide avec la ligne verticale du panneau arrière pour garantir suffisamment de place sur la surface roulante au cours de l'expérience.
6. Ajouter une masse de 20g au support de poids, verser de l'eau dans la cuve jusqu'à obtenir l'équilibre c'est-à-dire retrouver la position 0° . Relever la masse et le volume d'eau : la hauteur h .
7. Renouveler l'expérience avec différentes valeurs de poids et consigner les mesures dans le tableau 1.

8. Vider les deux cuves, le support de poids étant en place, on verse de l'eau dans la cuve d'équilibrage jusqu'à ce que l'appareil atteigne la position de 10° , refaire l'expérience avec différents poids en prenant comme position d'équilibre 10° . Consigner les résultats dans le tableau 2.
9. Reprendre l'expérience pour deux autres valeurs de l'angle d'équilibre (tableaux 3 et 4).
10. Vider les deux cuves et visser l'appareil au panneau arrière.

2.5.2 Résultats et interprétations

1. Démontrer qu'il est possible de déterminer la masse volumique ρ de l'eau utilisée en considérant le cas de surface totalement immergée (quelle courbe tracer et comment l'utiliser pour aboutir à ρ)
2. Pour le cas de la surface partiellement immergée tracer $M + \frac{\rho b R_z^2 h}{2}$ en fonction de h^3 pour différentes inclinaisons θ et comparer avec le résultat théorique. Y a-t-il une bonne concordance ? Sinon à quoi les différences sont-elles dues ? Conclure.

TABLE 2.1 – Expérience 1 : position d'équilibre à 0°

Masse (g)	h (cm)	Moment (Nm)	Force (N)	a (m)

TABLE 2.2 – Expérience 2 : position d'équilibre à 10°

Masse (g)	h (cm)	Moment (Nm)	Force (N)	a (m)

TABLE 2.3 – Expérience 3 : position d'équilibre à°

Masse (g)	h (cm)	Moment (Nm)	Force (N)	a (m)

TABLE 2.4 – Expérience 4 : position d'équilibre à°

Masse (g)	h (cm)	Moment (Nm)	Force (N)	a (m)

Masse : w (g)	$M = \frac{w \times 9.81 \times R_3}{10^3}$	h (cm)	h^3 (m)	$M + \frac{wbR_2^2h}{2}$ (Nm)	θ°

TP 3

Étude de l'impact d'un jet

3.1 Introduction

L'un des procédés de transformation de l'énergie hydraulique en énergie mécanique, consiste à utiliser la pression pour amener le fluide à prendre des vitesses importantes sous forme de jet que l'on dirige sur les pales d'une turbine. La turbine est ainsi mise en rotation. Ce type de turbines hydrauliques peut atteindre une puissance de 100 MW et avoir un rendement supérieur à 90%.

3.2 But du TP

Le but de ce TP est d'étudier, en fonction de la quantité d'accélération, la force d'impact d'un jet frappant des obstacles tels qu'un disque plat ou incliné, une calotte hémisphérique ou conique.

3.3 Description de l'appareil

L'appareil utilisé est représenté schématiquement sur la figure 3.1. Il est relié au banc hydraulique d'alimentation par un tuyau vertical équipé à son extrémité d'un gicleur produisant un jet vertical ascendant. Ce jet est envoyé sur un auget en forme de disque ou de calotte. L'ensemble est dans un cylindre transparent, muni à sa base d'une conduite de retour débitant dans le réservoir de mesure de débit du banc hydraulique.

L'auget est monté sur un levier articulé sur lequel on fait déplacer une masse mobile pour obtenir son équilibre à la position horizontale. Le levier est aussi suspendu à un ressort de faible raideur pour équilibrer la somme des poids du levier, de la masse mobile en position zéro et de l'auget. La position

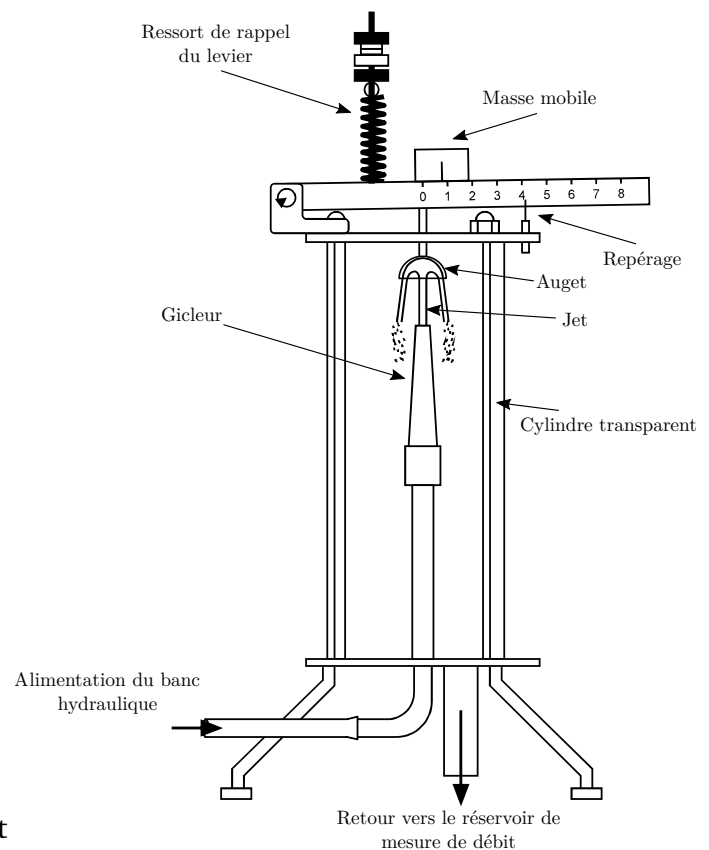


FIGURE 3.1 – Schéma de l'appareil

horizontale d'équilibre est indiquée par un repérage suspendu au levier. La force d'impact du jet se mesure par le déplacement de la masse mobile sur le levier.

