

**BULLETIN TECHNIQUE**  
**BANC DE DYNAMIQUE DES FLUIDES**  
**MP75AS / N°36**

Version AM-03/2014

Affaire TOULOUSE

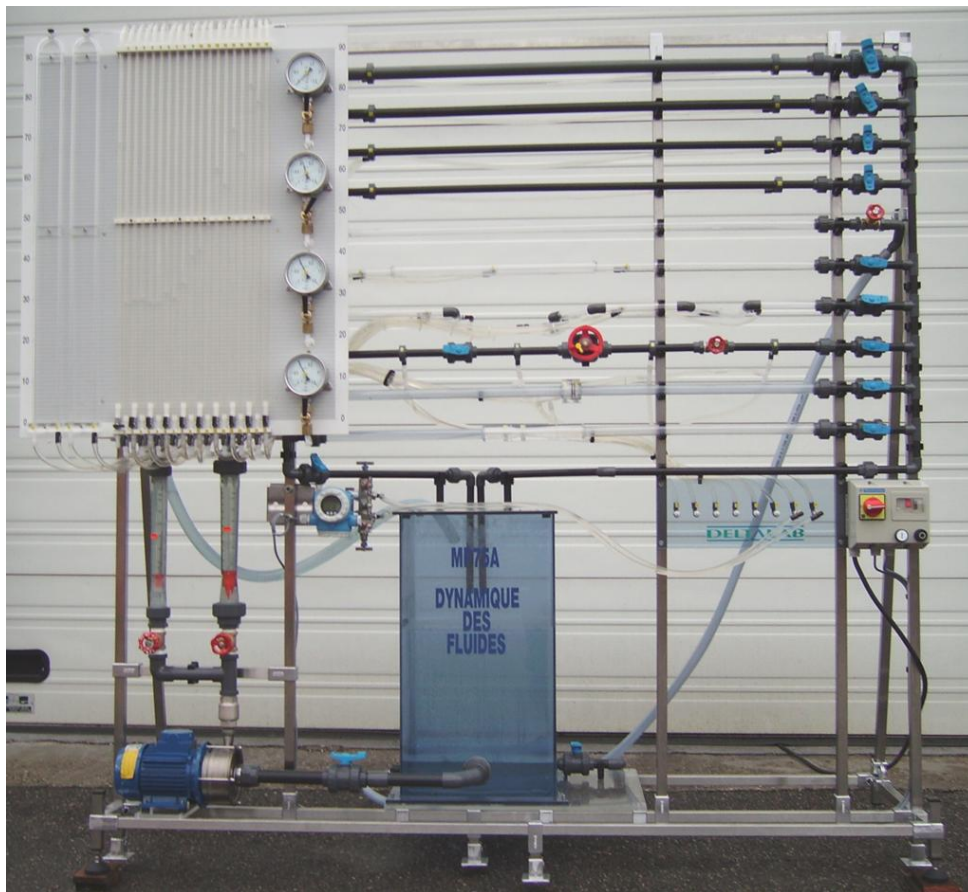


## SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>PRESENTATION DE L'INSTALLATION – MP75AS .....</b>	<b>5</b>
1.1	SCHEMA ET CARACTERISTIQUES .....	6
1.1.1	Schéma de l'installation .....	6
1.1.2	Description de l'installation .....	7
1.1.3	Nomenclature.....	7
1.1.4	Caractéristiques .....	8
1.2	INSTALLATION ET MISE EN SERVICE .....	8
1.3	UTILISATION.....	9
1.3.1	Utilisation du banc pour la mesure des pertes de charge .....	9
1.4	MAINTENANCE ET SECURITE .....	11
1.4.1	Ergonomie du poste.....	11
1.4.2	Maintenance et entretien .....	11
1.4.3	Sécurité .....	12
<b>2</b>	<b>DOSSIER THEORIQUE.....</b>	<b>13</b>
2.1	GENERALITES .....	13
2.1.1	Définition du fluide. ....	13
2.1.2	Liquides et gaz.....	13
2.1.3	Force de volume et forces de surface. ....	13
2.1.4	Equation fondamentale de l'hydrostatique.....	14
2.1.5	Interprétation énergétique de la loi fondamentale de l'hydrostatique .....	14
2.1.6	Mesure d'une pression.....	15
2.2	EQUATION DE CONTINUITE .....	17
2.2.1	Ligne de courant. ....	17
2.2.2	Filet de courant. ....	17
2.2.3	Tube de courant.....	17
2.2.4	Débit en volume.....	17
2.2.5	Equation de continuité .....	18
2.3	THEOREME DE BERNOULLI .....	18
2.4	PERTES DE CHARGE .....	20
2.4.1	Fluides réels.....	20
2.4.2	Représentation graphique des écoulements. ....	20
2.4.3	Pertes de charge régulières.....	21
2.4.4	Pertes de charge singulières. ....	24
2.5	ECOULEMENT LAMINAIRE / ECOULEMENT TURBULENT .....	27
2.5.1	Ecoulement laminaire .....	27
2.5.2	Ecoulement turbulent.....	27
2.5.3	Nombre de Reynolds. ....	27
2.5.4	Grandeurs mécaniques et hydrauliques .....	28
2.5.5	Rugosité uniforme équivalente .....	29
2.6	ORGANES DEPRIMOGENES – MESURE DES DEBITS.....	30
2.6.1	Théorie.....	30
2.6.2	Technologie des organes déprimogènes .....	31

<b>3</b>	<b>DOSSIER PEDAGOGIQUE .....</b>	<b>35</b>
3.1	PERTES DE CHARGE REGULIERES .....	36
3.1.1	Equation de continuité et de Bernoulli .....	36
3.1.2	Interprétation graphique.....	37
3.1.3	Observations .....	37
3.1.4	Détermination de la perte de charge .....	37
3.1.5	Exemple d'analyse des mesures .....	39
3.2	PERTE DE CHARGE SINGULIERES : LES COUDES .....	41
3.2.1	Equation de continuité et de Bernoulli .....	41
3.2.2	Interprétation graphique.....	42
3.2.3	Observations .....	42
3.2.4	Détermination de la perte de charge .....	42
3.2.5	Exemple d'analyse des mesures .....	43
3.3	PERTES DE CHARGE SINGULIERES : VARIATIONS BRUSQUES DE SECTION .....	45
3.3.1	Equation de continuité et de Bernoulli .....	45
3.3.2	Interprétation graphique.....	46
3.3.3	Observations .....	47
3.3.4	Détermination de la perte de charge .....	47
3.3.5	Exemple d'analyse des mesures .....	48
3.4	ECOULEMENT LAMINAIRE / TURBULENT (Option) .....	50
3.4.1	Observations à faible vitesse.....	50
3.4.2	Observations à vitesse élevée.....	51
3.5	ORGANE DEPRIMOGENE : DIAPHRAGME .....	52
3.5.3	Equation de continuité et de Bernoulli .....	52
3.5.4	Interprétation graphique.....	53
3.5.5	Expression du débit théorique .....	53
3.5.6	Détermination de la perte de charge .....	54
3.5.7	Exemple d'analyse des mesures .....	54
3.6	ORGANE DEPRIMOGENE : VENTURI.....	56
3.6.1	Expression théorique du débit .....	56
3.6.2	Détermination de la perte de charge .....	57
3.6.3	Exemple d'analyse des mesures .....	57
3.7	ETUDE DES VANNES.....	59
3.7.1	Détermination de la perte de charge .....	59
3.7.2	Exemple d'analyse des mesures .....	60
3.8	BIBLIOGRAPHIE .....	62
<b>4</b>	<b>DOSSIER TECHNIQUE.....</b>	<b>63</b>
4.1	SCHEMA DU VENTURI.....	63
4.2	SCHEMA DU DIAPHRAGME .....	63
4.3	POMPE .....	65
4.4	DEBITMETRES.....	67

# 1 PRESENTATION DE L'INSTALLATION – MP75AS



*Photo du MP75AS (non contractuelle)*

L'installation MP75AS permet d'étudier la dynamique des fluides ainsi que les pertes de charge.

L'étude porte sur :

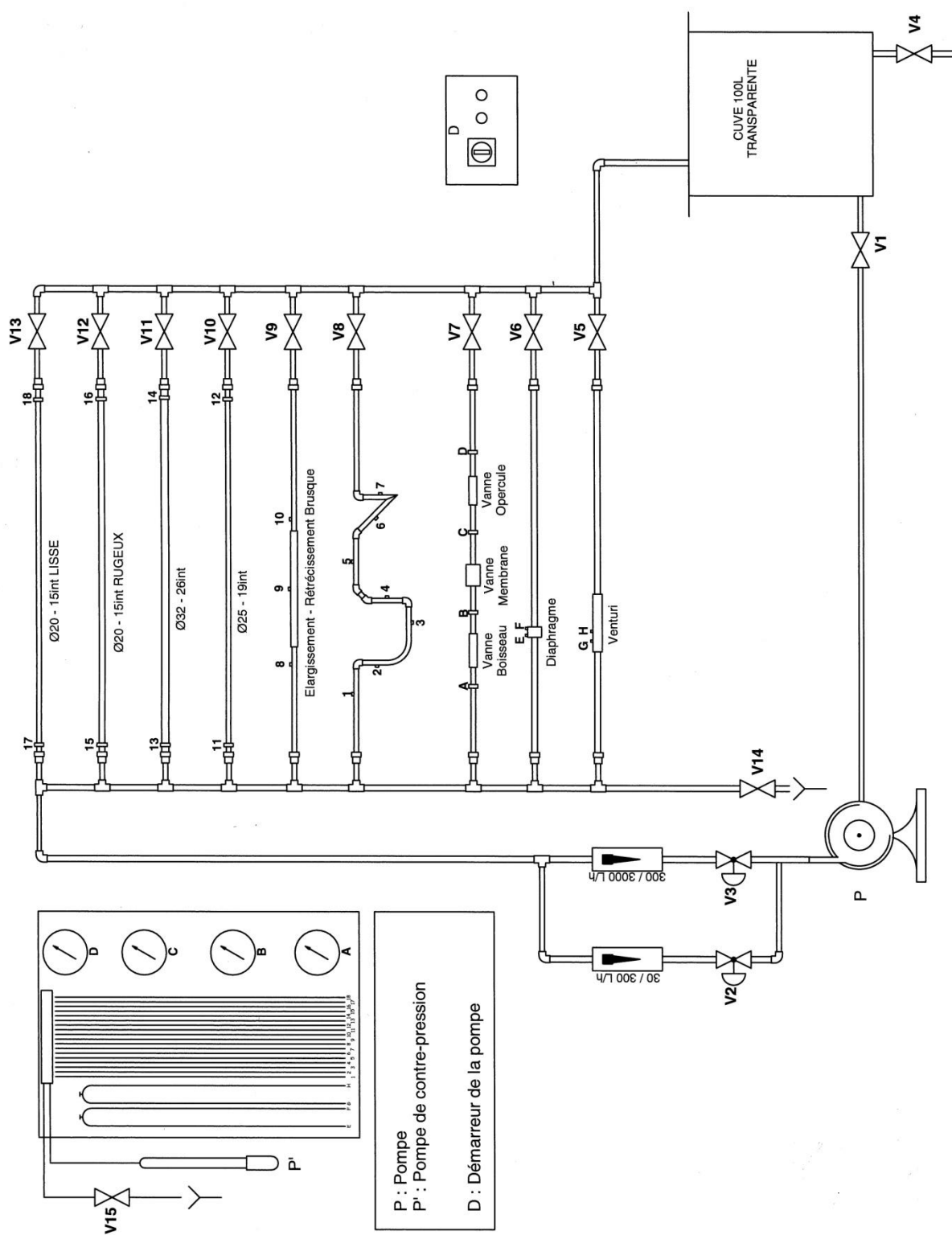
- des pertes de charge régulières : conduites de diamètres différents, de rugosités différentes,
- des pertes de charges singulières : des coudes, des vannes et des organes déprimogènes.

Trois systèmes de mesure sont mis en application sur ce banc :

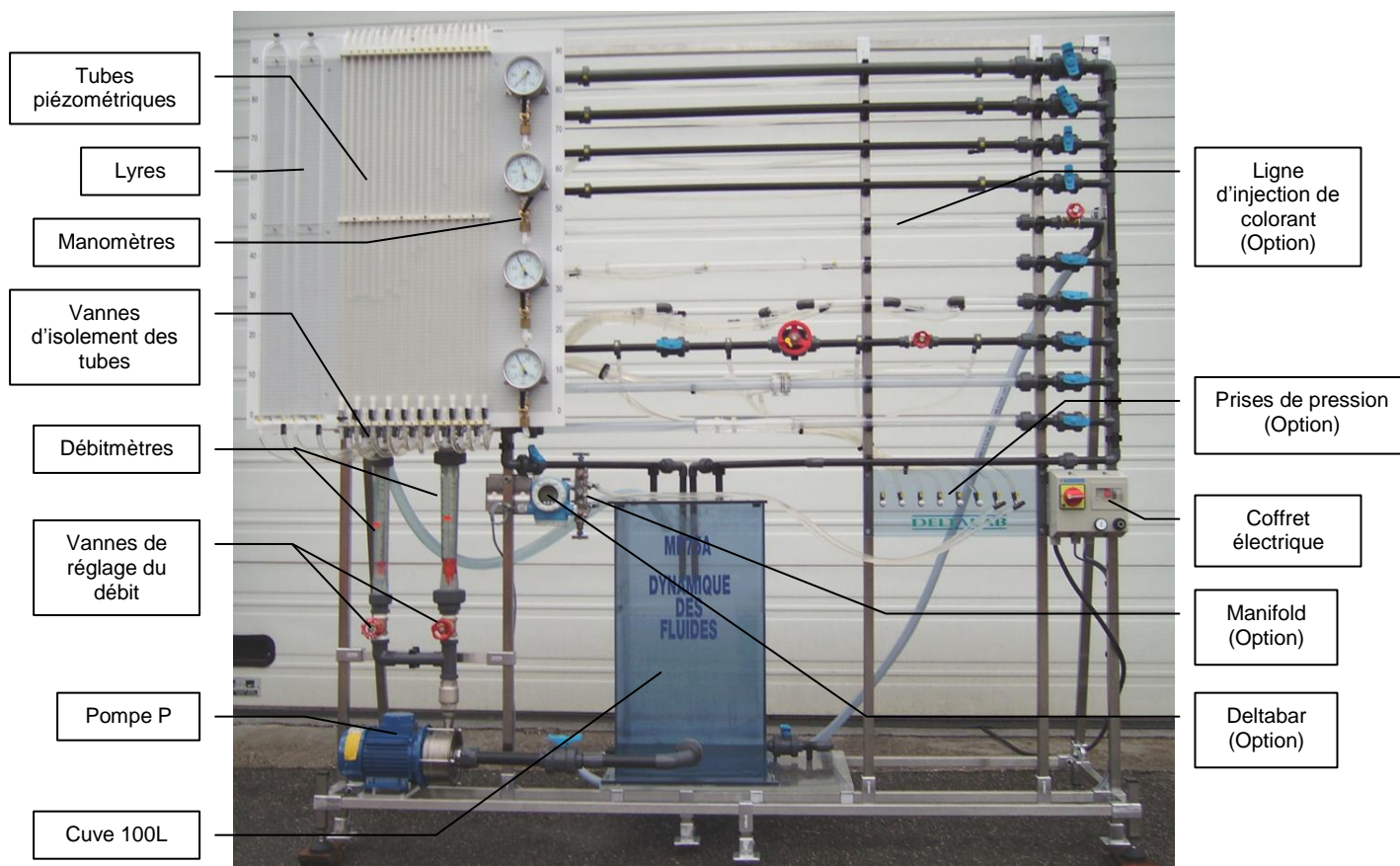
- Des tubes piézométriques : des prises de pression installées au niveau des éléments sont directement reliées aux tubes piézométriques avec un petit robinet d'isolement pour chaque ligne. La perte de charge est lue directement en hauteur de colonne d'eau grâce au panneau millimétrique placé derrière les tubes. Un système de contre-pression dans les tubes piézo permet de travailler avec des débits plus importants et donc avec des pertes de charges plus importantes.
- Deux lyres : la perte de charge est lue directement en hauteur de colonne d'eau, grâce au panneau millimétrique placé derrière les tubes. Elles seront utilisées pour mesurer les pertes de charge au niveau des organes déprimogènes.
- Des manomètres : la pression est directement lue en bar. Ces manomètres sont utilisés pour mesurer la perte de charge au niveau des différentes vannes.

