

Université Moulay Ismail
Faculté des Sciences et Techniques d'Errachidia
Département de Sciences de l'ingénieur
Licence Sciences et Techniques (LST) Energies Renouvelables
Option : Technologies Solaires et Eoliennes

Travaux pratiques

Module : Mécanique des fluides et transferts thermiques



Responsables :

Pr. AMRANI Abdel-illah

M. CHAOU Youssef

M. LAMRANI ALAOUI Ali

Année Universitaire : 2025/2026

Sommaire

Généralités	2
TP 1 : Nature d'un écoulement et Nombre de Reynolds.....	4
TP 2 : Théorème de Bernoulli.....	10

Généralités

I. Introduction

La mécanique des fluides est la branche de la physique qui étudie de manière analytique les lois gouvernantes le comportement des fluides, qu'ils soient en mouvement ou au repos. Elle se divise classiquement en deux grandes sous-disciplines, la statique des fluides, qui s'intéresse aux fluides immobiles, comme l'hydrostatique pour les liquides, et aussi la dynamique des fluides, qui étudie les fluides en écoulement, telle que l'hydrodynamique pour les liquides ou l'aérodynamique pour les gaz. Néanmoins, il s'avère nécessaire de valider ces lois par des expériences en mettant ainsi en exergue quelques phénomènes liés à cette discipline.

Le domaine d'application des écoulements des fluides au sein des canalisations ou des conduites se manifeste dans la majorité des installations hydrauliques ou thermiques. C'est dans cette optique que ces travaux pratiques traitent ces systèmes hydrauliques qui représentent une maille très importante dans le cercle de formation des étudiants. Notons bien que le champ d'usage de ces installations est très vague et se manifeste surtout dans le domaine de l'hydraulique et de l'industrie.

II. Description des bancs hydrauliques

Pour la réalisation de ces travaux pratiques de la mécanique des fluides, on dispose de deux bancs hydrauliques sur lesquels des dispositifs de mesures sont installés figure (1). Ces bancs garantissent l'alimentation en eau, comme ils intègrent les moyens de mesure des débits. Chaque banc est formé de deux demi-coques moulé anti-corrosions, montées sur des roues afin de faciliter le déplacement de l'ensemble de l'équipement.

III. Banc hydraulique de démonstration de Reynolds :

Ce type de banc est relié de façon explicite à un moteur électrique ainsi qu'à toutes conduites ou tuyauteries essentielles pour effectuer les mesures. Il est constitué d'un bac de stockage ainsi qu'un réservoir gradué permettant la mesure volumétrique du débit, ce qui autorise des mesures précises et déterminées. Par le biais d'une jauge de niveau, on peut facilement évaluer la hauteur de l'eau au sein du réservoir. L'eau est renvoyée vers le réservoir de stockage grâce à une bonde de vidange placée au fond du réservoir volumétrique. Les débits lents en régime laminaire peuvent être mesurés à l'aide d'une éprouvette graduée en verre de 250 ml. Le démarrage du

moteur s'effectue via un bouton poussoir. Des tuyaux transparents équipent l'appareil afin de connecter les prises de pression aux manomètres à mercure ou à eau pressurisée.

IV. Bancs hydraulique de démonstration de Reynolds et Bernoulli

La demi-coque supérieure de ce banc hydraulique comprend un canal ouvert, un réservoir volumétrique de mesure et un système pour installer les divers accessoires destinés au banc. De plus, Dans la demi-coque inférieure, un réservoir assure le stockage de l'eau.

L'eau du réservoir est aspirée par une pompe centrifuge auto-amorçante vers un raccord mâle situé au fond du canal, permettant le branchement des divers accessoires expérimentaux. Une vanne est utilisée pour contrôler le débit. La sortie de la pompe est équipée d'un manomètre de Bourdon pour indiquer la pression. Les divers accessoires sont montés sur le banc par l'intermédiaire de raccords rapides. Après usage, l'eau est collectée dans le réservoir de mesure volumétrique. Grâce à ses deux niveaux, ce réservoir peut être utilisé pour mesurer des débits allant du lent au rapide. Il dispose aussi une jauge graduée pour savoir le niveau d'eau. L'eau retourne dans le réservoir de stockage grâce à une bonde de vidange placée au fond du réservoir volumétrique.