3.4 Étude théorique

Considérons un auget symétrique par rapport à un axe x (voir figure 3.2). Le jet d'un écoulement de débit massique \dot{m} (en Kg/s) de vitesse u_1 (en m/s) et de direction parallèle à l'axe x , percute l'auget qui le dévie d'un angle β . Le fluide quitte l'auget à une vitesse u_2 de direction faisant un angle β par rapport à l'axe des x .

En négligeant les variations de pression piézométrique et du niveau du fluide entre l'entrée et la sortie de l'auget, la quantité de mouvement du fluide, suivant l'axe des x , à l'entrée de l'auget est :

$$Q_1 = \dot{m}u_1 \quad (3.1)$$

la quantité de mouvement du fluide, suivant l'axe des x , à la sortie de l'auget est :

$$Q_2 = \dot{m}u_2 \cos \beta \quad (3.2)$$

La force opposée au jet étant égale à la variation de la quantité de mouvement, est donc :

$$Q_2 - Q_1 = \dot{m}u_2 \cos \beta - \dot{m}u_1 \quad (3.3)$$

La force exercée sur l'auget, dans la direction x , est égale et opposée à celle-ci, ainsi :

$$F = \dot{m}[u_1 - u_2 \cos \beta] \quad \text{en Newtons} \quad (3.4)$$

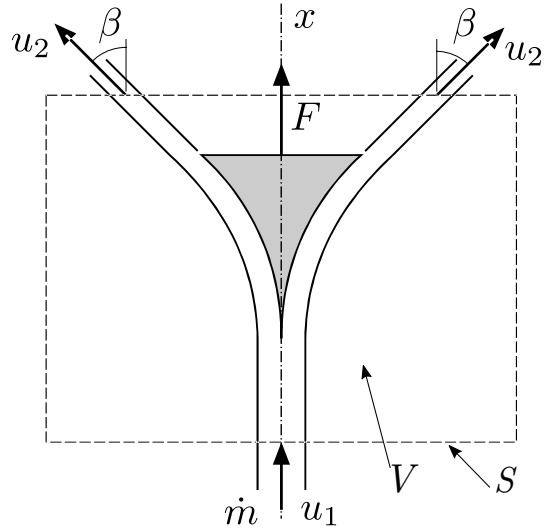


FIGURE 3.2 – Impact sur un auget symétrique

3.5 Partie expérimentale

3.5.1 Mode opératoire

L'appareil étant mis sur le banc d'alimentation, on effectue la mise à zéro du levier comme indiqué précédemment. Ensuite, on fait passer l'eau dans l'appareil en réglant la vanne d'alimentation du banc hydraulique pour avoir un débit maximum. Pour ce débit, on relève la position correspondante de la masse mobile sur le levier y_{max} . On réduit ensuite le débit palier par palier pour obtenir plusieurs points de mesure régulièrement espacés (au moins 6 points).

On déterminera le débit en mesurant le temps de remplissage du réservoir du banc hydraulique.

3.5.2 Caractéristiques de l'appareil

On utilisera pour cette manipulation les obstacles : O_1 auget plat ; O_2 auget hémisphérique.

3.5.3 On commencera par relever :

le diamètre du gicleur	$d =$
la section du gicleur	$s =$
la masse de la masse mobile	$M =$
la distance entre l'axe x de l'auget et l'axe de l'articulation	$L =$
la distance du gicleur à l'auget	$h =$

3.5.4 Calculs préliminaires :

- Démontrer que pour un débit donné, lorsque l'équilibre est obtenu, quand M est déplacée d'une distance y par rapport à sa position d'équilibre pour un débit nul, la force F est de l'ordre de $4gy$ où g est l'accélération de la pesanteur égale à 9.81 m/s^2 .

.....

.....

.....

.....

.....

.....

- Calculer la vitesse u_0 du jet à sa sortie du gicleur en fonction du débit \dot{m} :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

- Déterminer la vitesse u_1 d'impact du jet sur l'auget en fonction de la vitesse u_0 de sortie du gicleur et de h . u_1 est inférieure à u_0 en raison des effets de la gravité.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

- Déterminer l'influence de la direction de la vitesse de sortie du jet u_2 sur la force d'impact. Calculer les valeurs théoriques des forces dans les cas suivants :

★ Obstacle plan

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

★ Obstacle hémisphérique

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3.5.5 Expériences

Effectuer les mesures pour les obstacles O_1 et O_2 et remplir les tableaux suivants :

Obstacle O_1 :					
Débits	Positions y (m)	Calculs			
		u_0 (m/s)	u_1 (m/s)	$\dot{m} \cdot u_0$ (N)	F (N)

[illegible]

3.5.6 Résultats et discussions

- Tracer sur le même graphique les courbes donnant la force F en fonction de la quantité de mouvement mu_0 , pour les deux obstacles étudiés.
- Comparer les pentes expérimentales aux pentes théoriques :

	Pente expérimentale	Pente théorique	Rendement
O_1 :			
O_2 :			

- Commenter
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
- Quelles sont les sources d’erreurs probables ?

3.6 Conclusions

- Conclure
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

- Que suggérez-vous pour l'amélioration de l'appareil
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

TP 4

Étude des Pertes de charges

4.1 Buts de la manipulation

Cette manipulation permet la mesure et le calcul des pertes de charges dans différents types de conduites et accessoires hydrauliques, elle permet aussi de valider l'utilisation d'un diaphragme en guise de débitmètre. De même, on étudie la nature des écoulements (laminaires ou tourbillonnaires) dans les tuyères en fonction du nombre de Reynolds.

4.2 Définition de la perte de charge

Pour un fluide réel, l'écoulement s'effectue avec frottement. L'énergie mécanique est alors transformée en énergie calorifique. La diminution de l'énergie mécanique au cours du mouvement est appelée *perte de charge*.

On distingue deux types de pertes de charge :

- Pertes de charge régulières conséquences de la viscosité du fluide et de la rugosité de la paroi.
- Pertes de charge singulières dues aux mouvements internes de l'écoulement au niveau de singularités telles que les bifurcations, jonctions, élargissement, contraction et coudes.