## 1.1 SCHEMA ET CARACTERISTIQUES

### 1.1.1 Schéma de l'installation



### 1.1.2 Description de l'installation



*Photo non contractuelle*

### 1.1.3 Nomenclature

V1	Vanne d'isolement de la cuve
V2	Vanne à opercule de réglage des faibles débits
V3	Vanne à opercule de réglage des forts débits
V4	Vanne de vidange de la cuve
V5 à V13	Vannes d'isolement des lignes d'étude
V14	Vanne de vidange de l'installation
V15	Vanne d'isolement du système de contre pression

P	Pompe d'alimentation
P'	Pompe de contre pression

D Coffret électrique

Cuve en PVC de 100L

2 débitmètres (30-300 L/h et 300-3000 L/h)

Panneau avec tubes piézométriques, lyres et manomètres pour mesure des faibles pertes de charge

### 1.1.4 Caractéristiques

Le tableau suivant présente les différents items de l'installation : leurs caractéristiques ainsi que les points de piquage.

Nature du tube	Diamètre (mm)	Longueur entre piquages (mm)	Numéro de piquages
Venturi	$d_1=21, d_2=12$		G-H
Diaphragme	$d_3=21, d_4=12$		E-F
Vanne à opercule	DN15-di=20		C-D
Vanne à membrane	DN15-di=20		B-C
Vanne à boisseau	DN15-di=20		A-B
Coude à 90° petit rayon	di=14-de=20		1-2
Coude à 90° grand rayon	di=14-de=20		2-3
Coude à 90° petit rayon	di=14-de=20		3-4
2 coudes à 45°	di=14-de=20		4-5
Coude à 45°	di=14-de=20		5-6
Coude aigu à 135°	di=14-de=20		6-7
Elargissement brusque	di=14-de=20 à di=20-de=34		8-9
Rétrécissement brusque	di=20-de=34 à di=14-de=20		9-10
Tube en Altuglas lisse Ø25	di=19-de=25	1000	11-12
Tube en Altuglas lisse Ø32	di=26-de=32	1000	13-14
Tube en PVC rugueux Ø20	di=15-de=20	1000	15-16
Tube en PVC lisse Ø20	di=15-de=20	1000	17-18

## 1.2 INSTALLATION ET MISE EN SERVICE

### AVERTISSEMENT :

Le banc étant réalisé en PVC et Altuglas, il est recommandé de ne pas le placer à proximité d'une source de lumière solaire.

Il est également recommandé de maintenir une température minimum de 10°C dans le local où il est stocké afin de ne pas dégrader les propriétés de résistance des matériaux, d'éviter les risques de chocs thermiques ou de gel d'eau dans les canalisations et la pompe.

Lors des déplacements, le banc sera entièrement vidé et les raccords seront desserrés afin de laisser de la flexibilité à l'installation.

D'un poids de 70kg environ, l'appareil sera déplacé à l'aide d'un engin de manutention type transpalette. Les fourches seront placées sous le châssis inférieur, au centre dans le sens de la grande largeur. En cas d'utilisation de planches à roulettes, elles seront placées en bout de l'appareil, sous le châssis.

Le banc, possédant sa propre cuve d'alimentation de 100L, travaille en circuit fermé.

Néanmoins, dans le cadre de l'étude des régimes d'écoulement, il faut le placer près d'un point d'évacuation des eaux usées et à proximité d'un point d'arrivée d'eau. Il faut également le placer à proximité d'une alimentation électrique monophasée 230V - 50Hz.

Placer le banc sur un sol plat et régler l'horizontalité à l'aide des pieds ainsi que d'un niveau. Lorsque l'horizontalité est faite, bloquer correctement les points d'appui et notamment les pieds sous la cuve qui, lorsqu'elle sera remplie, risque de faire courber le banc.

S'assurer que la vanne de vidange de la cuve V4 est fermée et que le tuyau de vidange a bien été fixé sur l'embout cannelé et a été emmené jusqu'au point d'évacuation. Amener un tuyau d'arrivée d'eau dans la cuve et la remplir aux 9/10<sup>ème</sup>.



Fermer toutes les vannes sauf V1, V3 et V16.

Brancher le cordon d'alimentation à la prise 230V.

**ATTENTION**

Le pilote doit être raccordé sous la dépendance d'un dispositif différentiel de haute sensibilité 30 mA dont son bon fonctionnement doit être vérifié périodiquement.

**ATTENTION :**

La pompe ne doit tourner que lorsqu'elle est alimentée en eau. Faire les essais uniquement avec de l'eau dans la cuve et un circuit de circulation ouvert.

## 1.3 UTILISATION

D'une manière générale, pour utiliser le banc, mettre le coffret électrique sous tension. Créer un circuit en ouvrant V1 et la vanne d'isolement de la ligne à étudier. Les autres vannes d'isolement, V14 et V4 sont fermées. La vanne du débitmètre non utilisé sera fermée également et la vanne du débitmètre utilisée sera plus ou moins ouverte pour régler le débit.

Mettre en route la pompe et suivre l'évolution de la différence de pression grâce aux éléments de mesure associés à cette ligne (voir leur mode d'emploi ci-dessous).

**ATTENTION :**

Vérifier que l'eau peut circuler dans le circuit créé. La pompe ne doit pas fonctionner à vide ou si le circuit est bloqué. Dans un tel cas, la pompe ainsi que la tuyauterie pourraient être endommagées.

### 1.3.1 Utilisation du banc pour la mesure des pertes de charge

#### a) Utilisation de la lyre

La lyre permet de lire les pertes de charge sur les lignes G-H (Venturi) et E-F (Diaphragme). Dans cette configuration, on peut utiliser les deux débitmètres sachant que la lecture de la perte de charge sera limitée par la taille de la lyre et du panneau millimétré. Il faudra donc travailler sur une faible plage de débit.

Fermer les vannes de toutes les lignes excepté celle de la ligne à étudier. Ouvrir la vanne en pied de lyre (qui évite la circulation de fluide durant la mesure avec le Deltabar).

Mettre en route la pompe et laisser circuler un fort débit afin de chasser toutes les bulles d'air du circuit (ligne + lyre).

Baisser le débit aux alentours de 300-500 L/h puis ouvrir la purge en haut de lyre pour mettre le système à la pression atmosphérique et pour permettre aux ménisques de revenir au centre du panneau millimétré. Refermer alors la purge.

Fixer les débits dans la plage possible d'utilisation du panneau et lire les  $\Delta P$  directement en colonne d'eau.

#### b) Utilisation des manomètres

Les manomètres permettent de lire la perte de charge dans la ligne des vannes A-B-C-D. Nous utiliserons les 2 débitmètres.

Fermer les vannes de toutes les lignes excepté celle de la ligne à étudier.

Mettre en route la pompe et évacuer l'air présent dans la canalisation à étudier (faire varier le débit). Evacuer l'air dans la ligne de prise de pression en ouvrant les robinets de purge des manomètres.

Lire les pressions en bar et calculer la  $\Delta P$ .

### c) Utilisation des tubes piézométriques

Les tubes piézo permettent de lire la perte de charge dans toutes les autres lignes. Nous utiliserons les 2 débitmètres selon les lignes.

Fermer les vannes de toutes les lignes excepté celle de la ligne à étudier.

Mettre en route la pompe et évacuer l'air présent dans la canalisation à étudier (faire varier le débit) ainsi que dans les tubes piézo. Pour cela ouvrir la vanne de la clarinette V15 et les robinets des tubes correspondants à la ligne.

Il est conseillé de procéder à la purge des tubes piézo juste avant de faire les manipulations et de ne pas arrêter la pompe afin de ne pas risquer de réintroduire de l'air dans les canalisations ainsi que dans les tubes de prises de pression.

Donc procéder à la purge puis diminuer le débit ( $< 700 \text{ L/h}$ ) et surveiller attentivement le niveau dans les tubes piézo. Lorsque le ménisque est au milieu du panneau manométrique, fermer le petit robinet du tube. Faire attention à ce que les niveaux restent dans la hauteur du panneau car s'ils sortent, la manipulation de purge est à recommencer.

Pour commencer les mesures, fixer un débit assez faible ( $400 \text{ L/h}$  par exemple) et ouvrir précautionneusement les tubes piézo correspondant à l'élément à étudier. Faire attention à ce que les niveaux restent dans la hauteur du panneau car s'ils sortent, toute la manipulation de purge est à recommencer.

Laisser les niveaux se stabiliser puis fermer simultanément les deux robinets et lire les hauteurs de chaque niveau pour connaître alors la perte de charge. Rouvrir les robinets et augmenter le débit.

Lorsque la perte de charge est trop importante, fermer la vanne de contre-pression V15 et grâce à P', créer une surpression dans le système afin de faire stabiliser les niveaux dans le panneau pour pouvoir lire les deux niveaux.

#### **ATTENTION :**

**Ne pas créer une surpression exagérée à l'aide de P' dans le système piézo. Quelques coups de pompe suffisent.**

Lorsque la différence de hauteur atteint la hauteur du panneau, fermer les robinets puis ouvrir V15 afin de faire redescendre la pression dans le système. Fermer la vanne de la ligne étudier et passer à l'étude d'une autre ligne en n'oubliant pas de démarrer la nouvelle étude avec un faible débit.

## **1.4 MAINTENANCE ET SECURITE**

### **1.4.1 Ergonomie du poste**

Le poste sera installé dans une salle adaptée (laboratoire, hall technique, ...) normalement ventilé. Il se pose directement sur un sol horizontal. Le pilote sera situé près d'une alimentation électrique monophasée 230V et d'une évacuation des eaux usées.

L'éclairage nécessaire dans le local d'utilisation est de 500 Lux minimum.

Aucune disposition particulière n'est à prendre concernant le bruit émis par l'appareil, celui-ci restant inférieur à 70 dB.

L'utilisateur travaille principalement sur la face avant de l'appareil. Il sera amené à travailler à l'arrière afin vidanger les cuves. Il interviendra sur le côté gauche de l'installation afin de manipuler la pompe de contre-pression.

L'utilisateur intervient en position debout face à l'appareil pour la plus grande partie de la manipulation. Il est amené à s'accroupir lors de la manipulation des vannes en position basse et de la lecture du débitmètre.

L'utilisateur peut s'asseoir devant le poste afin de noter les valeurs mesurées et effectuer les calculs. Un travail en binôme est conseillé afin qu'une personne reste en permanence devant l'installation en fonctionnement pour suivre le bon déroulement des opérations ainsi que pour la manipulation. Il est plus aisé qu'une personne règle le débitmètre pendant que la deuxième lit les valeurs ou actionne les vannes et la pompe de contre-pression. Néanmoins, ce poste peut être manipulé par une personne seule.

Le remplissage de la cuve s'effectuera si possible avec un tuyau afin d'éviter de porter de lourdes charges.

### **1.4.2 Maintenance et entretien**

Il n'est pas nécessaire de vidanger l'installation en fin de chaque séance. Néanmoins il est conseillé de la vidanger en fin de semaine afin de soulager les tuyauteries en PVC et afin de changer l'eau périodiquement de façon à ce que les algues ne se développent pas. Notamment en été.

A la fin de chaque séance de TP, le sectionneur général sera remis en position 0. Selon les conditions de fermeture de la salle, il est conseillé de cadenasser le sectionneur de façon à ce que personne n'utilise l'installation hors présence d'un responsable.

Pour un arrêt prolongé, vidanger les cuves et les canalisations. Desserrer les raccords unions des canalisations afin de laisser de la souplesse pour la dilatation des matériaux. Mettre hors tension le banc et cadenasser le sectionneur général. Fermer le coffret à clef (clef conservée par le responsable désigné de l'installation).

Vérifier l'étanchéité des raccords unions régulièrement et changer les joints lorsque ceux ci deviennent défectueux.

Procédure de vidange :

- raccorder un tuyau souple à la vanne de vidange V6 située en bas de la cuve et à un orifice de vidange de la salle.
- ouvrir toutes les vannes du circuit.
- ouvrir la vanne de vidange V6.
- refermer la vanne de vidange V6 avant stockage de l'appareil.

Si l'installation vient à se couvrir d'algues, il est possible de faire une solution très diluée d'eau de Javel (1% en volume) dans la cuve et de la faire circuler dans les tuyauteries.

**ATTENTION :**

**Procéder à un rinçage abondant de toutes les canalisations afin de nettoyer entièrement les traces de Javel qui sont susceptibles de tacher irrémédiablement les canalisations transparentes.**

En cas de panne, contacter le Service Après Vente de DELTALAB aux coordonnées suivantes :

Service Après Vente  
335 boulevard Gay Lussac  
11000 CARCASSONNE  
Tél : 04 68 24 50 70  
Fax : 04 68 47 51 06

### **1.4.3 Sécurité**

#### **1. Sécurité électrique**

**Il est interdit d'intervenir dans le coffret électrique lorsque l'installation est sous tension.** Cette intervention ne sera réalisée que par une personne habilitée. De plus toute intervention est aux risques de la personne responsable de l'installation. Toute intervention sur le coffret sera susceptible d'annuler la garantie DELTALAB.

#### **2. Consignation hors énergie**

La procédure de consignation hors énergie devra se faire uniquement par le consignateur. Cette personne sera désignée par le chef d'établissement.

Couper l'interrupteur général et le cadenasser.

Vidanger toute l'installation. Les tuyaux de vidange peuvent être laissés. Si l'utilisateur a placé un tuyau d'arrivée d'eau dans la cuve, retirer ce tuyau.

#### **3. Sécurité des utilisateurs**

**Les utilisateurs ne devront pas intervenir sur les éléments électriques.**

Si des produits chimiques sont utilisés (eau de Javel), les précautions classiques sont à prendre (gants, tenue et lunettes de protection).