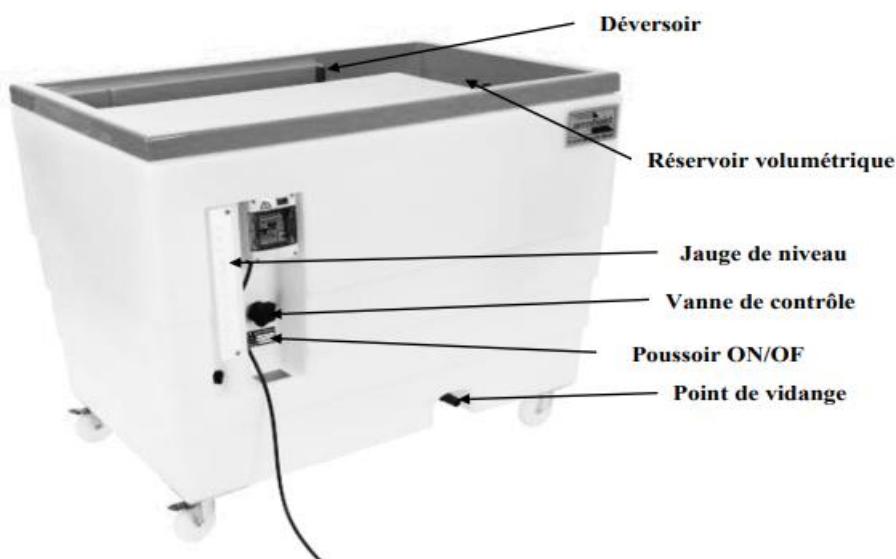


Figure 1 : Banc hydraulique.

TP 1 : Nature d'un écoulement et Nombre de Reynolds

Objectif du TP

Ce travail pratique a pour but de réaliser des expériences afin d'identifier et d'analyser, de manière expérimentale, les différents types d'écoulement d'un fluide, à savoir les régimes laminaires, transitoire et turbulent.

Méthodologie

L'approche expérimentale adoptée repose sur l'observation de l'écoulement de l'eau dans un tube à l'aide de l'injection d'un colorant. Cette technique permet de visualiser le comportement du fluide selon le régime d'écoulement. L'expérience s'inspire des travaux historiques menés par Osborne Reynolds en 1883, portant sur l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique droite.

Rappels théoriques

De manière générale, le régime d'écoulement d'un fluide résulte de l'équilibre entre différentes forces agissant sur celui-ci :

- **Régime laminaire** : À faible vitesse, l'écoulement est principalement gouverné par les forces visqueuses. Dans un tube cylindrique, le profil de vitesse présente une forme parabolique : la vitesse est maximale au centre du tube et s'annule au niveau des parois. Le colorant injecté suit des lignes de courant régulières et bien définies, et le mélange avec le fluide se produit uniquement par diffusion moléculaire.
- **Régime turbulent** : Lorsque le débit augmente fortement, l'écoulement devient instable et les forces d'inertie prennent le dessus sur les forces de viscosité. Dans ce cas, le colorant se disperse rapidement dans l'ensemble du fluide sous l'effet de mouvements latéraux importants. L'écoulement devient désordonné, aléatoire et caractérisé par une forte instabilité.
- **Régime transitoire** : Entre les régimes laminaire et turbulent existe une phase intermédiaire appelée régime transitoire. Durant cette étape, le colorant présente un comportement irrégulier et intermittent, alternant entre des zones d'écoulement stable et des perturbations, avant de redevenir temporairement laminaire.

L'expérience de Reynolds a révélé que la nature de l'écoulement dépend d'un nombre adimensionnel nommé nombre de Reynolds. Il est exprimé par la relation suivante :

$$R_e = \frac{Vd}{\nu} \quad \text{Ou } \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

La signification de chaque terme est donnée par le tableau ci-dessous :

Terme	Signification	Unités
V	Vitesse moyenne du fluide à travers la section étudiée	m/s
d	Diamètre de la conduite ou la largeur du jet fluide	m
ν	Viscosité cinétique du fluide	m ² /s

L'écoulement à l'intérieur d'un tube cylindrique est considéré comme **laminaire** lorsque le nombre de Reynolds est inférieur à 2000. Lorsque ce nombre dépasse cette valeur, l'écoulement devient **turbulent**. Entre ces deux régimes, il existe une zone intermédiaire dite **transitoire**, généralement caractérisée par un nombre de Reynolds compris entre 1800 et 10 000.