4.3 Schéma du banc de dynamique des fluides

A : Vanne de réglage de débit (vanne à opercule)

B : Diaphragme mesure de débit (voir plan)

C : Coude 90° petit rayon

D : Longueur droite PVC :

- Diamètre 19 ± 0.5 mm
 - Longueur entre prises de pression 4 et 6 : 1000 mm
 - Longueur entre prises de pression 4 et 5 : 333 mm
 - Longueur entre prises de pression 5 et 6 : 666 mm
- (comparaison des pertes de charges régulières en fonction de la longueur)

E : Coude 90° grand rayon

F : Coudes 45°

G : Élargissement / Rétrécissement brusque (voir plan)

H : Té

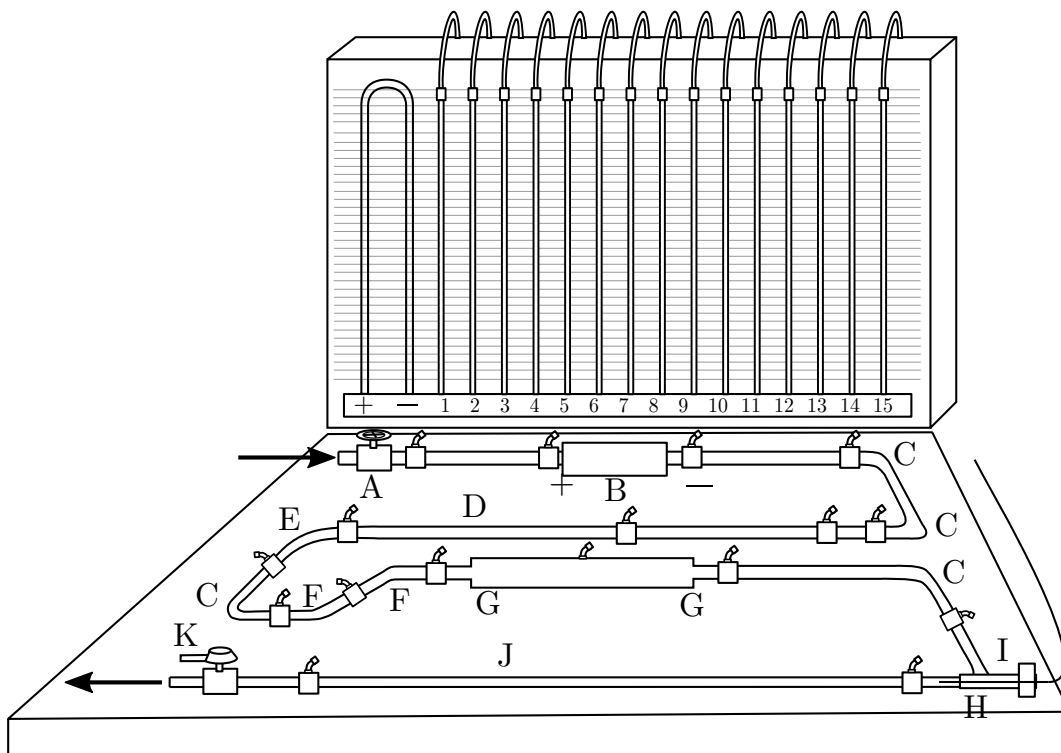
I : Injection de colorant (visualisation écoulement)

J : Longueur droite PVC transparent :

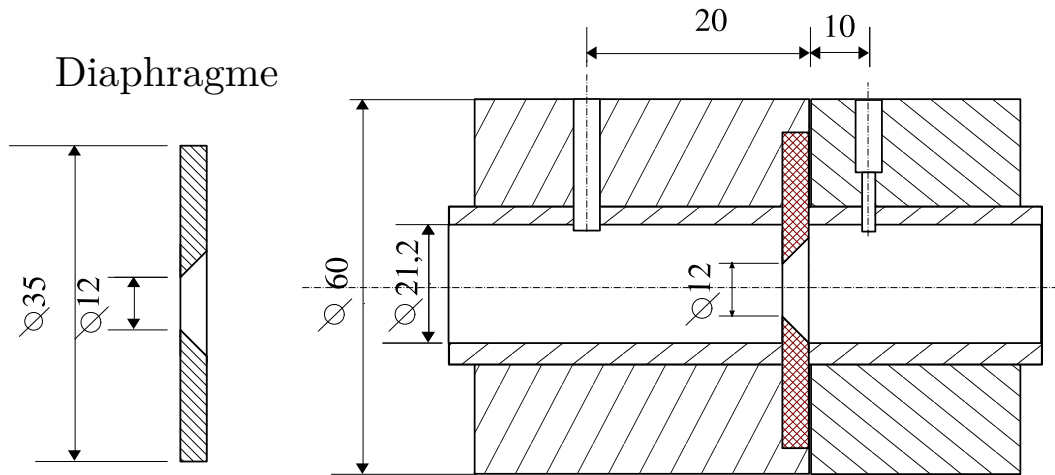
- Diamètre intérieur 21.2 0.5 mm
- Longueur entre prises 14 et 15 : 1000 mm
- Visualisation des écoulements laminaires et turbulents

K : Vanne à boisseau sphérique 1/4 de tour :

- Réglage de la pression
- 1 à 15 Prises de pression



PREMIÈRE PARTIE : ÉTALONNAGE DU DIAPHRAGME



Objectif :

Le diaphragme est un appareil permettant de connaître le débit du fluide parcourant un circuit hydraulique. Cette manipulation permet de valider l'utilisation du diaphragme en tant qu'instrument de mesure de débit.

4.4 Équation de continuité

Le liquide utilisé dans le banc de dynamique des fluides est de l'eau, donc incompressible. Le débit d'eau est le même à travers toutes les sections des tubes, ce qui se traduit par l'équation de continuité :

$$Q = S_1 \cdot V_1 = S \cdot V = S_2 \cdot V_2$$

$Q [cm^3.s^{-1}]$ est le débit ; $(S, S_1, S_2) [cm^2]$ sont des sections ; $(V, V_1, V_2) [cm.s^{-1}]$ sont des vitesses.