#### **4. Contre-indications**

**ATTENTION :**

**Aucun produit chimique ou colorant concentré ne devra être introduit dans l'installation sous peine d'endommager les tuyauteries, la pompe et les sondes.**

**Le banc ne devra pas être conservé au soleil ou à la chaleur** sous peine de voir les tuyauteries se détériorer rapidement (décoloration ou opacification, flambement, dégradation de la matière pouvant entraîner des fuites...)

Cette installation ne doit être utilisée que pour effectuer les manipulations pour lesquelles elle a été créée.

## 2 DOSSIER THEORIQUE

### 2.1 GENERALITES

#### 2.1.1 Définition du fluide.

Un fluide peut être considéré comme étant formé d'un grand nombre de particules matérielles, très petites et libres de se déplacer les unes par rapport aux autres. Un fluide est donc un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité et qui peut s'écouler. Parmi les fluides il est classique de faire la distinction entre les liquides et les gaz.

#### 2.1.2 Liquides et gaz.

Liquides et gaz, habituellement étudiés, sont isotropes, mobiles et visqueux. La propriété physique qui permet de faire la différence entre les deux est la compressibilité. Décrivons chacune de ces propriétés :

- **l'isotropie** assure que les propriétés sont identiques dans toutes les directions de l'étude,
- **la mobilité** fait qu'ils n'ont pas de forme propre et qu'ils prennent la forme du récipient qui les contient,
- **la viscosité** caractérise le fait que tout changement de forme s'accompagne (fluide réel) ou non (fluide parfait) d'une résistance,
- **la compressibilité** d'un liquide est pratiquement nulle, du moins dans les domaines de pression et de températures habituels. Donc, pour un liquide, le principe de conservation de la masse, peut être transformé en principe de conservation du volume.

#### 2.1.3 Force de volume et forces de surface.

Comme pour tout problème de mécanique, la résolution d'un problème de mécanique des fluides passe par la définition d'un système matériel S, particules fluides à l'intérieur d'une surface fermée limitant S. A ce système S seront appliqués les principes et théorèmes généraux de mécanique et thermodynamique :

- principe de conservation de la masse,
- principe fondamental de la dynamique,
- principe de conservation de l'énergie.

##### 1. Forces intérieures

A l'intérieur de S, les particules fluides exercent les unes sur les autres des forces, dites forces intérieures, qui forment, en vertu du théorème des actions mutuelles, un torseur nul.

##### 2. Forces extérieures

Les particules fluides, extérieures à S, exercent sur les particules composant le système S des forces extérieures. Ces forces sont appelées forces de surface car elles sont supposées agir uniquement sur les particules composant la surface limitant S. Elles sont donc proportionnelles aux surfaces sur lesquelles elles s'appliquent.

Les particules fluides, composant S, sont sollicitées également par des forces agissant à distance et qui sont donc proportionnelles aux volumes. Ces forces de volume proviennent du champ des forces de pesanteur, des forces magnétiques et des forces électriques.

### 2.1.4 Equation fondamentale de l'hydrostatique

Dans le cas de l'hydrostatique, la masse volumique  $\rho$  et la température  $T$  sont constantes dans tout le fluide. De plus les forces extérieures à distance se réduisent aux seules forces de pesanteur, qui dérivent d'un potentiel. Il est alors possible de démontrer que :

$$p + \rho gh = cste = p_g$$

La quantité  $(p + \rho gh)$  est appelée  $p^*$ , pression étoilée ou  $p_g$ , pression motrice. En hydrostatique, la pression motrice  $p_g$  est constante et peut être calculée sur la surface libre éventuelle du fluide. Les conséquences sont nombreuses et importantes :

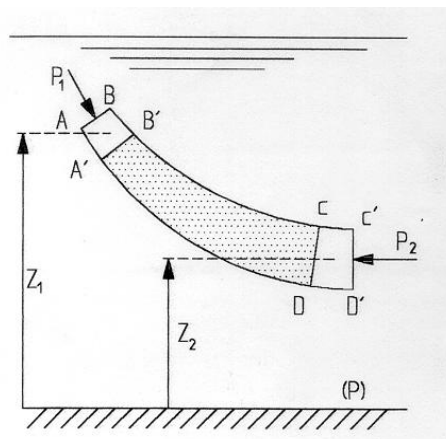
- les surfaces isobares dans un fluide homogène soumis à la pesanteur sont des plans, car  $p = cste$  entraîne  $h = cste$ ,
- la surface de séparation de deux fluides de densité différente et non miscibles est un plan horizontal,
- la différence de pression entre deux points quelconques A et B, pris à l'intérieur du fluide, ne dépend que de la distance verticale entre les deux points,
- les variations de pression se transmettent en totalité, c'est le principe de Pascal.

### 2.1.5 Interprétation énergétique de la loi fondamentale de l'hydrostatique

L'équation fondamentale de l'hydrostatique peut être obtenue en appliquant le principe de conservation de l'énergie, car les seules énergies qui interviennent sont purement potentielles. La pression motrice  $p_g$  représente l'énergie mécanique de l'unité de volume de fluide incompressible en équilibre. Cette énergie est la somme de deux énergies potentielles, l'une de pression, l'autre due à la pesanteur. Soit un fluide incompressible en équilibre dans le champ de pesanteur et soit ABCD un filet se déplaçant à une vitesse infiniment petite vers la position A'B'C'D'. Au cours de ce déplacement infiniment lent, le travail des forces de frottement est nul. Chaque position du filet ABCD étant une position d'équilibre, la somme des travaux effectués est nulle. Le travail des forces de pesanteur se résume au travail produit pour déplacer la masse  $\rho dv$  de la cote  $Z_1$ , à la cote  $Z_2$ ,  $dv$  étant le volume de l'élément ABB'A' ou de l'élément DCC'D' et il a pour expression :

$$dJ_1 = \rho g d\omega (h_1 - h_2)$$

avec  $\rho$  : masse volumique ( $\text{kg.m}^{-3}$ )  
 $\omega = \rho g$  : poids volumique ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-2}$ )



**Le travail des forces de pression est donné par l'expression suivante :**

$$dJ_2 = P_1 d\omega - P_2 d\omega = (P_1 - P_2) d\omega$$

**Donc**  $dJ_1 + dJ_2 = 0$  et  $\rho g(h_1 - h_2) d\omega + (P_1 - P_2) d\omega = 0$

Le calcul statique et le calcul énergétique conduisent au même résultat car les énergies considérées sont purement mécaniques et potentielles.

$$P_1 + \rho g h_1 = P_2 + \rho g h_2 = cste$$

## 2.1.6 Mesure d'une pression

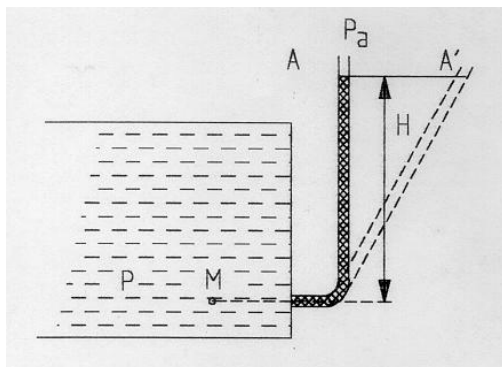
### 1. Unité de pression

L'unité de pression du système SI est le Pascal (Pa) ou  $N.m^{-2}$ . Toutefois, les unités de pression employées sont très variées et dépendent des domaines où elles sont utilisées. Il faudra n'utiliser, dans les formules, que des unités cohérentes, et en pratique, remplacer des pressions données en hauteur de liquide par des expressions telles que  $\rho g h$  ou  $\omega h$ . La pression absolue est toujours positive.

### 2. Pression absolue, pression effective.

Il est habituel de choisir la pression atmosphérique comme origine des pressions. La pression correspondante est la pression effective ou relative:  $P_e = P - P_a$ . La pression effective peut être positive ou négative. La grande majorité des manomètres sont gradués en pression effective.

### 3. Mesure d'une pression par une colonne de liquide.



Soit M un point d'un liquide en équilibre.

A la cote de M, un piquage est effectué, sur lequel est relié un tube dont la seconde extrémité débouche à l'air libre.

Le niveau de liquide atteint le point A de cote H.

Appelons  $P_M$  la pression en M et  $P_a$  la pression atmosphérique alors:

$$P_M - P_a = \omega H \text{ soit } \frac{P_M - P_a}{\omega} = H$$

La différence de pression entre le point M et l'atmosphère est donnée par H, exprimée en hauteur de liquide de poids volumique  $\omega$ . Le niveau atteint par le liquide est le niveau piézométrique et il est indépendant de l'inclinaison du tube par rapport à la verticale. Le tube transparent permettant la lecture du niveau piézométrique s'appelle tube piézométrique.

#### 4. Notion de pression dans une conduite.

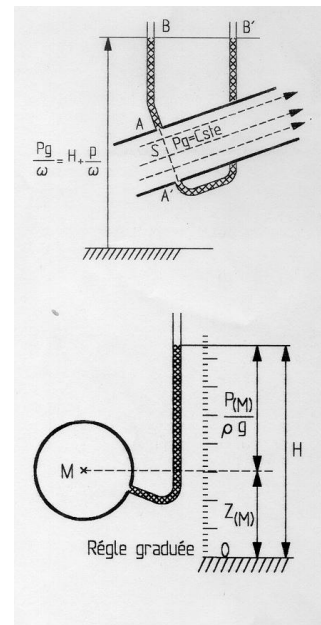
La conduite peut être assimilée à un filet de courant (voir définitions au paragraphe suivant) et la vitesse est la même dans toute la section droite. Lorsque la conduite est cylindrique, notamment, les lignes de courant sont parallèles aux génératrices et la répartition des pressions est hydrostatique dans une section droite. Donc :

$$P + \rho gh = cste$$

Si l'on branche une série de tubes piézométriques dans la section droite, tous les niveaux piézométriques sont identiques. Ils mesurent, par rapport au plan de référence, la quantité

$$H = Z + \frac{P}{\rho g}$$

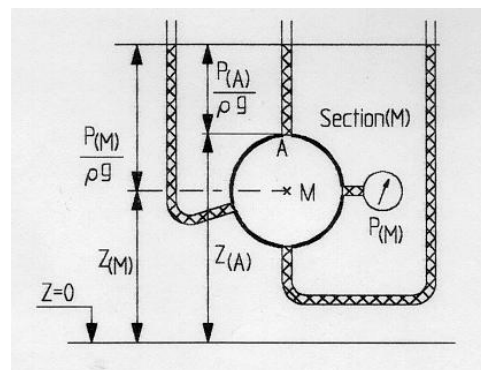
qui ne dépend pas de la position de la prise de pression dans la section droite.



En effet, en A, la hauteur Z est la même pour le tube piézométrique et la conduite, et il est raisonnable de penser que la pression P ne subit pas de discontinuité lorsque l'on passe de la conduite au tube piézométrique. En conclusion, la lecture d'un piézomètre, relié à une prise de pression, fournit une valeur de la pression motrice

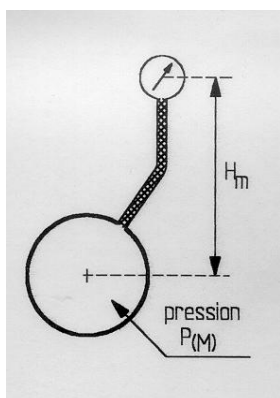
$$H = Z_M + \frac{P_M}{\rho g}$$

exprimée en hauteur de colonne de liquide de masse volumique  $\rho$ .



L'origine de la règle graduée détermine le plan horizontal de référence et la mesure fournit une valeur de pression effective, puisque le tube est ouvert à l'atmosphère.

#### 5. Mesure d'une pression par un manomètre.



Si, au lieu d'utiliser des tubes piézométriques, la mesure de pression est faite au moyen d'un manomètre à cadran, la pression indiquée sera:

$$P = P_M - \rho g H_M$$

$P_M$  désignant la pression moyenne dans la section de la conduite. Une mesure précise de  $P_M$  nécessite, de ce fait, une correction d'altitude.

Les tubes piézométriques sont donc utilisés lorsque l'on veut mesurer des différences de pression, celles-ci restant faibles (longueur des tubes), pour un coût modeste. Les manomètres fournissent, quant à eux, une mesure de la pression effective.

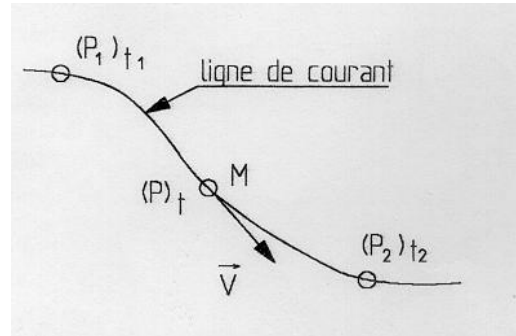


## 2.2 EQUATION DE CONTINUITE

Les caractéristiques décrites ci-dessous concernent les liquides incompressibles, en écoulement permanent.

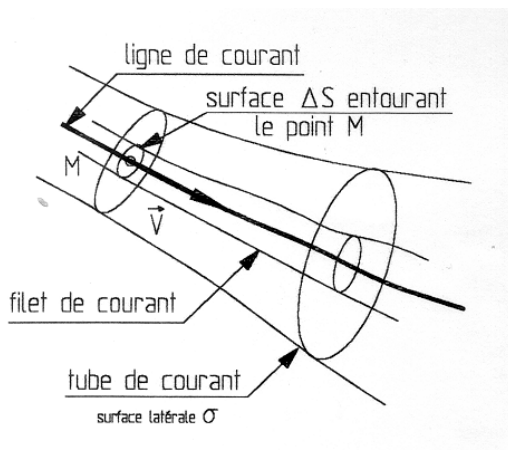
### 2.2.1 Ligne de courant.

Une ligne de courant est la trajectoire d'une particule fluide dans un écoulement permanent. La vitesse au point M de l'écoulement est alors égale à la vitesse de la particule lorsqu'elle passe en M. Lorsque l'écoulement n'est pas permanent, ligne de courant et trajectoire ne sont pas confondus.



### 2.2.2 Filet de courant.

Considérons autour du point M une surface élémentaire  $\Delta S$  perpendiculaire à la direction du vecteur vitesse  $V$  de M. L'ensemble des lignes de courant traversant  $\Delta S$  constitue un filet de courant.



### 2.2.3 Tube de courant.

Considérons, maintenant, un ensemble de filets de courant traversant une section droite  $S$  autour de M, nous définissons alors un tube de courant, limité par une surface latérale  $\sigma$  s'appuyant sur le contour de  $S$  et constitué par une infinité de lignes de courant. Le filet de courant est la limite vers laquelle tend le tube de courant lorsque  $S$  tend vers 0.

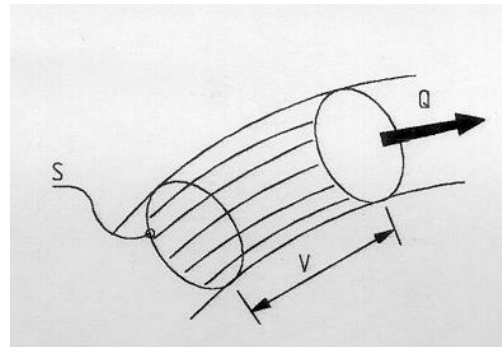
La surface latérale peut être matérialisée par la paroi solide d'une canalisation cylindrique.