Dispositif expérimentale

Le matériel utilisé dans cette expérience se constitue des éléments suivants :

- Un appareil de démonstration de Reynolds ;
- Un banc hydraulique ;
- Un chronomètre, un thermomètre et une éprouvette graduée.

L'appareil de démonstration de Reynolds est installé sur le banc hydraulique. Le tube d'alimentation est directement raccordé à ce dernier et relié à un petit réservoir placé en partie supérieure de l'appareil. Ce réservoir contient des billes de verre dont le rôle est de stabiliser l'écoulement et de réduire les perturbations. Un entonnoir à lèvre est fixé à l'entrée du tube de visualisation afin d'assurer un écoulement uniforme du fluide.

Le débit est réglé à l'aide d'une vanne située à la base de l'appareil, connectée à un tube flexible permettant l'évacuation de l'eau sans projections. Le réservoir supérieur contient également un

colorant, injecté dans le tube d'essai à travers un tube hypodermique, avec un contrôle précis assuré par une vanne à vis.

Le tube d'essai utilisé pour l'expérimentation possède un diamètre **D = 0,010 m** et une section transversale **S = 7,854 × 10⁻⁵ m²**.

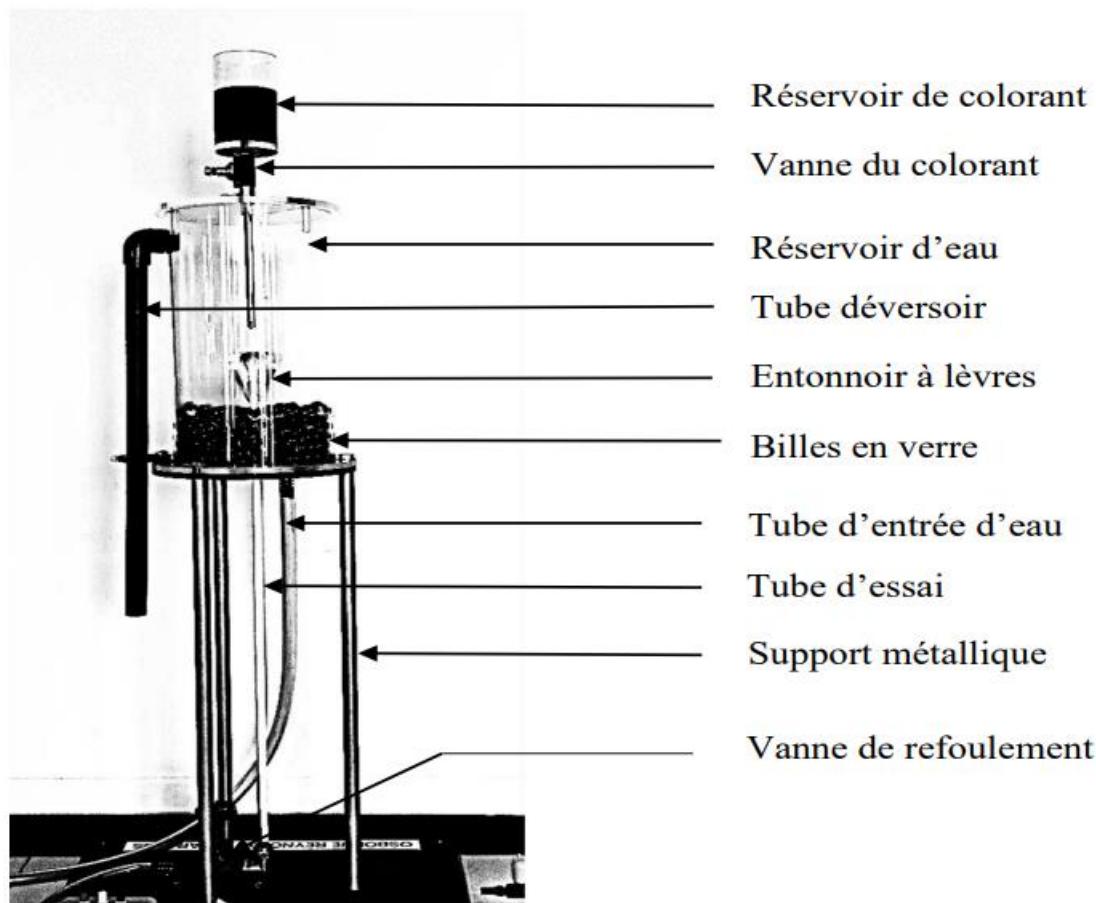


Figure 2 : Appareil de démonstration de Reynolds.

Remarque : Pendant l'expérience, tout mouvement du tube de sortie peut fausser la mesure du débit.

- Mettre en marche la pompe, ouvrir la vanne du banc hydraulique ainsi que celle du dispositif de contrôle de l'appareil pour remplir le réservoir principal avec de l'eau.
- Régler la vanne du banc hydraulique afin de créer un léger débordement d'eau à partir du réservoir de l'appareil.
- Ajuster le débit dans le tube d'essai grâce à la vanne de contrôle d'écoulement. Si nécessaire, réduire le débit en ajustant la vanne du banc pour minimiser le débordement.

- Remplir le réservoir d'injection avec le colorant jusqu'aux deux tiers de sa capacité, installer et fixer l'injecteur, puis vérifier que la vanne de contrôle de l'injection est fermée.
- Connecter l'aiguille hypodermique et ouvrir la vanne pour vérifier le bon fonctionnement de l'injection du colorant. Si le flux est irrégulier, nettoyer l'aiguille.
- Installer le système d'injection sur le réservoir de l'appareil et le positionner de manière à ce que l'aiguille soit centrée et placée juste au-dessus de l'entonnoir à lèvre.