Relever et déterminer :

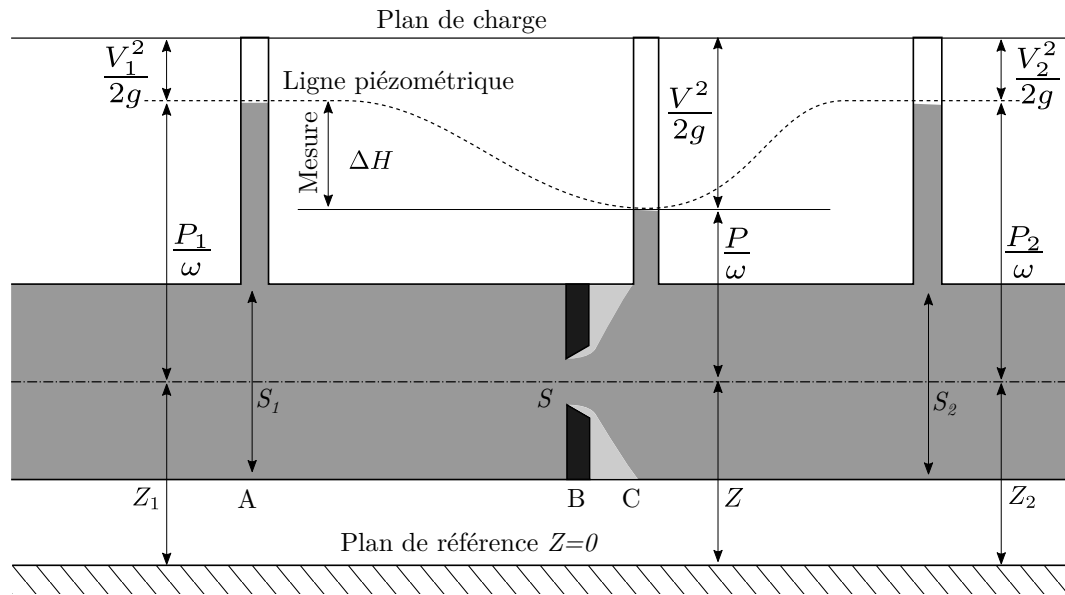
Le diamètre $D_1 =$	$S_1 =$	cm^2
Le diamètre $D_2 =$	$S_2 =$	cm^2

4.5 Théorème de Bernoulli

Démontrer en utilisant l'équation de Bernoulli et l'équation de continuité que le débit théorique en B peut être exprimé par :

$$Q_{th} = \frac{S}{\sqrt{1 - (\frac{S}{S_1})^2}} \sqrt{2g\Delta H}$$

où $Q_{th} [cm^3.s^{-1}]$ Débit théorique ; $S [cm^2]$ Section du diaphragme ; $S_1 [cm^2]$ Section du tube ; $\Delta H [cm d'eau]$ Différence de hauteur piézométrique ; $g [cm.s^{-2}]$ accélération de la pesanteur.



En réalité, la mesure ne peut avoir lieu exactement en B , elle est effectuée en C , où il se produit une contraction de la veine fluide. Si l'on tient compte de la section réelle en C , il faut utiliser un coefficient de contraction C_c :

$$Q_{th} = C_c \frac{S}{\sqrt{1 - (\frac{S}{S_1})^2}} \sqrt{2g\Delta H}$$

C_c Coefficient de contraction sans dimension, et qui vaut dans le cas du diaphragme utilisé : 0,62.
On écrira plus simplement :

$$Q_{th} = K \sqrt{\Delta H}$$

4.5.1 Calcul du coefficient K

$K =$

4.5.2 Tracé du graphe $Q_{th} = f(\Delta H)$

Tracer le graphe et montrer que l'on obtient une parabole à axe horizontal.

4.5.3 Établissement de la relation entre ΔH et V^2

Établir cette relation à partir de $Q_{th} = K\sqrt{\Delta H}$ et de l'équation de continuité.

.....

.....

.....

.....

$\Delta H =$

4.5.4 Débit expérimental

En utilisant un récipient de capacité connue (5 litres) et une montre chronomètre, mesurer le temps nécessaire pour remplir le récipient et porter dans le tableau ci-dessous les différences des hauteurs piézométriques correspondantes. **Suivre les indications du mode opératoire fourni.**

Si l'on considère Q_{exp} [$cm^3.s^{-1}$] débit expérimental; $Volume$ [cm^3] volume d'eau recueilli; t [s] le temps chronométré; ΔH [cm d'eau] Différence de hauteur piézométrique :

$Volume$	temps (t)	$Q_{exp} = \frac{Volume}{t}$	ΔH mesuré

4.5.5 Courbe expérimentale

Tracer la courbe expérimentale $Q_{exp} = f(\Delta H)$, sur le même graphique que la courbe théorique.

4.5.6 Comparaison des deux courbes

.....

.....

.....

.....

.....

.....

4.6 Conclusions

Le diaphragme peut-il être considéré comme un instrument de mesure de débit ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

DEUXIÈME PARTIE : PERTES DE CHARGES SINGULIÈRES

4.7 Variation brusque de section

Objectif : Vérifier par des mesures expérimentales, l'existence d'une perte d'énergie lorsque le fluide passe à travers de brusques variations de section.

4.7.1 Élargissement brusque

L'équation de continuité, exprimant l'invariabilité du débit pour un fluide parfait incompressible, a la forme :