### 2.2.4 Débit en volume.

Soit un tube de courant de section transversale constante, le débit volumique d'écoulement à travers le tube de courant est la quantité de liquide, en volume, qui traverse l'une quelconque des sections de ce tube de courant pendant l'unité de temps. Cette grandeur, notée  $Q$ , s'exprime en  $m^3.s^{-1}$ . Cette quantité de liquide occupe 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 fluide, traversant  $S$ . Il en résulte que :  $Q = V.S$

Cette relation implique toutefois que toutes les particules fluides traversant la section  $S$  du tube de courant ont même vitesse  $V$ . Le profil des vitesses, à travers la section  $S$ , est dit uniforme.

Cependant, la relation précédente se généralise pour un profil des vitesses non uniforme ( cas d'écoulement de liquide visqueux ), en considérant que  $V$  est une vitesse moyenne d'écoulement en  $m.s^{-1}$ . Cette vitesse, aussi appelée vitesse débitante, peut être calculée en divisant le débit moyen par la section de la conduite.



### 2.2.5 Equation de continuité

Si la section transversale  $S$  varie le long du tube de courant, il est possible d'écrire:

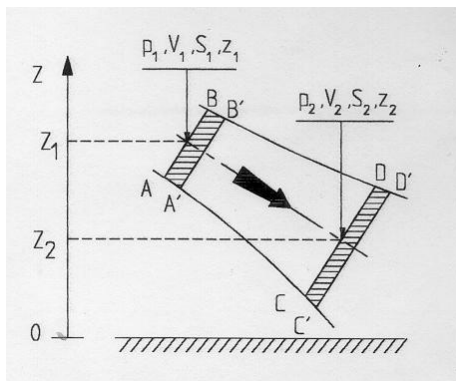
$$Q = S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2$$

$V_1$  désignant la vitesse d'écoulement dans la section  $S_1$

$V_2$  désignant la vitesse d'écoulement dans la section  $S_2$

En effet, pour un écoulement permanent d'un liquide incompressible, le débit d'écoulement est constant. La quantité de liquide traversant la section  $S_1$  pendant un intervalle de temps unitaire est donc égale à la quantité de liquide traversant la section  $S_2$  pendant le même intervalle de temps.

## 2.3 THEOREME DE BERNOULLI



Ce théorème résulte de l'application du théorème de l'énergie cinétique à un système liquide en écoulement permanent. Le liquide est supposé incompressible et non visqueux.

Considérons à un instant donné une portion de tube de courant ABCD.

Soient  $P_1$  et  $V_1$  la pression et la vitesse du liquide dans la section AB de surface  $S_1$  et de cote moyenne  $Z_1$ .

Soient  $P_2$ , et  $V_2$  la pression et la vitesse du liquide dans la section CD de surface  $S_2$  et de cote moyenne  $Z_2$ .

Les altitudes sont repérées par rapport à un plan de référence, horizontal. Il a été démontré, en hydrostatique, que dans un liquide en équilibre :  $P + \rho g Z = cste$ .

Par contre, pour un liquide en mouvement, cette relation devient :

$$P + \rho g Z + \rho \frac{V^2}{2} = cste \quad \text{ou encore} \quad \frac{P}{\rho g} + Z + \frac{V^2}{2g} = cste$$

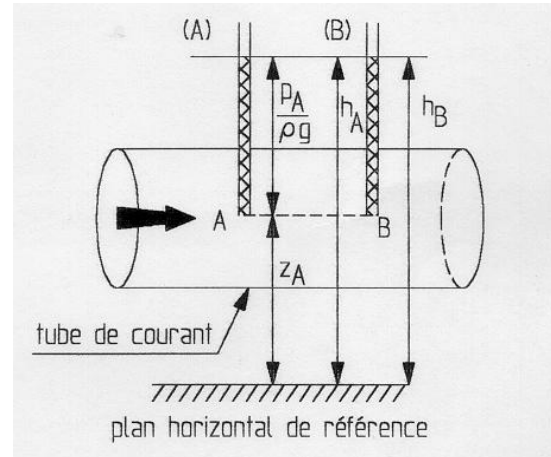
La quantité  $\frac{\rho V^2}{2}$  appelée pression dynamique, a la

dimension d'une pression et par suite  $\frac{V^2}{2g}$  a la

dimension d'une hauteur de colonne de liquide. Afin d'éviter toute confusion, P est appelé pression statique.

Pour justifier l'appellation de ces différents termes de pression, considérons une ligne de courant AB d'un tube de courant de section constante.

En A et B sont disposés deux prises de pression orientées perpendiculairement au sens de l'écoulement et reliées à deux tubes piézométriques (A) et (B).



Ces piézomètres permettent de mesurer la pression  $P_A$  en A et  $P_B$  en B, exprimées en hauteur de colonne de liquide par rapport à la pression atmosphérique.

En effet, la hauteur de liquide  $H_A$ , dans le piézomètre (A) par exemple, lue au moyen d'une échelle graduée par rapport à un plan horizontal de référence, est telle que :

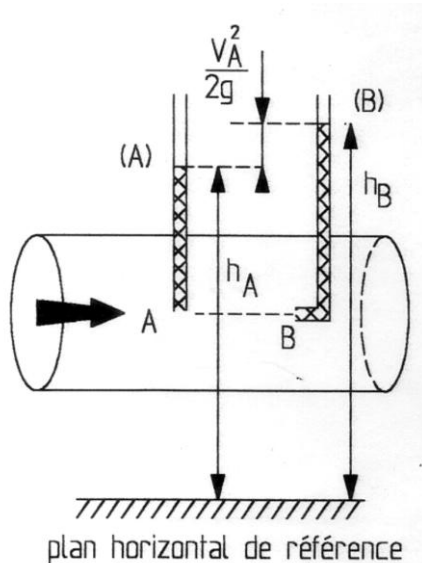
$$H_A = Z_A + \frac{P_A}{\rho g}$$

En appliquant le théorème de Bernoulli entre les points A et B, la relation suivante est obtenue :

$$\frac{P_A}{\rho g} + Z_A + \frac{V_A^2}{2g} = \frac{P_B}{\rho g} + Z_B + \frac{V_B^2}{2g}$$

Le tube de courant étant de section constante, la vitesse d'écoulement  $V_A$  est égale à la vitesse d'écoulement  $V_B$  en B. Par conséquent :

$$\frac{P_A}{\rho g} + Z_A = \frac{P_B}{\rho g} + Z_B \text{ soit } h_A = h_B$$



Orientons, à présent, la prise de pression en B, dans le sens de l'écoulement. L'application du théorème de Bernoulli à la ligne de courant AB permet d'écrire :

$$\frac{P_A}{\rho g} + Z_A + \frac{V_A^2}{2g} = \frac{P_B}{\rho g} + Z_B + \frac{V_B^2}{2g}$$

Dans ce cas il est observé que  $V_B = 0$ , car en B, (endroit de la prise de pression B) le courant s'arrête du fait que le liquide est au repos dans le tube piézométrique. En définitive:

$$h_A + \frac{V_A^2}{2g} = h_B$$

Donc lorsque la prise de pression est orientée dans le sens de l'écoulement, le piézomètre indique une surpression, dite surpression d'arrêt qui en terme de pression est égale à:

$$P_A + \rho g Z_A + \rho \frac{V_A^2}{2} = P_B + \rho g Z_B + \rho \frac{V_B^2}{2}$$

où  $V_B$  désigne la vitesse d'écoulement en B en l'absence du dispositif de prise de pression.

En conclusion, une prise de pression d'arrêt, placée en un point M d'un écoulement et orientée dans le sens de l'écoulement permet de mesurer une surpression d'arrêt égale à  $P_M + \rho g Z_M + \rho \frac{V_M^2}{2}$

L'excédent de pression sur la valeur de la pression statique mesurée en ce même point M au moyen d'une prise de pression statique orientée perpendiculairement au sens de l'écoulement est égal à  $\rho \frac{V_M^2}{2}$ .

Ce terme de pression est appelé pression dynamique. Dans un jet débouchant dans l'atmosphère, par exemple à la sortie d'un orifice ou d'une canalisation, la pression statique est égale à la pression atmosphérique. La prise de pression orientée dans le sens de l'écoulement d'un tel jet, effectuée par rapport à la pression atmosphérique, fournit directement la valeur de la pression dynamique, donc après calcul, la vitesse du jet.

## 2.4 PERTES DE CHARGE

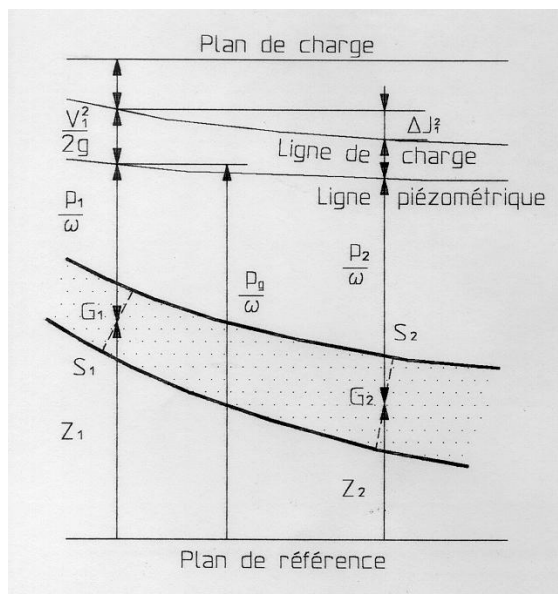
### 2.4.1 Fluides réels

Dans les fluides réels, un écoulement s'effectue avec frottement et alors les hypothèses permettant d'établir la formule de Bernoulli ne sont plus satisfaites, car il n'y a plus conservation de l'énergie mécanique. Les frottements font apparaître de l'énergie calorifique au détriment de l'énergie mécanique. La diminution de l'énergie mécanique, au cours du mouvement, est appelée **perte de charge**.

Dans le cas où ces pertes de charge sont petites, il est possible de les négliger et d'appliquer alors le théorème de Bernoulli afin d'apprécier les variations de vitesse et de pression au cours du mouvement.

Si ces pertes de charge ne sont plus négligeables, il est possible d'introduire d'autres relations théoriques ou expérimentales. Parmi ces relations, il en est une qui est analogue à la relation de Bernoulli et qui contient un terme qui représente, pour l'unité de masse de fluide, l'énergie mécanique transformée en chaleur par frottement.

### 2.4.2 Représentation graphique des écoulements.



Il est possible de donner une représentation graphique des écoulements.

Portons sur la verticale, à partir du centre de gravité  $G_1$  de la section  $S_1$ , une distance égale à

$$\frac{P_1}{\omega}$$

Le lieu de toutes les extrémités de ces segments s'appelle **ligne piézométrique**. La cote de chacun des points de cette ligne piézométrique au dessus du plan horizontal de référence est la pression

$$\text{motrice } \frac{P_g}{\omega} \text{ évaluée en hauteur de liquide.}$$

Portons sur la verticale au dessus de la ligne

$$\text{piézométrique la quantité } \frac{V_1^2}{2g}.$$

Le lieu de toutes les extrémités de ces segments représente la **ligne de charge**. En l'absence de pertes de charge, la ligne de charge est confondue avec le **plan de charge**. Ce plan de charge donne une représentation graphique de la constante tirée de l'équation de Bernoulli, pour l'écoulement permanent d'un fluide non visqueux et incompressible, de masse volumique  $\rho$ . La perte de charge totale depuis le début de l'écoulement, est égale à la distance entre la ligne de charge et le plan de charge, mesurée sur la verticale passant par le point  $G_1$ , centre de gravité de la conduite. Elle sera notée  $\Delta J_{0-1}$ .

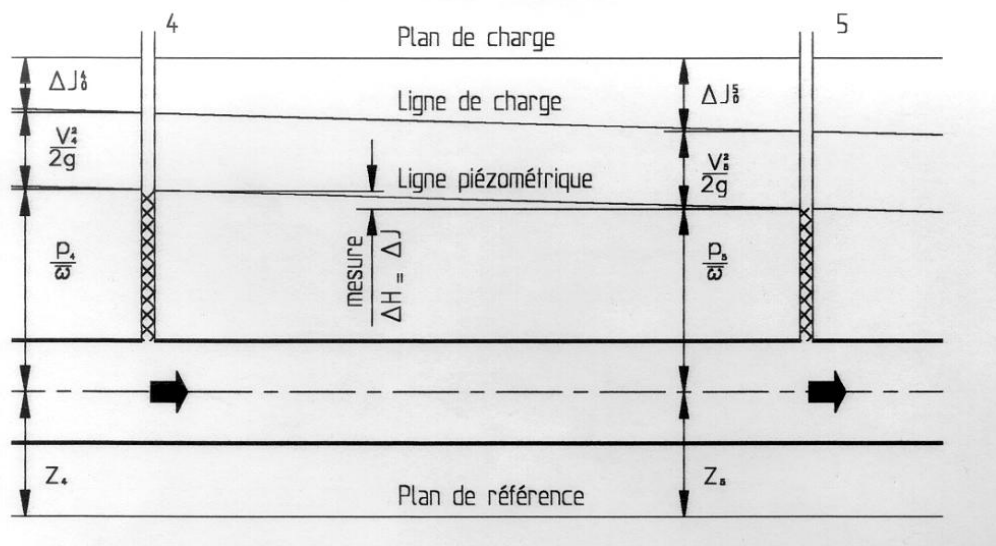
La perte de charge entre deux points  $G_1$  et  $G_2$  de l'écoulement est donnée par la différence de cote  $\Delta J_{1-2}$ , de la ligne de charge sur les verticales passant par les deux points précédents. Le plan de charge, horizontal, ne le reste que s'il n'y a pas d'appareils générateurs (pompes) ou consommateurs (turbines) d'énergie. Dans ce cas, le plan de charge subit des discontinuités de cote quand le fluide traverse ces appareils.

### 2.4.3 Pertes de charge régulières.

Les pertes de charge régulières, sont des pertes de charge réparties régulièrement le long des conduites. En chaque point d'un écoulement permanent, les caractéristiques de l'écoulement sont bien définies et ne dépendent pas du temps. La représentation graphique de l'écoulement prend l'allure ci-dessous. Il faut remarquer que, la vitesse étant constante, la ligne piézométrique et la ligne de charge sont parallèles. La variation de hauteur piézométrique, évaluée en hauteur de liquide est égale à la perte de charge régulière entre les deux points de mesure. La distance entre la ligne de charge et le plan de charge est égale à la perte de charge totale entre le point de mesure et le point de début de l'écoulement.

Les pertes de charge régulières sont proportionnelles à la longueur  $L$  de la conduite, inversement proportionnelles à son diamètre  $D$ , proportionnelles au carré de la vitesse débitante  $V$  du fluide et fonction de la rugosité moyenne  $R$  de la conduite. En hauteur de liquide, la perte de charge régulière s'écrit :

$$\Delta H = \Delta J_{1-2} = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{\lambda L V^2}{2 D g}$$



Le coefficient de perte de charge  $\lambda$  est obtenu au moyen de l'abaque ci-dessous ;  $P$  est en Pa ;  $L$  et  $D$  en m ;  $g$  en  $m.s^{-2}$  ;  $V$  en  $m.s^{-1}$  ;  $\lambda$  est un coefficient sans dimension qui dépend du nombre de Reynolds

$Re = \frac{VmD}{\nu}$  et de la rugosité relative  $R/D$ .