- Fermer la vanne de contrôle de l'écoulement, ouvrir la vanne du banc hydraulique et remplir doucement le réservoir de l'appareil jusqu'au niveau de débordement, puis fermer la vanne d'entrée.
- Vérifier que le tube d'essai est complètement rempli d'eau.
- Attendre environ cinq minutes avant de commencer l'observation expérimentale.

Manipulation

1. Installer l'appareil de démonstration de Reynolds sur une surface stable et plane, plutôt que sur le banc hydraulique. Vérifier que le tube d'essai est bien vertical en s'assurant que la base de l'appareil est horizontale.
2. Se référer à la figure 2 pour fixer correctement l'entonnoir à lèvre et placer les billes de verre dans le réservoir.
3. Connecter le tube de débordement au réservoir principal et raccorder sa sortie à la vanne de contrôle d'écoulement. La sortie du tube doit déboucher dans le réservoir volumétrique, en laissant suffisamment d'espace pour la mesure du débit avec une éprouvette graduée.
4. Ouvrir légèrement la vanne du banc hydraulique pour que l'eau affleure le tube de débordement. Ajuster partiellement la vanne de contrôle d'écoulement et celle du colorant afin d'obtenir un écoulement lent et bien visible du colorant.
5. Pour observer le profil laminaire, fermer la vanne du banc et ouvrir la vanne du colorant de manière à déposer celui-ci goutte à goutte sur l'entonnoir à lèvre. Lorsque la vanne de contrôle d'écoulement est ouverte, le colorant doit suivre un profil parabolique, révélant la distribution des vitesses dans le tube.
6. Prendre des mesures du débit en recueillant un volume (V) dans l'éprouvette et chronométrer le temps nécessaire pour remplir ce volume. Ensuite, mesurer la

température (T) de l'écoulement dans l'éprouvette. À l'aide du tableau 2, déterminer la viscosité cinématique et vérifier que le nombre de Reynolds est inférieur à 1800, confirmant le régime laminaire.

7. Pour observer le régime transitoire, augmenter le débit en ouvrant davantage la vanne de contrôle et répéter l'injection du colorant afin de visualiser les fluctuations de l'écoulement.
8. Pour un écoulement turbulent à débit élevé et permanent, le colorant se mélange rapidement et de manière désordonnée. Il est important de noter que, même dans le régime transitoire, certaines zones du tube peuvent encore présenter des caractéristiques proches de l'écoulement laminaire.