$$Q = S_{10} \cdot V_{10} = S_{11} \cdot V_{11} = S_{12} \cdot V_{12}$$

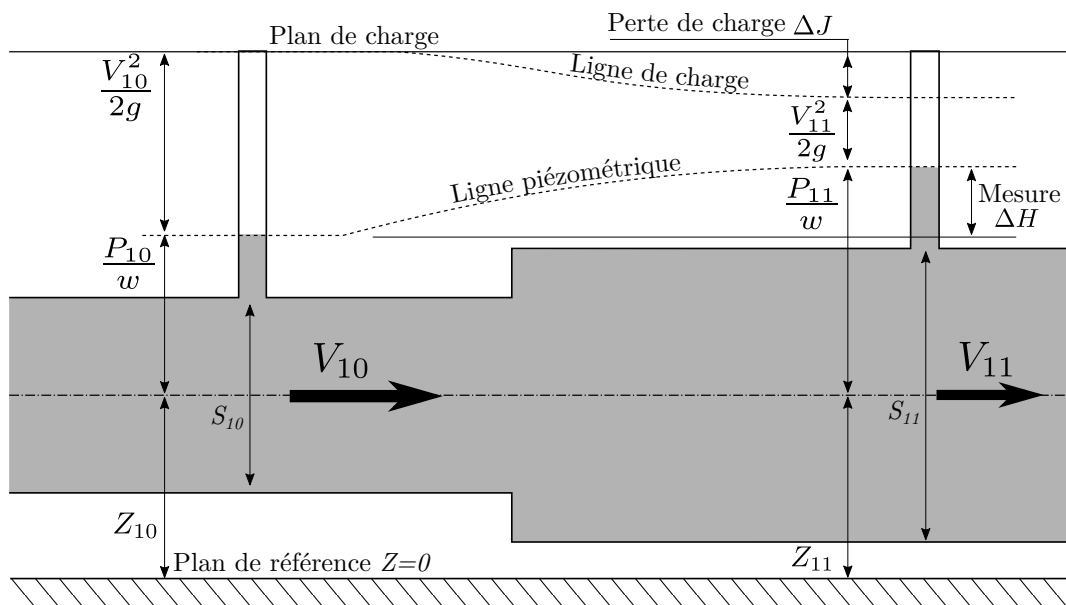
La connaissance du rapport des sections permet donc de déterminer le rapport inverse des vitesses. Z est constant pour notre banc d'expérimentation, on écrit l'équation de Bernoulli entre les prises de pression 10 et 11 :

$$\frac{V_{10}^2}{2g} + \frac{P_{10}}{\rho g} + Z_{10} = \frac{V_{11}^2}{2g} + \frac{P_{11}}{\rho g} + Z_{11}$$

En réalité l'eau n'est pas un fluide parfait et il existe des pertes d'énergie dues au frottement des particules fluides entre elles et sur les parois. Soit ΔJ cette perte d'énergie exprimée en hauteur d'eau, alors :

$$\frac{V_{10}^2}{2g} + \frac{P_{10}}{\rho g} + Z_{10} = \frac{V_{11}^2}{2g} + \frac{P_{11}}{\rho g} + Z_{11} + \Delta J$$

4.7.2 Interprétation graphique



4.7.3 Observations

Que constate-t-on?

.....

Les hauteurs piézométriques sont-elles conformes à celles représentées sur le schémas?

Quelle interprétation énergétique peut-on faire à partir du théorème de Bernoulli?

Exprimer, pour un fluide parfait $\Delta J = 0$, et pour le banc de dynamique des fluides $Z_{10} = Z_{11}$, la différence $\frac{P_{10}}{\rho g} - \frac{P_{11}}{\rho g}$

$$\frac{P_{10}}{\rho g} - \frac{P_{11}}{\rho g} = \dots\dots\dots$$

4.7.4 Détermination de la perte de charge

Expression de la perte de charge

L'eau étant maintenant considérée comme un fluide réel, il existe une perte d'énergie, appelée perte de charge. En vous rappelant que $Z_{10} = Z_{11}$, déterminer l'expression de la perte de charge ΔJ en fonction de V_{10} , P_{10} , V_{11} et Z_{11} .

Mesure de la perte de charge

$$D_{10} = 21,1 \text{ mm} \quad D_{11} = 42,5 \text{ mm}$$

Mesures		Calculs			Mesures			Calculs
Diaphragme	ΔH	$\frac{V_{10}^2}{2g}$	$\frac{V_{11}^2}{2g}$	$\frac{V_{10}^2}{2g} - \frac{V_{11}^2}{2g}$	$\frac{P_{10}}{\rho g} = H_{10}$	$\frac{P_{11}}{\rho g} = H_{11}$	$H_{10} - H_{11}$	ΔJ
	Q^*							

(*) Débit à relever sur le graphe $Q = f(\Delta H)$ d'étalonnage du diaphragme.

4.7.5 Tracer le graphe $\Delta J = f(Q)$

Commentaires :

4.8 Pertes de charge singulières : Coudes

Objectif : Vérifier par des mesures, l'existence d'une perte d'énergie lorsque le fluide passe à travers des coudes de rayons de courbure et d'angles de déviation différents.

4.8.1 Équations de continuité et de Bernoulli

Appliquons ces équations générales aux phénomènes se produisant, par exemple, entre les prises de pression 6 et 7.

Considérons dans un premier temps, que l'eau qui parcourt les tubes, est un fluide parfait incompressible. L'équation de continuité exprimant l'invariabilité du débit est de la forme :

$$Q = S_6 \cdot V_6 = S_7 \cdot V_7 = S_i \cdot V_i$$

En réalité l'eau n'est pas un fluide parfait. Soit ΔJ la perte d'énergie due au frottement des particules fluides entre elles et sur les parois, l'équation de Bernoulli s'écrit :

$$\frac{V_6^2}{2g} + \frac{P_6}{\rho g} + Z_6 = \frac{V_7^2}{2g} + \frac{P_7}{\rho g} + Z_7 + \Delta J_6^7$$

4.8.2 Observations

Que constate-t-on ?

.....

.....

Les hauteurs piézométriques sont-elles conformes à celles représentées sur le schémas ?

.....

.....

.....

Quelle interprétation énergétique peut-on faire à partir du théorème de Bernoulli ?

.....

.....

.....