A titre d'exemple, la valeur de R pour le P.V.C. est de 0,01 mm.  
Les valeurs de quelques matériaux sont données en exemple au paragraphe 2.5.5.

Le coefficient de perte de charge  $\lambda$  dépend de lois empiriques différentes suivant le régime d'écoulement :

- En régime laminaire :  $\lambda = \frac{64}{Re}$  (la rugosité n'intervient pas)

- En régime turbulent : on distingue encore le cas des conduites lisses (la rugosité est très faible et n'intervient donc pas) et des conduites rugueuses.

- En régime turbulent lisse :

$$\lambda = 0,316 \cdot Re^{-0,25} \quad (\text{Relation de Blasius})$$

Cette relation donne de bons résultats pour  $Re < 100000$ .

Pour  $Re > 100000$  :

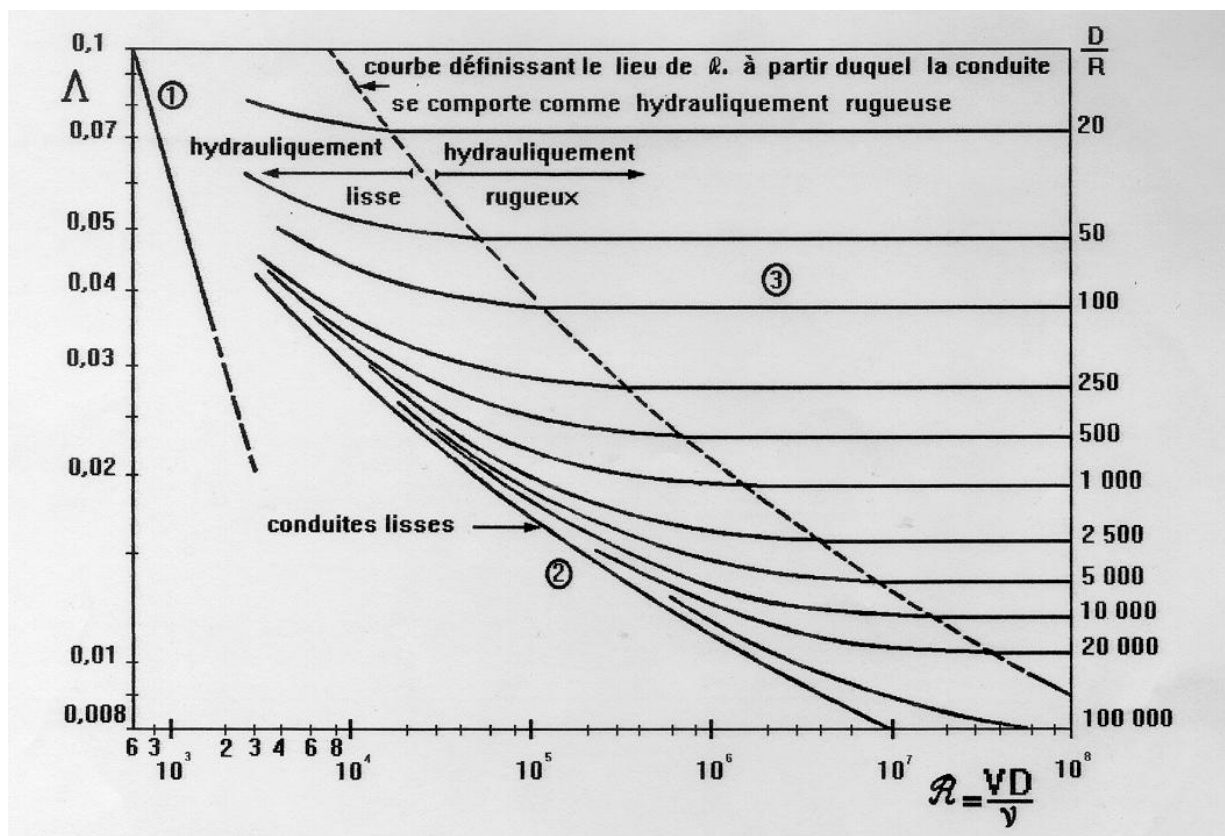
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log Re \frac{\sqrt{\lambda}}{2,51} \quad (\text{Relation de Karman})$$

- En régime turbulent rugueux :

$\lambda$  n'est plus fonction de  $Re$  (donc de la viscosité)

$$\frac{1}{\lambda} = 2 \log 3,71 \frac{D}{k} \quad (\text{Relation de Karman Prandtl})$$

Pour les conduites industrielles la formule la plus utilisée pour le calcul de  $\lambda$  est la formule de Colebrook (voir diagramme page suivante)



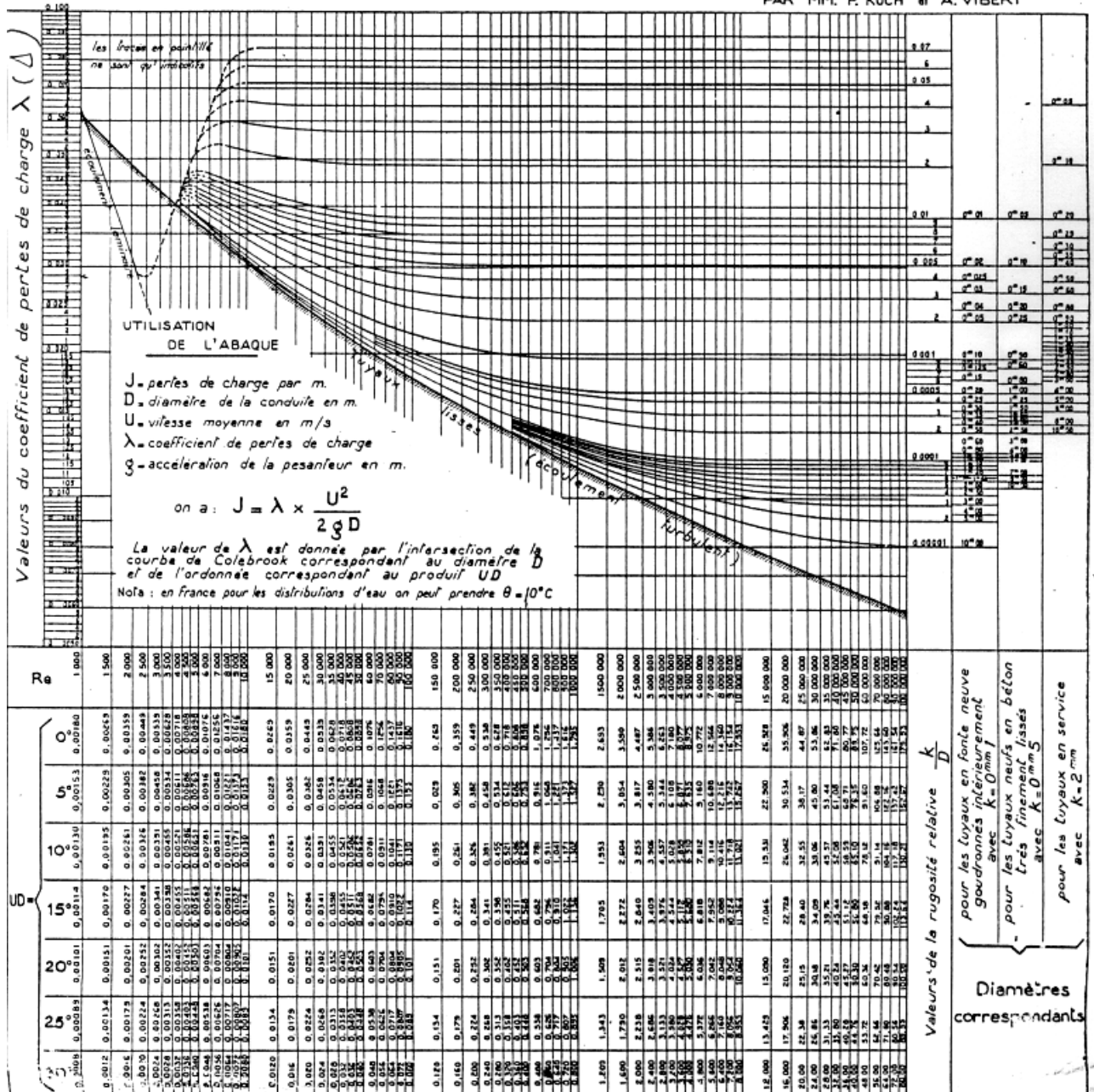
**EXEMPLE**  
 Soit  $\phi$  100 pour  $5 \frac{1}{2}$ , on cherche  $U$  :  
 $U = \frac{5 \times 4}{3,14 \times 1^2} = 6,4 \text{ mps} = 0,64 \text{ m.p.s}$   
 $UD = 0,64 \times 0,1 = 0,064$   
 On prend pour  $10^\circ\text{C}$ ,  $UD = 0,0652$  puis pour  $\lambda = 2 \text{ mm}$  le  $D$  est pris  
 dans la colonne de droite. A l'intersection  
 $\lambda = 0,049$  et  $J = \frac{0,049 \times 0,64^2}{2 \times 10 \times 0,10} \approx 0,010 \text{ m.p.m.}$

# ABAUQUE UNIVERSEL POUR LE CALCUL DES CONDUITES D'EAU

FORMULE DE COLEBROOK

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left[ \frac{k}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right]$$

PAR MM. P. KOCH et A. VIBERT



## 2.4.4 Pertes de charge singulières.

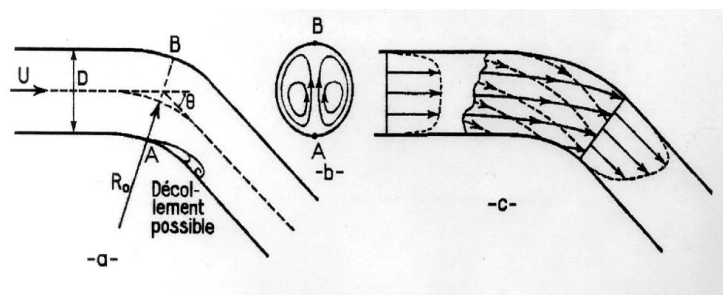
Elles sont dues à la présence de singularités le long des canalisations. Ces singularités correspondent aux variations brusques de sections, à des changements de direction, à la présence de raccords, de dérivations et branchements, de robinets et vannes.

### 1. Coudes.

Si l'écoulement était celui d'un fluide parfait, il existerait un gradient de pression radial donné par l'expression :

$$\frac{dP_g}{dR} = \rho \frac{V^2}{R}$$

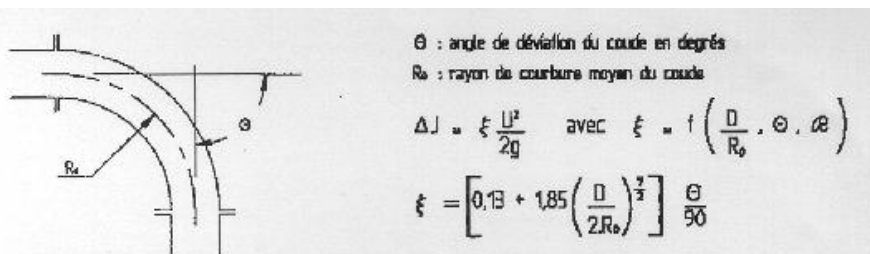
R étant le rayon de courbure d'une ligne de courant, compté positivement à partir du centre de courbure. Donc  $P_g$  augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de courbure, de A vers B. Pour un fluide réel, il se passe la même chose : la pression en B est supérieure à celle qui règne en A. Mais si l'on se déplace de A vers B, en suivant la paroi, la vitesse reste faible et la variation de pression précédente ne peut pas être équilibrée par une variation correspondante de l'énergie cinétique. Le fluide a donc tendance à s'écouler de B vers A en suivant la paroi, comme le montre la figure ci-dessous.



*Coudes à bords arrondis :*

$$\Delta J = \zeta \frac{V^2}{2g} \text{ avec } \zeta = \left[ 0,13 + 1,85 \left( \frac{D}{2R_0} \right)^{7/2} \right] \times \frac{\theta}{90}$$

$R_0$  : rayon de courbure,  
 $\theta$  (en degrés) : angle du coude



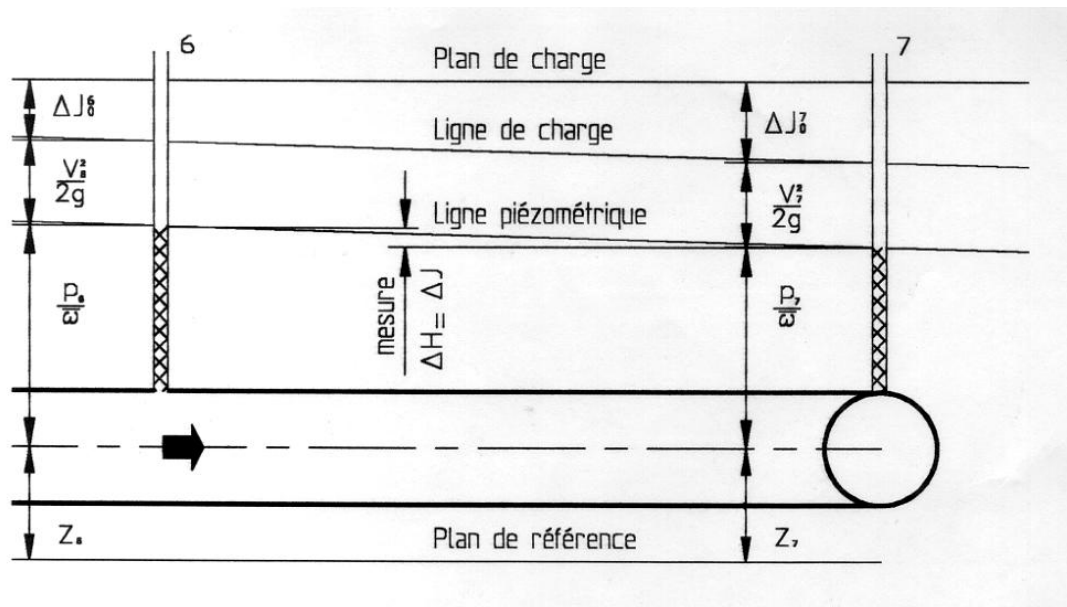
La formule précédente n'est valable que pour des conduites avec des coudes arrondis. Dans le cas de coudes à angles vifs, d'autres formules s'appliquent. Il faut savoir que les pertes de charge sont notablement réduites, en général divisées par six, si des directrices sont introduites dans les coudes.



Coude à angle vif :

$$\text{Coude à angle vif } \zeta = \sin^2 \frac{\theta}{2} + \sin^4 \frac{\theta}{2}$$

Cette formule n'est pas valable quand  $\theta$  est voisin de  $90^\circ$ . Pour un angle droit,  $\zeta$  est voisin de 1,2.