Analyse et traitement des résultats expérimentaux

L'expérience consiste à réaliser plusieurs mesures et d'observations tout en faisant varier le débit de l'écoulement du fluide.

1. Reprendre les observations précédentes en notant le débit correspondant à chaque réglage et en répétant plusieurs essais pour plus de précision.
2. Mesurer la température de l'eau et déterminer la viscosité cinématique correspondant à cette température pour chaque expérience.
3. Compléter le tableau ci-dessous avec les valeurs obtenues.

Débit (m ³ /s)	Observations	Nombre de Reynolds	Conclusion

Tableau 1

4. Indiquer le mode de calcul de Re sur un exemple (unité).

Le tableau suivant illustre la variation de la viscosité cinématique de l'eau en fonction de la température :

Température (°C)	Viscosité cinématique (10 ⁻⁶ m ² /s)	Température (°C)	Viscosité cinématique (10 ⁻⁶ m ² /s)
0	1.793	25	0.893
1	1.732	26	0.873
2	1.674	27	0.854
3	1.619	28	0.836
4	1.568	29	0.818

5	1.520	30	0.802
6	1.474	31	0.785
7	1.429	32	0.769
8	1.386	33	0.753
9	1.346	34	0.738
10	1.307	35	0.724
11	1.270	36	0.711
12	1.235	37	0.697
13	1.201	38	0.684
14	1.169	39	0.671
15	1.138	40	0.658
16	1.108	45	0.602
17	1.080	50	0.554
18	1.053	55	0.551
19	1.027	60	0.476
20	1.002	65	0.443
21	0.978	70	0.413
22	0.955	75	0.386
23	0.933	80	0.363
24	0.911	85	0.342

Tableau 2 : Viscosité cinématique de l'eau en fonction de la température.

TP 2 : Théorème de Bernoulli

Objectif du TP

Ce travail pratique a pour objet majeur de vérifier la conformité du théorème de Bernoulli à travers l'étude d'un écoulement d'eau stationnaire et incompressible dans un tube de Venturi.

Méthodologie

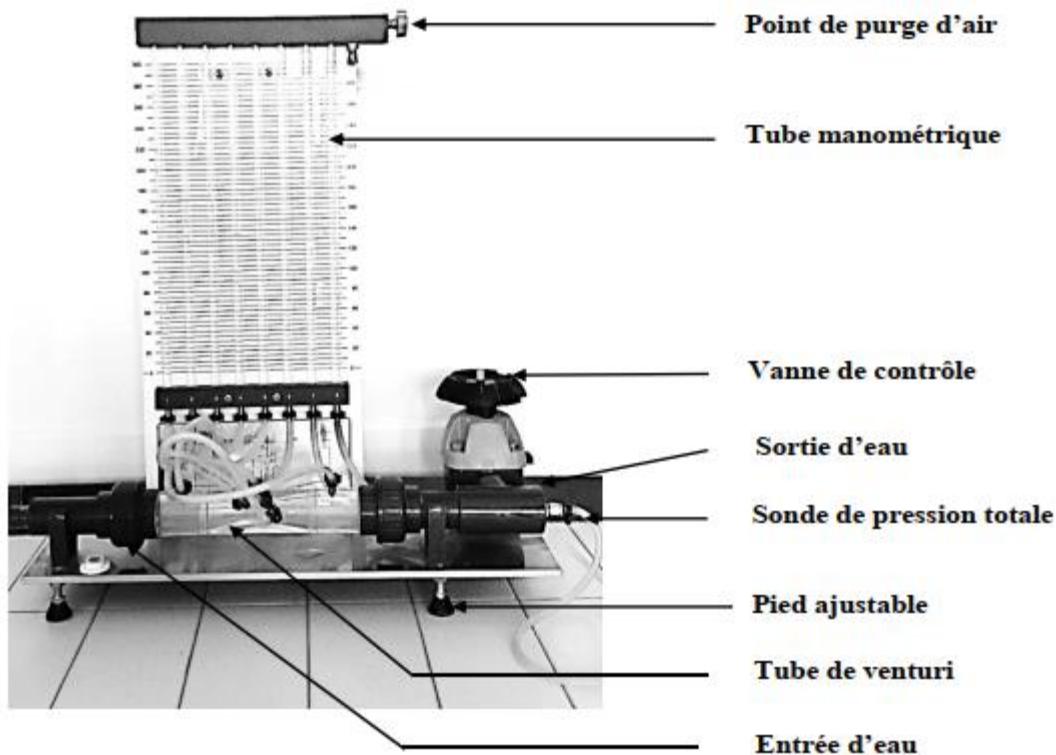
La démarche expérimentale consiste à mesurer le débit, la pression statique ainsi que la pression totale au sein d'un tube rigide de type convergent-divergent, dans le cas d'un écoulement permanent.