Exprimer, pour un fluide parfait $\Delta J = 0$, et pour le banc de dynamique des fluides $Z_6 = Z_7$, la différence $\frac{P_6}{\rho g} - \frac{P_7}{\rho g}$

$$\frac{P_6}{\rho g} - \frac{P_7}{\rho g} = \dots\dots\dots$$

4.8.3 Détermination de la perte de charge

Expression de la perte de charge

L'eau étant maintenant considérée comme un fluide réel, il existe une perte d'énergie, appelée perte de charge. En vous rappelant que $Z_6 = Z_7$, déterminer l'expression de la perte de charge ΔJ en fonction de P_6 et P_7 .

$$\frac{P_6}{\rho g} - \frac{P_7}{\rho g} = \dots\dots\dots$$

Mesure de la perte de charge

$$D_1 = D_7 = D_8 = D_9 = D_{10} = 21,2 \text{ mm}$$

Coudes à 90°						
Mesures		Grand rayon**			Petit rayon**	
Diaphragme	Q^*	$\frac{P_6}{\rho g}$	$\frac{P_7}{\rho g}$	ΔJ_6^7	$\frac{P_7}{\rho g}$	ΔJ_7^8
ΔH						

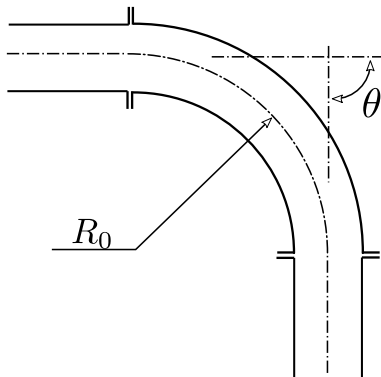
(*) Débit à relever sur le graphe $Q = f(\Delta H)$ d'étalonnage du diaphragme.

(**) R_0 rayon de courbure moyen du coude (voir figure)

4.8.4 Tracer les graphes $\Delta J = f(Q)$ pour ces coudes

Commentaires :

4.8.5 Synthèse



θ : angle de déviation du coude en degré

R_0 : rayon moyen du coude

Sachant que $\Delta J = \xi \frac{V^2}{2g}$ avec $\xi = \left(\frac{D}{R_0}, \theta, \mathcal{R} \right)$

$$\text{avec } \xi = \left[0.13 + 1.85 \left(\frac{D}{2R_0} \right)^{7/2} \right] \frac{\theta}{90}$$

Variation en fonction de R_0 :

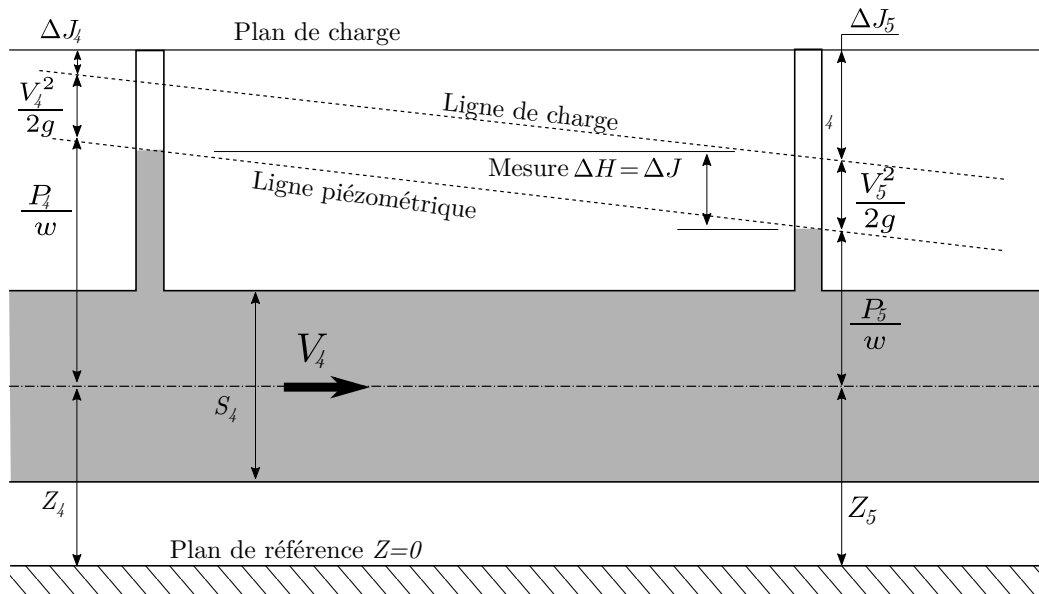
On observe qu'un même coude peut créer une perte de charge plus grande, si le fluide qui le traverse est déjà perturbé par un obstacle le précédant.

TROISIÈME PARTIE : PERTES DE CHARGES RÉGULIÈRES

Objectif : vérifier par des mesures, l'existence d'une perte d'énergie lorsqu'un fluide réel passe à travers des conduites rectilignes de section constante.

4.9 Interprétation graphique

Les phénomènes de perte de charge vont être considérés entre les prises de pression 4 et 5.



4.9.1 Observations

Que constate-t-on ?

Les hauteurs piézométriques sont-elles conformes à celles représentées sur le schémas ?

Quelle interprétation énergétique peut-on faire à partir du théorème de Bernoulli ?

Exprimer, pour un fluide parfait $\Delta J = 0$, et pour le banc de dynamique des fluides $Z_4 = Z_5$, la différence $\frac{P_4}{\rho g} - \frac{P_5}{\rho g}$

$$\frac{P_4}{\rho g} - \frac{P_5}{\rho g} = \dots\dots\dots$$

4.9.2 Détermination de la perte de charge

Expression de la perte de charge

L'eau étant maintenant considérée comme un fluide réel, il existe une perte d'énergie, appelée perte de charge. En vous rappelant que $Z_4 = Z_5$, déterminer l'expression de la perte de charge ΔJ en fonction de P_4 et P_5 .

$$\frac{P_4}{\rho g} - \frac{P_5}{\rho g} = \dots\dots\dots$$

Mesure de la perte de charge

Mesures		Longueur 0.33 m			Longueur 0.66 m		Lg 1m
Diaphragme ΔH	Q^*	H_4	H_5	ΔJ_4^5	H_6	ΔJ_5^6	ΔJ_4^6

(*) Débit à relever sur le graphe $Q = f(\Delta H)$ d'étalonnage du diaphragme.

4.9.3 Tracer les graphes $\Delta J = f(Q)$ pour 4/5 ; 5/6 ; 4/6

Commentaires :

.....

TP 5

Canal Hydraulique - Déversoir à Paroi Mince

5.1 Introduction

Le déversoir à paroi mince est fréquemment utilisé pour mesurer le débit dans un canal. Il est facile à installer, et à condition de répondre aux exigences posées, il peut être employé en toute confiance en association avec les données standard d'étalonnage. Cette expérience a pour but de définir la relation entre la hauteur de chute au-dessus du déversoir et le débit.