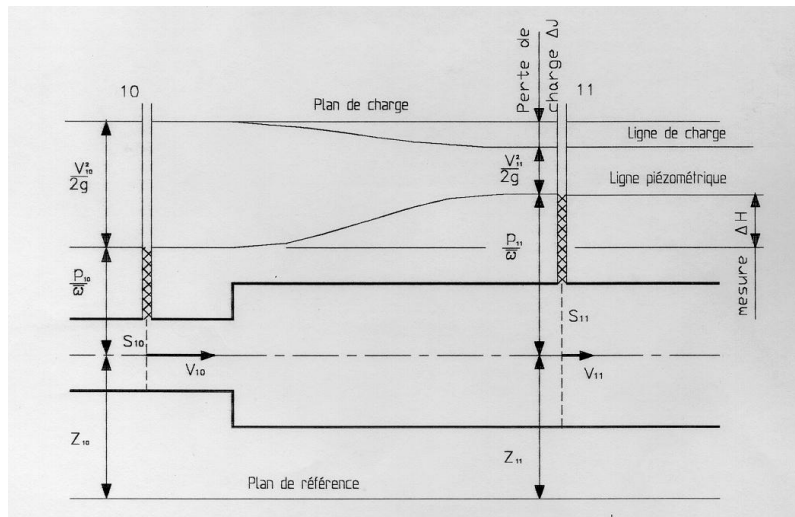
## 2. Elargissement brusque

La section passe brutalement de  $S_1$  à  $S_2$  avec  $S_1 < S_2$ . Supposons qu'en  $S_1$  et  $S_2$  la vitesse soit uniforme, la formule de Borda-Carnot nous permet d'exprimer la perte de charge due à l'élargissement brusque :

$$\Delta J = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} = \frac{V_1^2}{2g} \left[ 1 - \frac{S_1}{S_2} \right]^2$$

La perte de charge réelle est toujours de la forme  $\zeta \frac{V_1^2}{2g}$  avec un coefficient qui est d'autant plus près

de la valeur théorique  $\left[ 1 - \frac{S_1}{S_2} \right]^2$  que le rapport  $S_1 / S_2$  est plus grand et que le nombre de Reynolds est plus élevé.



### 3. Rétrécissement brusque.

La perte de charge d'un rétrécissement brusque se produit surtout en aval de la section contractée  $\sigma$  et est donnée par la formule :

$$\Delta J = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} = \frac{V_2^2}{2g} \left[ \frac{V_1}{V_2} - 1 \right]^2 = \frac{V_2^2}{2g} \left[ \frac{S_2}{\sigma} - 1 \right]^2 = \frac{V_2^2}{2g} \left[ \frac{1}{Cc} - 1 \right]^2$$

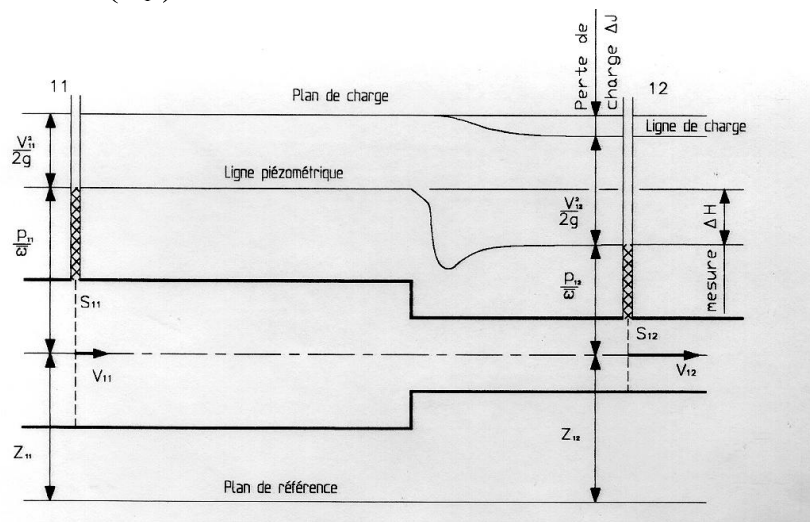
$C_c$  dépend du rapport  $S_1/S_2$  et surtout du raccordement. Dans la réalité, la perte de charge est donnée par une expression de la forme :

$$\Delta J = \zeta \frac{V_2^2}{2g} \text{ avec } \zeta = \left[ \frac{1}{C} - 1 \right]^2$$

où le coefficient  $C$  est d'autant plus proche de la valeur théorique  $C_c$  que le nombre de Reynolds de l'écoulement est plus grand.

Pour un  $Re$  très élevé et un raccordement à angle droit,  $C_c$  coefficient de contraction :

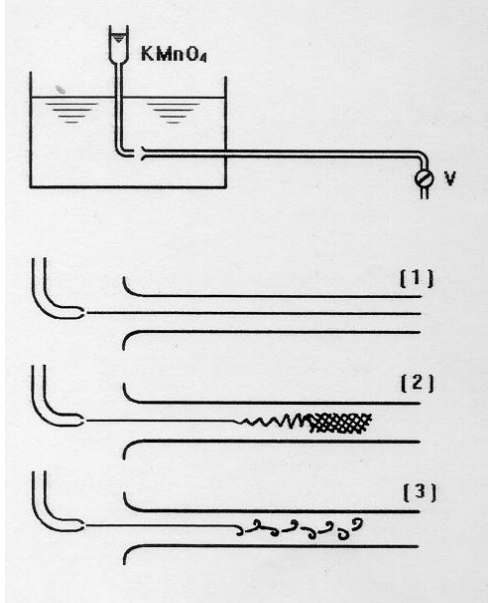
$$C_c = 0,63 + 0,37 \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^3$$



## 2.5 ECOULEMENT LAMINAIRE / ECOULEMENT TURBULENT

En général, les équations de la mécanique des fluides ne peuvent être résolues, car elles ne sont pas linéaires. Dans un nombre restreint de cas où les conditions aux limites sont très simples, il est possible de trouver une solution à ces équations. Ces écoulements sont dits laminaires.

### 2.5.1 Ecoulement laminaire



Quand un écoulement est permanent et laminaire, les lignes de courant, qui sont également les trajectoires des particules, sont des courbes fixes dans l'espace et ne se mélangent pas au cours du mouvement. Les couches fluides glissent les unes sur les autres, sans qu'il y ait passage de particule d'une couche à l'autre. Les couches fluides, à proximité des parois, épousent leur forme. Il est possible qu'un écoulement laminaire ne soit pas permanent, alors, les lignes de courant ne sont plus généralement des courbes fixes dans l'espace.

Les écoulements laminaires n'existent que sous des conditions bien précises. Pour un diamètre de conduite donné, un écoulement laminaire n'est stable que si la vitesse du fluide est faible. Cette stabilité est liée au fait que si une petite perturbation est introduite dans l'écoulement, elle disparaît, plus ou moins rapidement en aval du point où elle a été introduite.

Les écoulements laminaires se produisent si le fluide :

- a une grande viscosité cinématique,
- ou a une vitesse d'écoulement faible,
- ou traverse une conduite de faible diamètre.

Ils se produisent également, en mouvement permanent, lorsque le fluide est incompressible, homogène et que sa vitesse dérive d'un potentiel.

### 2.5.2 Ecoulement turbulent.

Un écoulement est réputé turbulent si cette perturbation, au lieu de disparaître, s'amplifie et envahit tout l'écoulement aval. Le mouvement est alors turbulent, les trajectoires s'enroulent et il se crée des tourbillons qui grossissent et s'enchevêtrent. La mécanique statistique est alors utilisée pour établir un certain nombre de résultats concernant les écoulements turbulents.

### 2.5.3 Nombre de Reynolds.

L'expérience de Reynolds, après celles de Poiseuille et de Hagen, a permis de mettre en évidence deux régimes d'écoulement:

- le régime laminaire,
- le régime turbulent.

Reynolds a montré expérimentalement que la disparition du régime laminaire se produisait pour une certaine valeur de l'expression  $\frac{V_m D}{\nu}$

avec :  $V_m$  : vitesse moyenne d'écoulement au point M (en  $\text{m.s}^{-1}$ ),  
 $D$  : diamètre de la conduite (en m),  
 $\nu$  : viscosité cinématique du fluide (en  $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ )

Cette expression a été appelée **nombre de Reynolds** et symbolisée **Re**. C'est un nombre sans dimension

L'écoulement, pour une conduite, est toujours laminaire pour un nombre de Reynolds inférieur à 2000.

- $\text{Re} < 2000$  : écoulement laminaire,
- $2000 < \text{Re} < 4000$  : écoulement critique ou transitoire,
- $\text{Re} > 4000$  : écoulement turbulent.

#### 2.5.4 Grandeurs mécaniques et hydrauliques

SYMBOLE	NOM	VALEUR ET UNITE	EQUATION AUX DIMENSIONS	RELATIONS
$g$	Accélération de la pesanteur	$9,81 \text{ m.s}^{-2}$	$\text{L T}^{-2}$	
$Q$	Débit	$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ $\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$	$\text{L}^3 \text{ T}^{-1}$	$Q = \frac{\text{Vol}}{t}$ Volume $Q = S \cdot V$ Section Vitesse
$P$	Pression	$\text{N.m}^{-2} = \text{Pa}$ Pascal $\text{daN.cm}^{-2} = \text{Bar}$	$\text{M L}^{-1} \text{ T}^{-2}$	$P = \frac{F}{S}$
$\rho$	Masse volumique	$\text{Kg.dm}^{-3}$ $\text{g.cm}^{-3}$	$\text{M L}^{-3}$	$\rho = \frac{M}{\text{Vol}}$
$\omega$	Poids volumique	$\text{N.dm}^{-3}$	$\text{M L}^{-2} \text{ T}^{-2}$	$\omega = \rho g$
$\mu$	Viscosité dynamique	$\text{Pa.s}$ Poise	$\text{M L}^{-1} \text{ T}^{-1}$	Voir expérience de Couette $1\text{cP} = 1\text{mPa.s}$
$\nu$	Viscosité cinématique	Stokes $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$ Myriastokes $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	$\text{L}^2 \text{ T}^{-1}$	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$
$Z + \frac{P}{\rho g} = H$	Hauteur piézométrique	Hauteur de liquide	$\text{L}$	
$\frac{\rho V^2}{2} + \rho gh + P$	Th. de BERNOULLI s'applique aux fluides parfaits	Energie de l'unité de volume du fluide	$\text{M L}^{-1} \text{ T}^{-2}$	Constant pour le fluide parfait

### Quelques valeurs numériques de grandeurs usuelles en hydraulique

Masse volumique de l'eau à température ambiante	1000 kg.m <sup>-3</sup>
Masse volumique de l'air à température ambiante	1,2 Kg.m <sup>-3</sup>
Masse volumique du mercure	13600 kg.m <sup>-3</sup>
Viscosité dynamique de l'eau à 20°C	10 <sup>-3</sup> Pi
Viscosité cinématique de l'eau à 20°C	10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
Viscosité dynamique de l'air à 20°C	18.10 <sup>-6</sup> Pi
Viscosité cinématique de l'air à 20°C	15.10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
Compressibilité de l'eau	5.10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> .N <sup>-1</sup>
Pression atmosphérique normale	P <sub>A</sub> = 760 mm de mercure 10,33 m d'eau 1,013.10 <sup>5</sup> Pa
Accélération de la pesanteur	g = 9,81 ms <sup>-2</sup>

### 2.5.5 Rugosité uniforme équivalente

Nature de la paroi	Rugosité uniforme équivalente en mm (R ou k)
Tuyau étiré en verre, cuivre, laiton	<0,001
Tuyau en P.V.C	0,01
Tuyau industriel en laiton	0,025
Tuyau en acier laminé, neuf	0,05
Tuyau en acier laminé, rouillé	0, 15 à 0,25
Tuyau en acier laminé, incrusté	1,5 à 3
Tuyau en acier laminé, bitumé intérieurement	0,015
Tuyau en acier soudé, neuf	0,03 à 0,1
Tuyau en acier soudé, rouillé	0,4
Tuyau en acier rivé	0,9 à 9
Tuyau en fer galvanisé	0,15 à 0,2
Tuyau en fonte usuelle moulée, neuf	0,25
Tuyau en fonte usuelle moulée, rouillé	1 à 1,25
Tuyau en fonte usuelle moulée, bitumé intérieurement	0,1
Tuyau recouvert intérieurement de fortes incrustations	jusqu'à 3
Tuyau en ciment lisse	0,3 à 0,8
Tuyau en ciment brut	jusqu'à 3
Planches non rabotées	1 à 1,25
Pierre de taille brute de percement	8 à 15
Galerie	90 à 600

## 2.6 ORGANES DEPRIMOGENES – MESURE DES DEBITS

### 2.6.1 Théorie

La mesure des débits occupe une place importante parmi tous les contrôles généralement faits sur une installation. Plusieurs méthodes faisant appel à des techniques différentes, peuvent être utilisées. En effet, on peut déduire le débit à partir :

- De la mesure de la vitesse : c'est le cas des anémomètres (fluides gazeux) et des moulinets. (fluides liquides)
- D'une mesure par débitmètre à flotteur.
- De la mesure par compteur volumétrique.
- De la mesure d'une pression différentielle.

Nous nous limiterons à l'étude technologique des méthodes donnant la valeur du débit à partir d'une mesure de pression différentielle provoquée par un organe déprimogène (venturi ou diaphragme).

#### 1. Mesure des pressions

Rappelons l'existence de deux types de prises de pression, la prise totale et la prise statique.

On appelle :

- pression totale  $P_T = P + \frac{1}{2} \rho V^2$

- pression statique  $P_S = P$

- pression dynamique  $P_D = P_T - P_S = \frac{1}{2} \rho V^2$

L'utilisation de manomètres à colonnes de liquide pour mesurer la pression : manomètres simples, différentiels, différentiels inversés, à deux liquides, inclinés, etc. Le traitement de ces organes se fait à partir des lois de la statique  $P + \rho gh = cte$ . Ajoutons simplement que l'industrie utilise peu le manomètre à colonne de liquide qui constitue surtout un appareil de laboratoire. L'industrie chimique utilise surtout des manomètres mécaniques dont le principe de fonctionnement n'a rien à voir avec la mécanique des fluides.

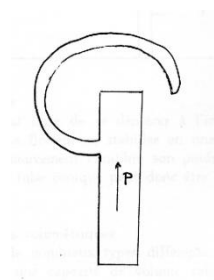


Figure 1 principe du manomètre Bourdon

Il faut enfin ajouter qu'il existe dans le commerce des appareils plus raffinés et en particulier des jauges de pression à très faible inertie qui permettent de suivre des phénomènes à variation très rapide.

#### 2. Mesure des débits

Il existe un grand nombre de dispositifs de mesure des débits.