Description de l'appareil utilisé

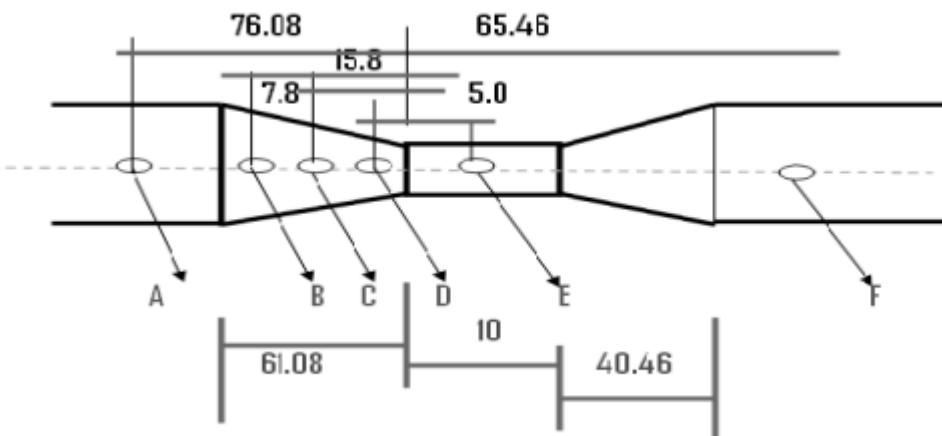
Le matériel utilisé dans cette expérience comprend les parties suivantes :

- Un appareil de démonstration du théorème de Bernoulli.
- Un banc hydraulique assurant l'alimentation en eau et la mesure du débit volumique.
- Un chronomètre permettant de mesurer le temps d'écoulement de l'eau dans le réservoir volumétrique.

La partie majeur formant l'appareil de démonstration de Bernoulli est basée sur l'incorporation d'un tube de Venturi de type convergent-divergent de forme circulaire en plexiglas à section variable.



Figures 3 : Appareil de démonstration de Bernoulli



Figures 4 : Positionnement des prises de pression

La cellule d'essai est équipée de six prises de pression reliées à des tubes manométriques, permettant la mesure simultanée de la pression statique en différents points le long de la cellule. La pression totale est mesurée à l'aide d'un tube de Pitot placé sur l'axe de la cellule d'essai. Les valeurs de pression sont lues directement sur un panneau manométrique gradué. L'alimentation en eau est assurée par un tuyau souple, tandis que le débit est régulé par

une vanne installée à la sortie de la cellule. La localisation des prises de pression ainsi que les diamètres des sections correspondantes sont présentées dans la figure 4 et le tableau 3.

Positions des prises de pression	Diamètres des sections (mm)	Dénivellations
A	25.0	h_1
B	13.9	h_2
C	11.8	h_3
D	10.7	h_4
E	10.0	h_5
F	25.0	h_6

Tableau 3 : Les caractéristiques des prises de pression

Étude théorique

L'équation de Bernoulli représente le bilan énergétique d'un fluide parfait et incompressible en régime stationnaire. Entre deux points (1) et (2) d'un même écoulement, elle s'écrit :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (1)$$

Où :

- P est la pression du fluide (Pa),
- ρ est la masse volumique du fluide (kg/m^3),
- V est la vitesse du fluide (m/s),
- g est l'accélération de la pesanteur (m/s^2),
- Z est la hauteur par rapport à une référence (m).