5.2 Équipement

Déversoir à paroi mince, à nappe ventilée, un limnimètre à vernier et une règle.

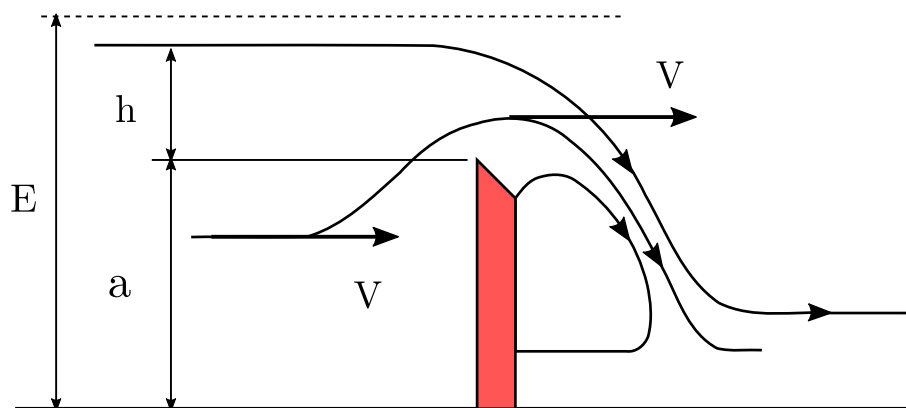


FIGURE 5.1 – Ecoulement au-dessus d'un déversoir à paroi mince.

5.3 Procédure

Il faut tout d'abord s'assurer que le canal est à l'horizontal en le remplissant à mi-hauteur d'eau le canal et s'assurer que le niveau d'eau à la surface est le même le long du canal, et ce, en utilisant un limnimètre positionné aux extrémités. Dans le cas où le canal n'est pas horizontal, le vérin à vis sera utilisé pour rectifier l'inclinaison.

On fait ensuite circuler l'eau dans le canal en ouvrant progressivement la vanne de commande, jusqu'à obtenir un débit maximal (**Prendre soin de ne pas dépasser $9 \text{ m}^3/\text{h}$ pour ne faire déborder le**

canal).

On mesure à l'aide d'un limnimètre la hauteur de chute à 30 cm à l'amont du déversoir.

Pour garantir une précision satisfaisante il convient de prendre cette mesure plusieurs fois et d'enregistrer la moyenne (\bar{h}). On diminue ensuite le débit par paliers successifs et on relève les hauteurs d'eau correspondantes.

Au cours de toutes ces mesures, il importe que la face inférieure de la nappe d'eau quittant le seuil de déversoir se décolle de la face aval du déversoir et il est prévu à cette fin un petit tube qui amène de l'air dans cette zone. De temps à autre et surtout quand la hauteur de chute est faible il faut injecter de l'air dans ce tube pour assurer la séparation de la nappe. La gamme de hauteurs de chute sur laquelle on peut prendre des mesures s'étend de 2550mm environ ; il faut arrêter la prise des mesures quand il n'est plus possible de séparer la nappe de seuil du déversoir.

5.4 Mesures et résultats

On donne :

Hauteur du déversoir au-dessus du lit du canal $a = 85mm$

Largeur du canal $b = 75mm$

Remplir le tableau suivant en mesurant en même temps la variation de hauteur du tube de Pitot pour en déduire ensuite une autre valeur expérimentale du débit à utiliser dans la comparaison des résultats.

Q (m ³ /h)	4 mesures de h				\bar{h} (m)	Q (m ³ /s)	($\bar{h}^{3/2}$)

Représenter sur un graphique Q en fonction de $\bar{h}^{3/2}$.

En déduire C tel que :

$$Q = C \cdot \frac{2}{3} \cdot b \cdot \sqrt{2g} \bar{h}^{3/2}$$

On s'attend à une valeur de C comprise entre 0,65 et 0,70.

Quel serait l'erreur sur le débit pour une erreur de lecture en h de 1mm pour les deux cas suivants :

- à l'extrémité supérieure de la plage de h ?
- à l'extrémité inférieure de la plage de h ?

Quelles conséquences entraînerait d'après vous le fait que la crête de déversoir soit arrondie plutôt qu'à angle vif.