##### a) Organes déprimogènes

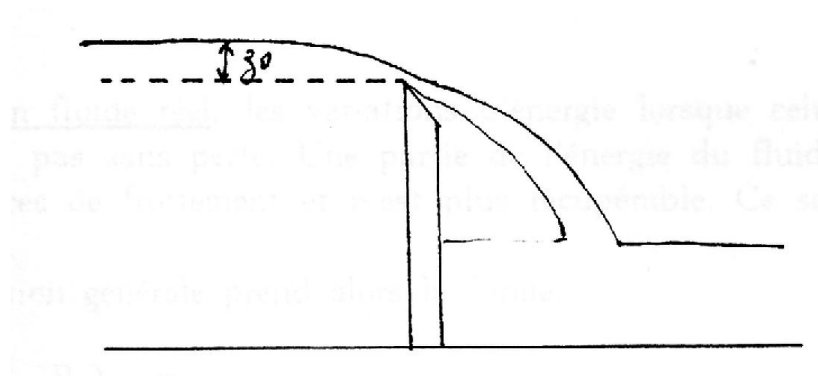
L'élément primaire est un organe qui crée une diminution d'aire de section droite. Il en résulte pour le fluide une chute de pression, fonction du débit que l'on enregistre à l'aide d'un manomètre.

### b) Déversoirs

Ils sont utilisés pour mesurer le débit d'écoulement dans des conduites ouvertes. Par bilan macroscopique effectué en supposant le liquide non visqueux et la vitesse d'approche négligeable, on établit :

$$Q = \frac{2}{3} b \sqrt{2g} z_0^{3/2}$$

où  $b$  est la largeur du réservoir.



### c) Rotamètres

Un flotteur est libre de se déplacer à l'intérieur d'un tube conique en matériau transparent. Le flotteur se stabilise en une position telle que la force exercée par le fluide en mouvement équilibre son poids. Si le débit varie, le point d'équilibre également. Le tube conique peut donc être gradué en débit.

### d) Compteurs volumétriques

Il en existe de nombreux types différents. Le principe consiste toujours à remplir puis à vider une capacité de volume connu. La mesure du débit se transforme donc en un problème de comptage du nombre de remplissages de la capacité.

Remarques :

Beaucoup d'appareils demandent un étalonnage préalable.

Un appareil de mesure vieillit et doit donc être périodiquement contrôlé.

## **2.6.2 Technologie des organes déprimogènes**

Les organes déprimogènes utilisent un dispositif présentant une section de passage plus petite que la section de la conduite. Les dispositifs les plus employés (diaphragme, tuyère, venturi) ont fait l'objet d'une normalisation internationale.

### **1. Le diaphragme**

Appelé parfois "orifice en mince paroi", le diaphragme est une mince plaque plane percée en son centre d'un orifice circulaire. Dans le diaphragme normal l'arête formée par l'intersection de l'orifice circulaire avec la face amont du diaphragme doit être vive. Sur la face aval, l'orifice peut être ou non chanfreiné suivant l'épaisseur de la plaque.

$E > c$  clarificateur

$E \leq 0,02 D$  clarificateur non obligatoire

$e$  : épaisseur de l'orifice

$D$  : diamètre de la canalisation

En général le diamètre de l'orifice est compris entre 0,1 et 0,8  $D$ .

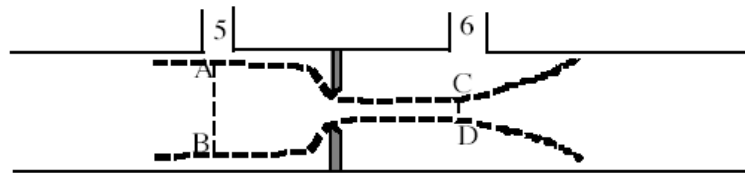
Pour des utilisations particulières, la forme peut être modifiée et l'orifice du diaphragme est excentré ou se présente sous la forme d'un segment.

Il peut être en outre équipé d'un petit trou, tangent au diamètre intérieur de la tuyauterie et disposé en haut ou en bas de l'axe vertical. Pour la mesure des gaz, le trou est en bas. Pour la mesure des liquides, le trou est en haut (évent).

L'utilisation de ces trous est souvent considérée comme un inconvénient car elle peut entraîner des erreurs.

Pour les liquides contenant beaucoup de gaz dissous, on recommande le type excentré. Ce type convient bien aussi, pour la mesure des débits de gaz contenant beaucoup de condensats (gaz, orifice tangent en bas, liquide tangent en haut).

Pour les fluides contenant des solides, non collants et non abrasifs, le système à segment est conseillé. La partie courbe doit être tangente à la partie basse de la canalisation, la partie droite étant horizontale.



Le **diaphragme** est une plaque mince dans laquelle est percé un orifice de diamètre inférieur à celui de la canalisation

Il faut noter les difficultés de cette technique :

- Le diaphragme doit être bien centré
- La veine arrivant au diaphragme doit être calme
- Le « coefficient de contraction » ne dépasse guère 0,6 à 0,7

Si on applique l'équation de Bernoulli et l'équation de continuité entre les sections 5 et 6, on obtient :

$$q_v = A_5 V_5 = A_6 V_6$$

avec  $q_v$  : débit ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$A$  : section de la veine en 5 et en 6 ( $\text{m}^2$ )

$V$  : vitesse du fluide en 5 et en 6 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

et

$$P_5 + \frac{\rho V_5^2}{2} = P_6 + \frac{\rho V_6^2}{2}$$

D'où :

$$q_v = A_5 V = A_5 \times \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \left( \left( \frac{A_5}{A_6} \right)^2 - 1 \right)}}$$

Il s'agit d'un résultat théorique. En pratique,  $q_{\text{réel}} = C \times q_{\text{théorique}}$  où  $C$  est un « coefficient de contraction » proche de 0,6-0,7.

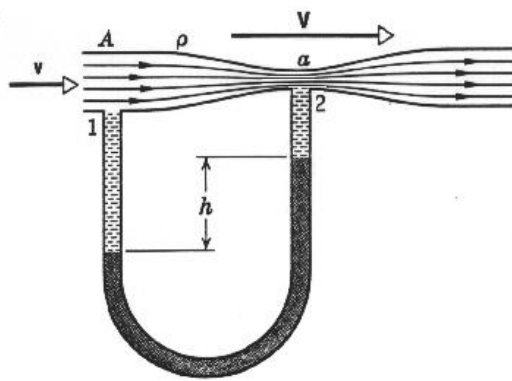


## 2. Le Venturi

Cet organe déprimogène dont le principe a été énoncé par Venturi, comporte :

- un convergent qui constitue l'organe déprimogène,
- un col cylindrique,
- un divergent dont le rôle est de guider la veine fluide à la sortie du convergent de façon à réduire la perte de charge au minimum.

Le venturi est réalisé suivant deux types différents : le venturi-tuyère et le venturi classique. Nous ne présenterons ici que le venturi classique.



Si on applique l'équation de Bernoulli et l'équation de continuité entre les sections 1 et 2, on obtient :

$$q_v = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

avec  $q_v$  : débit ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )

$A$  : section de la veine en 1 et en 2 ( $\text{m}^2$ )

$V$  : vitesse du fluide en 1 et en 2 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

et

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2}$$

D'où :

$$q_v = A_1 V = A_1 \times \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \left( \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right)}}$$

Il s'agit d'un résultat théorique. En pratique,  $q_{\text{v\`{r}eel}} = C \times q_{\text{v\`{t}héorique}}$  où  $C$  est un « coefficient de contraction » voisin de 0,98.

## 3. Débitmètre

Le débitmètre est l'organe qui indiquera ou enregistrera la pression différentielle donnée par le dispositif d'étranglement. Il pourra être gradué en mètres cubes par heure, en kg/h.

La pression différentielle maximale est définie par les propriétés constructives du débitmètre. En conséquence, il importe de choisir avec soin le type d'instrument à utiliser.

Pour les fluides sous faible pression statique on utilisera des débitmètres dont la pression différentielle maximale est comprise entre 30 et 150 mm  $\text{H}_2\text{O}$ .

Pour les fortes pressions on choisira un appareil dont la pression différentielle est comprise entre 500 et 5 000 mm  $\text{H}_2\text{O}$ .



### 3 DOSSIER PEDAGOGIQUE

Thèmes abordés	Durée
1/ PERTES DE CHARGE REGULIERES	
▪ durée de manipulation	25 min.
▪ durée d'exploitation des résultats	30 min.
2/ PERTES DE CHARGE SINGULIERES : COUDES	
▪ durée de manipulation	20 min.
▪ durée d'exploitation des résultats	20 min.
3/ PERTES DE CHARGE SINGULIERES : VARIATIONS BRUSQUES DE SECTION	
▪ durée de manipulation	20 min.
▪ durée d'exploitation des résultats	20 min.
4/ ECOULEMENT LAMINAIRE/TURBULENT (Option)	
▪ durée de manipulation	20 min.
▪ durée d'exploitation des résultats	15 min.
5/ ETALONNAGE D'UN DIAPHRAGME	
▪ durée de manipulation	45 min.
▪ durée d'exploitation des résultats	45 min.
6/ ETALONNAGE D'UN VENTURI	
▪ durée de manipulation	45 min.
▪ durée d'exploitation des résultats	45 min.
7/ ETUDE DES VANNES	
▪ durée de manipulation	30 min.
▪ durée d'exploitation des résultats	30 min.

#### REMARQUE

Les temps donnés ainsi que les mesures relevées dans les exemples suivants ne sont données qu'à titre informatif. Les durées de manipulation ainsi que les résultats peuvent varier d'un appareil à l'autre selon la version d'équipement.  
Les numéros de piquage ne sont pas forcément ceux de votre appareil.

### 3.1 PERTES DE CHARGE REGULIERES

#### 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 mais de matériaux et de diamètres différents.

Nature du tube	Diamètre (mm)	Longueur entre piquages (mm)	Numéro de piquages
Tube en Altuglas lisse Ø25	di=19-de=25	1000	11-12
Tube en Altuglas lisse Ø32	di=26-de=32	1000	13-14
Tube en PVC rugueux Ø20	di=15-de=20	1000	15-16
Tube en PVC lisse Ø20	di=15-de=20	1000	17-18

#### 3.1.1 Equation de continuité et de Bernoulli

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

$$Q = S_1 V_1 = S_2 V_2 \text{ et } Q = S_3 V_3 = S_4 V_4 \text{ etc.}$$

La connaissance du rapport des sections permet de déterminer le rapport inverse des vitesses. La formule de Bernoulli, qui exprime la conservation de l'énergie contenue dans le fluide s'écrit :

$$a) \quad \frac{1}{2} m V^2 + \frac{mP}{\rho} + mgZ = cste$$

Quand Z est constant, comme pour notre banc d'essai, il y a échange d'énergie entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle due à la pression. En unités correspondant aux hauteurs d'eau, la formule de Bernoulli prend la forme suivante :

$$b) \quad \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\omega} + Z = cste$$

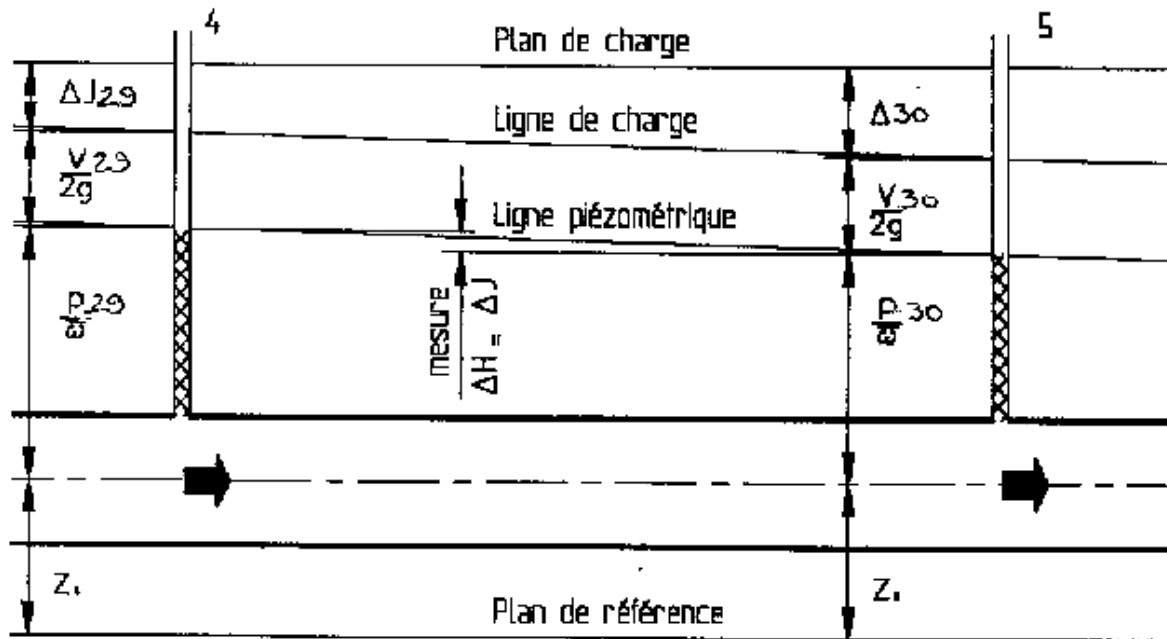
Appliquons cette formule générale aux phénomènes se produisant, par exemple, entre les prises de pression 1 et 2 :

$$c) \quad \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\omega} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\omega} + Z_2$$

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  $\Delta J$  cette perte d'énergie, exprimée en hauteur d'eau, alors :

$$d) \quad \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\omega} + Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\omega} + Z_2 + \Delta J$$

### 3.1.2 Interprétation graphique



### 3.1.3 Observations

#### Constatations

Que constate-t-on ?

#### Interprétation

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

#### Différence de hauteur piézométrique

Exprimer pour un fluide parfait  $\Delta J = 0$ , avec pour le banc de dynamique des fluides  $Z_1 = Z_2$ , à partir de l'équation c) la différence :

$$\frac{P_1}{\rho} - \frac{P_2}{\rho} =$$

### 3.1.4 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  $Z_1 = Z_2$ , déterminer l'expression de la perte de charge  $\Delta J$  en fonction de  $P_1$  et  $P_2$  :

## Mesures expérimentales de la perte de charge

Effectuer les mesures des pertes de charges dans les différentes conduites linéaires.

Débit (L/h)	$\Delta J$ 11-12 (mmCE)	$\Delta J$ 13-14 (mmCE)	$\Delta J$ 15-16 (mmCE)	$\Delta J$ 17-18 (mmCE)
500	8	0,5	41	7
600	12	0,7	60	11
700	16	0,8	75	12
800	21	12		16
900	28	14		20
1000	35	18		25
1100	41	21		30
1200	45	24		33
1300	48	28		38
1400	54	30		73
1500	61	35		48
1600	68	40		54
1700	76	43		60
1800				
1900				
2000				
2100				

## Exploitation des résultats

Etablir pour chaque type de canalisation étudiée l'évolution de la perte de charge en fonction du débit  $\Delta J=f(Q)$  ainsi que les courbes du coefficient de frottement  $\lambda$  en fonction du nombre de Reynolds  $\lambda=f(Re)$

A partir de la relation que nous avons établi précédemment, calculer le coefficient de perte de charge  $\lambda$ .

$$\Delta J = \frac{\Delta P}{\omega} = \lambda \frac{LV^2}{2Dg}$$

Analyser les résultats pour chacune des 4 conduites. Comparer alors les résultats expérimentaux avec les valeurs théoriques des pertes de charges prévus par les différents modèles en fonction du régime d'écoulement et du caractère rugueux ou lisse des conduites.