Cette équation indique que la somme de la pression, de l'énergie cinétique par unité de volume et de l'énergie potentielle gravitationnelle reste constante le long d'une ligne de courant. Elle permet ainsi de relier les variations de vitesse, de pression et de hauteur dans un écoulement, et sert de base pour l'analyse des régimes laminaire, transitoire et turbulent dans les tubes.

Pour une conduite horizontale la différence des cotes ($Z_1-Z_2=0$) est généralement négligeable, alors :

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

Sur l'appareil de démonstration de Bernoulli, la **pression statique** P est déterminée par la hauteur h indiquée sur les tubes manométriques, lesquels sont directement raccordés aux prises de pression. La hauteur h , exprimée en mètres, est reliée à la pression PPP par la relation suivante :

$$h = \frac{P}{\rho g}$$

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

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (3)$$

Pression totale

La **pression totale**, exprimée en hauteur h^0 , peut être mesurée à l'aide d'un tube de prise de pression placé à l'extrémité de la cellule d'essai, face au sens de l'écoulement. La hauteur h^0 , exprimée en mètres, est reliée à la pression totale selon la relation donnée par l'équation de Bernoulli.

Vitesse de l'écoulement

La vitesse du fluide peut être déterminée en mesurant le volume V d'eau écoulé dans le réservoir volumétrique pendant un intervalle de temps T . Le débit volumique Q est alors calculé par :

$$Q = \frac{V}{T} \quad (4)$$

La vitesse moyenne v dans la conduite est obtenue à partir du débit volumique et de la surface de la section A du tube :

$$v = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

Équation de continuité

Pour un fluide incompressible, le débit volumique se conserve le long de l'écoulement. Ainsi, l'équation de continuité s'écrit :

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (5)$$

Où A_1 et A_2 sont les sections transversales à deux points différents de la conduite, et v_1 et v_2 les vitesses correspondantes. Cette relation assure que le débit volumique reste constant le long du tube.

Manipulation

1. Installer l'appareil sur le banc hydraulique en position horizontale en ajustant soigneusement les pieds de l'appareil, afin d'assurer la précision des mesures.
2. Vérifier que la section à tester correspond à un convergent présentant un angle de 14° et qu'elle est correctement orientée dans le sens de l'écoulement. En cas d'inversion de la section de test, retirer impérativement la sonde de pression totale avant de libérer les raccordements.
3. Positionner le tube de sortie d'eau au-dessus du réservoir volumétrique afin de permettre le chronométrage du volume d'eau collecté.
4. Connecter l'accessoire d'entrée de l'appareil au banc hydraulique.
5. Fermer la vanne du banc hydraulique ainsi que la vanne de contrôle de l'appareil, puis démarrer la pompe. Ouvrir progressivement la vanne du banc pour remplir la conduite d'alimentation en eau.
6. Pour purger l'air contenu dans les prises de pression et les tubes manométriques, fermer la vanne du banc et la vanne de contrôle de l'appareil. Ouvrir ensuite le purge-air et retirer le bouchon de la vanne d'air adjacente.
7. Relier la vanne d'air à l'aide d'un tube dirigé vers le réservoir volumétrique, puis ouvrir la vanne du banc hydraulique afin de permettre l'écoulement de l'eau dans les tubes manométriques et d'éliminer complètement l'air.
8. Une fois la purge effectuée, resserrer le purge-air, ouvrir partiellement la vanne du banc hydraulique et vérifier le fonctionnement de la vanne de contrôle de l'appareil.
9. Ouvrir légèrement le purge-air pour permettre à l'air d'atteindre le sommet des manomètres. Ajuster, si nécessaire, les vannes afin d'obtenir des niveaux convenables dans les manomètres. Resserrer le purge-air lorsque les hauteurs souhaitées sont atteintes.
10. Déterminer le débit maximal à partir des niveaux maximum et minimum mesurés respectivement dans les manomètres (h_1) et (h_5). Si nécessaire, ajuster les niveaux des manomètres à l'aide du purge-air et de la pompe à air.

- Après le pompage, fermer le bouchon du purge-air afin de maintenir la pression de la pompe à air dans le système.