TP 6

Mesure de la viscosité d'un fluide - Effet de la température

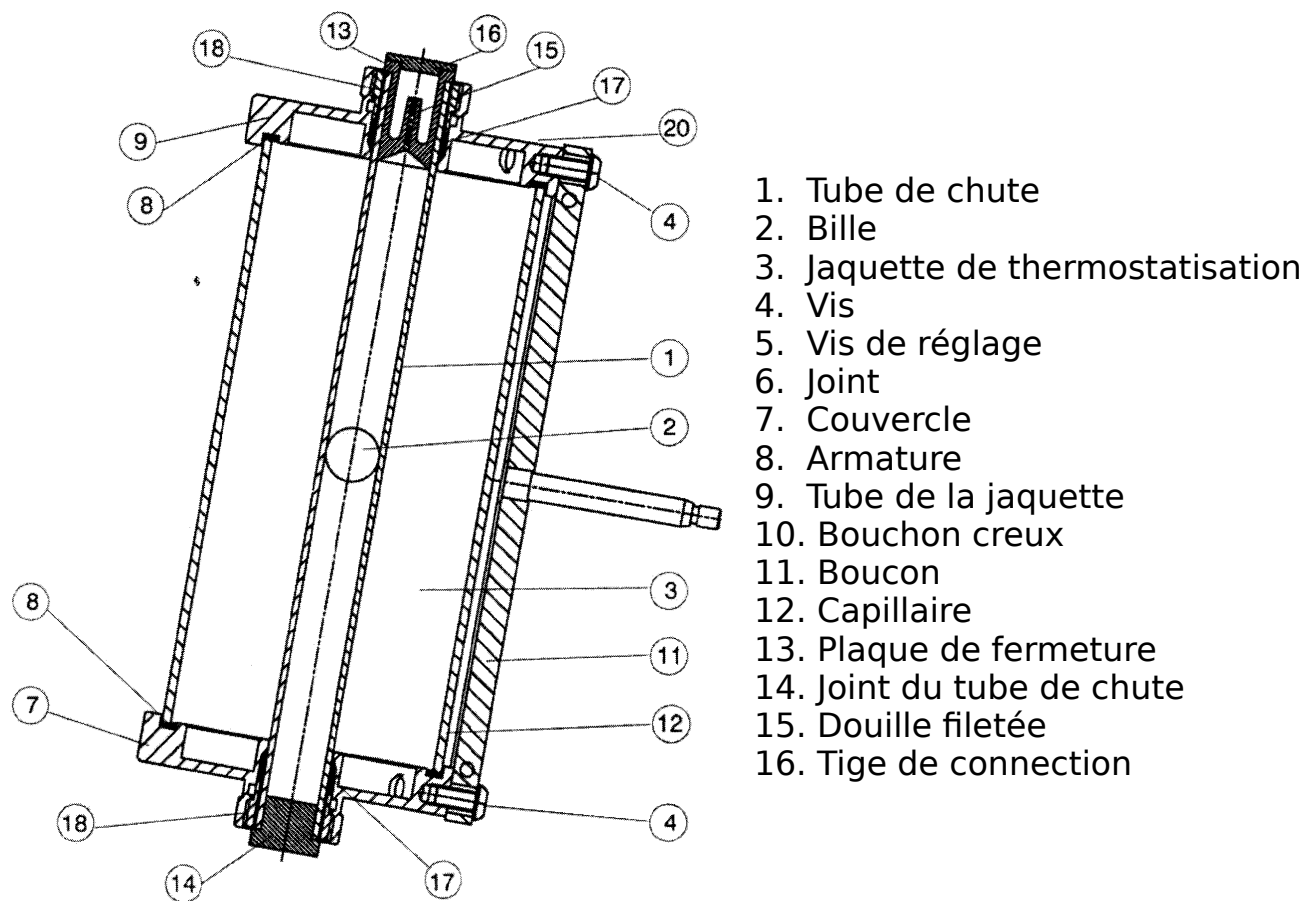


FIGURE 6.1 – Appareil de mesure de la viscosité.

6.1 But du TP

Il s'agit de mesurer la viscosité d'un liquide en utilisant le viscosimètre à chute de bille. Les mesures se feront pour différentes valeurs de la température.

6.2 Principe de mesure

Le viscosimètre à chute de bille sert à mesurer la viscosité des liquides newtoniens transparents. On mesure le temps de déplacement d'une bille sur une distance de chute déterminée. Ce temps, correspond à la durée du roulement et du glissement de la bille à travers l'échantillon placé dans un tube cylindrique incliné et nous permet de déterminer la viscosité dynamique par :

$$\mu = K(\rho_1 - \rho_2).t$$

avec :

μ viscosité dynamique [milliPascal seconde ou centipoise (1mPa.s=1cP)]

K constante de calibration [mPa m³/Kg]

ρ_1 densité de la bille métallique ou en verre [Kg/m³]

ρ_2 densité du liquide testé [Kg/m³]

t temps de déplacement de la bille [s]

La relation liant la viscosité dynamique et la viscosité cinématique fait intervenir la densité du liquide :

μ viscosité dynamique en mm²/s

ν viscosité en cinématique mPa

ρ densité du liquide en g/cm³

La constante k et la masse volumique de la bille sont données dans le document de calibration fournit par le fabricant. La masse volumique du liquide utilisé dans ces mesures est $\rho_1 = 860 \text{ Kg/m}^3$. La viscosité de l'huile utilisée est $\mu(40C) = 69\text{cP}$ et $\mu(100C) = 11\text{cP}$.

6.3 Description de l'appareil

Les deux marques annulaires A et B du tube de chute, qui délimitent la distance de mesure, sont espacées de 100 mm. L'axe du tube de chute fait un angle de 10° par rapport à la verticale. Le tube de chute est fermé par deux bouchons, le bouchon (12) comprend un capillaire débouchant dans une petite chambre, il sert à éliminer les variations de pression indésirables et l'entrée d'air lors des changements de température.

6.4 Préparation de la mesure

Toutes les pièces de l'appareil en contact avec l'échantillon doivent être propres et sèches. Remplir le tube de chute (1) jusqu'à environ 20 mm de son extrémité (avec un peu près 40 cm³ du liquide dont on veut déterminer la viscosité) et introduire la bille (2). Mettre en place le bouchon évidé (12) et fermer le tube. Le liquide ne doit pas contenir de bulles d'air et son niveau doit se situer un peu au-dessus du capillaire (14). Avant chaque série de mesure d'une part la bille doit parcourir une fois le tube de chute pour assurer le mélange de l'échantillon et d'autre part l'échantillon doit être stabilisé à la température d'essai pendant au moins 15 minutes.

6.5 Détermination du temps de chute

Le temps de chute de la bille entre les marques A et B est mesuré au chronomètre. Le temps de mesure commence au moment où la périphérie inférieure de la bille atteint la marque annulaire supérieure A

qui doit apparaître comme un trait à l'observateur. Le chronomètre est arrêté lorsque la bille atteint la marque inférieure B. En général il faut faire plusieurs mesures (de 3 à 5) pour déterminer une moyenne du temps de chute.

6.6 Mesures

- Pour étudier la variation de la viscosité avec la température, on fera les mesures pour quatre autres valeurs de la température.
- Choisir la bille adéquate pour les mesures à effectuer en vous aidant du tableau donné en annexe 1. Justifier votre choix (à rendre sur une feuille séparée).
- On remplira le tableau suivant :

T (°C)																			
t (s)																			
t _{moy}																			
ν (mm ² /s)																			
$\frac{1}{T}$ (K ⁻¹)																			

6.7 Exploitation des mesures

- Représenter sur un graphique la viscosité cinématique en fonction de la température.
- Conclure quant à la variation de la viscosité en fonction de la température. Déterminer la loi de variation de ν en fonction de la température pour le liquide fourni.