Remarque : Afin d'assurer la fiabilité des résultats, les mesures de débit doivent être réalisées à trois reprises différentes

Réglage du débit

En premier temps, effectuer une lecture pour un débit maximal. Puis, n'oublier surtout pas de diminuer le débit jusqu'à une valeur de la dénivellation ($h_1 - h_5$) qui avoisine les 50 mm. Effectuer une seconde mesure du débit, ajuster cette fois-ci le débit pour avoir approximativement la dénivellation ($h_1 - h_5$) au milieu des deux tests précédents.

Lecture de la pression statique

- Relever les dénivellations ($(h_1 - h_5)$) lorsque les niveaux des manomètres sont stabilisés.
- Vérifier que la sonde de pression totale est entièrement retirée de la section d'essai lors de ces mesures.

Mesure du temps et du volume collecté

- Utiliser le réservoir volumétrique pour mesurer le temps correspondant au volume d'eau collecté.
- Fermer la bonde de vidange et démarrer le chronomètre au début de la collecte, puis l'arrêter à la fin.
- Déterminer le volume d'eau à l'aide de la jauge de niveau. Il est recommandé de collecter l'eau pendant environ une minute afin de réduire l'erreur liée à la mesure du temps.
- Pendant ces mesures, s'assurer que la sonde de pression totale est retirée de la section d'essai.
- Répéter les mesures au moins deux fois afin de valider les résultats.

Lecture de la pression totale

- Mesurer la distribution de la pression totale à l'aide de la sonde de pression totale le long de la section d'essai.
- Prendre comme référence la prise de pression associée au manomètre (h_1).

- Commencer les mesures à 1 cm en amont du début de la section convergente d'angle 14° .
- Effectuer les relevés avec un pas de 1 cm le long de la section d'essai, jusqu'à la fin de la section divergente d'angle 21° .
- Reporter l'ensemble des mesures dans le tableau 4.

Inversion de la section d'essai

- Vérifier que la sonde de pression totale est complètement retirée de la section d'essai.
- Dévisser les deux raccordements de la section d'essai.
- Retirer la section d'essai et l'inverser.
- Raccorder de nouveau la section à l'installation.

Exploitation des données

Les données expérimentales recueillies doivent être traitées et analysées à l'aide des tableaux 4 et 5 présentés ci-après.

	Volum e V (m ³)	Temp s (s)	Débits Q (m ³ /s)	Distanc e (m)	Section A10 ⁻⁶ (m ²)	Pression statique h(m)	Vitesse V (m/s)	Pressio n dynami que h(m)	Pression totale h ₀ (m)
1				<i>h</i> ₁	0.00	490.9			
2				<i>h</i> ₂	0.006	151.7			
3				<i>h</i> ₃	0.0687	109.4			
4				<i>h</i> ₄	0.0732	89.91			
5				<i>h</i> ₅	0.0811	78.91			
6				<i>h</i> ₆	0.1415	490.9			
1				<i>h</i> ₁	0.00	490.9			
2				<i>h</i> ₂	0.006	151.7			
3				<i>h</i> ₃	0.0687	109.4			
4				<i>h</i> ₄	0.0732	89.91			
5				<i>h</i> ₅	0.0811	78.91			
6				<i>h</i> ₆	0.1415	490.9			
1				<i>h</i> ₁	0.00	490.9			
2				<i>h</i> ₂	0.006	151.7			
3				<i>h</i> ₃	0.0687	109.4			
4				<i>h</i> ₄	0.0732	89.91			
5				<i>h</i> ₅	0.0811	78.91			
6				<i>h</i> ₆	0.1415	490.9			

Tableau 4

d(cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	h ₁ -h ₅
h₈(mm)											
h₈(mm)											
h₈(mm)											

Tableau 5

- Tracer les courbes représentant (h₀), (h₈) et la vitesse (V) en fonction de la distance (d), puis analyser la validité de l'équation de Bernoulli pour les écoulements dans les sections convergente et divergente du tube.

- Énoncer explicitement les hypothèses retenues dans l'application de l'équation de Bernoulli et justifier les interprétations et conclusions tirées des résultats expérimentaux.
- Commenter et analyser la comparaison entre les valeurs de la pression totale obtenues par les deux méthodes expérimentales utilisées.