## Conclusion

Quelles conclusions peut-on faire quant à l'évolution de la perte de charge  $\Delta J$  en fonction :

- du caractère rugueux d'une conduite ?
- du changement de diamètre d'une conduite ?

### 3.1.5 Exemple d'analyse des mesures

Mesures effectuées entre les points 17 et 18 : tube PVC lisse de diamètre interne 15 mm et d'entraxe 1000 mm.

Paramètres :

T : 20 °C    D : 15 mm    L : 1000 mm     $\nu : 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$      $\rho : 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Débit (L/h)	V (m/s)	Re	$\Delta J$ 17-18 (mmCE)	$\lambda$ 17-18	$\lambda$ théo
500	0,79	11789	51	0,024	0,030
600	0,94	14147	72	0,024	0,029
700	1,10	16505	94	0,023	0,028
800	1,26	18863	119	0,022	0,027
900	1,41	21221	149	0,022	0,026
1000	1,57	23579	183	0,022	0,026
1100	1,73	25936	218	0,021	0,025
1200	1,89	28294	250	0,021	0,024
1300	2,04	30652	282	0,020	0,024
1400	2,20	33010	315	0,019	0,023
1500	2,36	35368	364	0,019	0,023
1600	2,52	37726	402	0,019	0,023
1700	2,67	40083	454	0,019	0,022
1800	2,83	42441	498	0,018	0,022
1900	2,99	44799	543	0,018	0,022
2000	3,14	47157	599	0,018	0,021
2100	3,30	49515	643	0,017	0,021

Formules de calcul :

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} \text{ avec } Q \text{ en } \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, D \text{ en m et } V \text{ en } \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \text{ avec } V \text{ en } \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, D \text{ en m et } \nu \text{ en } \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\Delta J = \frac{\Delta P}{\omega} \text{ avec } \Delta P \text{ en Pa ou } \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}, \omega \text{ en } \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2} \text{ et } \Delta J \text{ en m.}$$

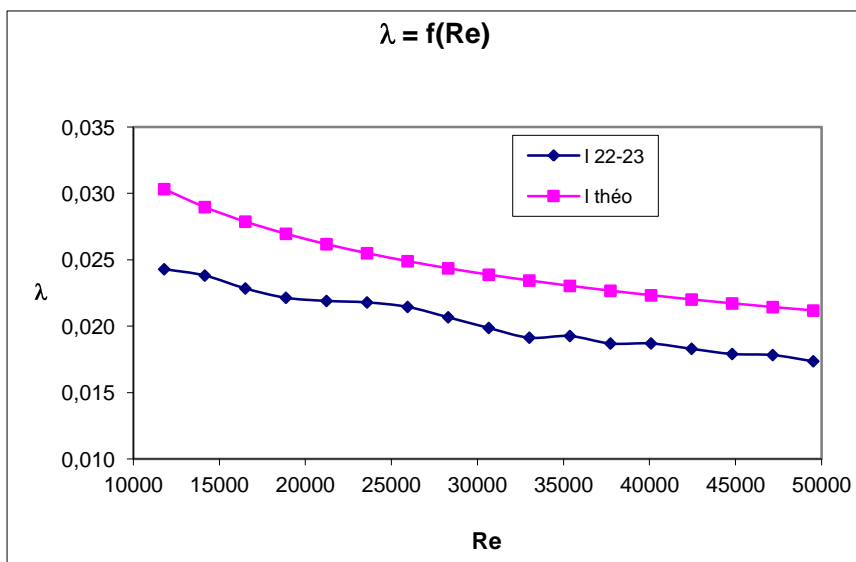
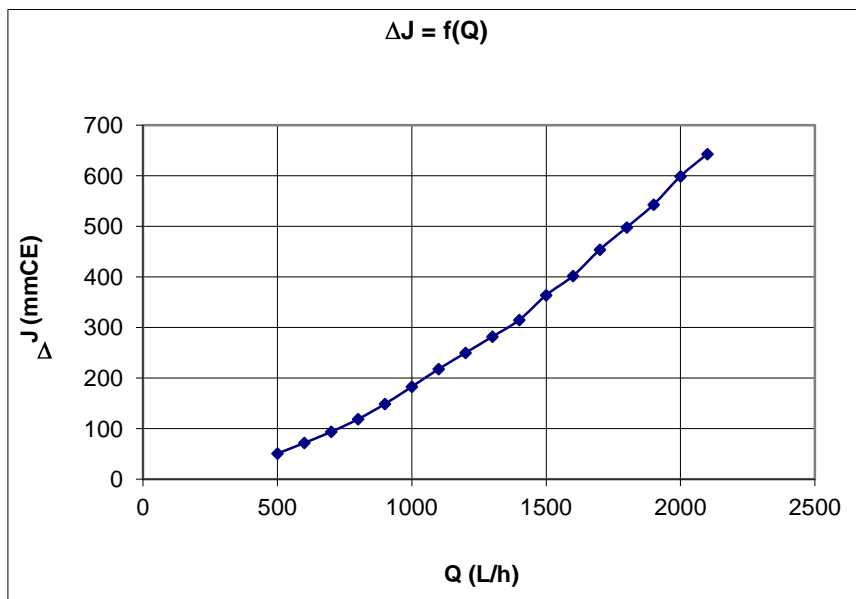
Pour calculer  $\lambda_{\text{exp}}$  :

$$\Delta J = \lambda_{\text{exp}} \frac{LV^2}{2Dg} \text{ avec } L \text{ en m, } V \text{ en } \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, D \text{ en m, } g \text{ en } \text{m} \cdot \text{s}^{-2}, \Delta J \text{ en m et } \lambda \text{ sans dimension.}$$

Pour calculer  $\lambda_{\text{théo}}$  :

$$\text{Relation de Blasius pour conduite lisse en régime turbulent : } \lambda_{\text{théo}} = 0,316 \cdot \text{Re}^{-0,25}$$

Courbes obtenues :



Les mêmes calculs de  $\lambda_{exp}$  pour la conduite rugueuse permettent de connaître  $\lambda_{exp} = f(Re)$ . On se sert alors du diagramme de Colebrook ou diagramme de Moody afin de déterminer la rugosité équivalente du tube.

Exemple :

Si pour un tube rugueux, on a  $Re = 41200$  et  $\lambda_{exp} = 0,028$ , utiliser le diagramme de Colebrook en pointant le point d'abscisse 41200 et d'ordonnée 0,028.

Il tombe sur la courbe qui correspond à la rugosité relative  $R/D = 0,003$ .



### 3.2 PERTE DE CHARGE SINGULIERES : LES 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 différents.

Nature du tube	Diamètre (mm)	Numéro de piquages
Coude à 90° petit rayon	di=14-de=20	1-2
Coude à 90° grand rayon	di=14-de=20	2-3
Coude à 90° petit rayon	di=14-de=20	3-4
2 coudes à 45°	di=14-de=20	4-5
Coude à 45°	di=14-de=20	5-6
Coude aigu à 135°	di=14-de=20	6-7

#### 3.2.1 Equation de continuité et de Bernoulli

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

$$Q = S_{12}V_{12} = S_{13}V_{13} = S_{14}V_{14}$$

La connaissance du rapport des sections permet de déterminer le rapport inverse des vitesses. La formule de Bernoulli, qui exprime la conservation de l'énergie contenue dans le fluide s'écrit :

$$a) \quad \frac{1}{2}mV^2 + \frac{mP}{\rho} + mgZ = cste$$

Quand Z est constant, comme pour notre banc d'essai, il y a échange d'énergie entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle due à la pression. En unités correspondant aux hauteurs d'eau, la formule de Bernoulli prend la forme suivante :

$$b) \quad \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\omega} + Z = cste$$

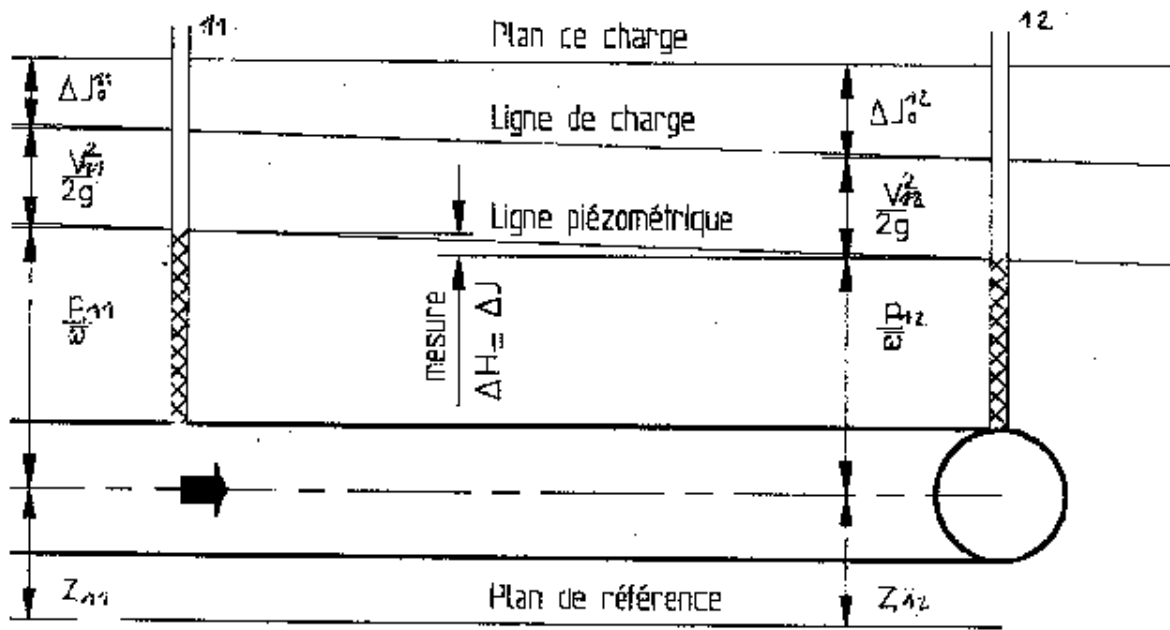
Appliquons cette formule générale aux phénomènes se produisant, par exemple, entre les prises de pression 12 et 13 :

$$c) \quad \frac{V_{12}^2}{2g} + \frac{P_{12}}{\omega} + Z_{12} = \frac{V_{13}^2}{2g} + \frac{P_{13}}{\omega} + Z_{13}$$

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  $\Delta J$  cette perte d'énergie, exprimée en hauteur d'eau, alors :

$$d) \quad \frac{V_{12}^2}{2g} + \frac{P_{12}}{\omega} + Z_{12} = \frac{V_{13}^2}{2g} + \frac{P_{13}}{\omega} + Z_{13} + \Delta J$$

### 3.2.2 Interprétation graphique



### 3.2.3 Observations

#### Constatations

Que constate-t-on ?

#### Interprétation

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

#### Différence de hauteur piézométrique

Exprimer pour un fluide parfait  $\Delta J = 0$ , avec pour le banc de dynamique des fluides  $Z_6 = Z_7$ , à partir de l'équation c) la différence :

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

### 3.2.4 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  $Z_6 = Z_7$ , déterminer l'expression de la perte de charge  $\Delta J$  en fonction de  $P_6$  et  $P_7$  :

## Mesures expérimentales de la perte de charge

Effectuer les mesures des pertes de charges dans les différentes parties de la ligne.

Débit (L/h)	$\Delta P_{1-2}$ (mbar)	$\Delta P_{2-3}$ (mbar)	$\Delta P_{3-4}$ (mbar)	$\Delta P_{4-5}$ (mbar)	$\Delta P_{5-6}$ (mbar)	$\Delta P_{6-7}$ (mbar)
400	7,0	2,0	2,5	4,9	6,6	3,5
600	15,3	4,5	5,0	10,5	12,5	6,6
800	25,6	8,0	9,5	17,9	22,4	11,7
1000	40,0	12,0	14,5	28,1	34,9	19,2
1200	56,2	15,5	21,5	40,0	48,8	26,6
1400	73,5	21,5	29,0	52,3	63,9	34,7
1600	95,2	26,0	30,0	67,0	81,8	44,8
1800	120,1	37,5	47,0	84,8	10,8	55,6
2000	146,3	38,5	52,0	103,6	121,6	67,9

## Exploitation des résultats

Etablir pour chaque type de canalisation étudiée l'évolution de la perte de charge en fonction du débit  $\Delta J=f(Q)$ . On analysera les courbes obtenues pour les différents coudes.

Calculer les coefficients de perte de charge pour un débit donnée pour chaque coude à partir des valeurs expérimentales.

$$\Delta J = \zeta \frac{V^2}{2g}$$

Comparer les résultats obtenus avec ceux prévus par les modèles théoriques.  
Commenter et analyser les résultats.

## Conclusion

Que peut-on en conclure quant à l'évolution du coefficient de perte de charge en fonction :

- de l'angle  $\theta$  ?
- du rayon  $R_0$  ?

### 3.2.5 Exemple d'analyse des mesures

Mesures effectuées entre les points

- 1 et 2 : 1 coude à 90° petit rayon
- 2 et 3 : 1 coude à 90° grand rayon

Paramètres :

T : 20 °C    D : 14 mm     $\nu$  :  $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$      $\rho$  :  $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Débit (L/h)	V (m/s)	$\Delta P_{1-2}$ (mm)	$\Delta P_{2-3}$ (mm)	$\Delta J_{1-2}$ (mm)	$\Delta J_{1-2}$ (mm)	$\zeta_{1-2}$	$\zeta_{2-3}$
400	0,72	6,6	3,5	67	36	2,53	1,34
600	1,08	12,5	6,6	127	67	2,13	1,13
800	1,44	22,4	11,7	228	119	2,15	1,12
1000	1,80	34,9	19,2	356	196	2,14	1,18
1200	2,16	48,8	26,6	497	271	2,08	1,13
1400	2,52	63,9	34,7	651	354	2,00	1,09
1600	2,88	81,8	44,8	834	457	1,96	1,07
1800	3,24	100,8	55,6	1028	567	1,91	1,05
2000	3,60	121,6	67,9	1240	692	1,87	1,04

Formules de calcul :

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} \text{ avec } Q \text{ en m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, D \text{ en m et } V \text{ en m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\Delta J = \frac{\Delta P}{\omega} \text{ avec } \Delta P \text{ en Pa ou kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}, \omega \text{ en kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2} \text{ et } \Delta J \text{ en m.}$$

Pour calculer  $\zeta$  :

$$\Delta J = \zeta \frac{V^2}{2g} \text{ avec } V \text{ en m} \cdot \text{s}^{-1}, g \text{ en m} \cdot \text{s}^{-2}, \Delta J \text{ en m et } \zeta \text{ sans dimension.}$$

*Calculs théoriques :*

a - Pour un angle vif :  $\zeta = \sin^2 \frac{\theta}{2} + \sin^4 \frac{\theta}{2}$  avec  $\theta$  en  $^\circ$ .

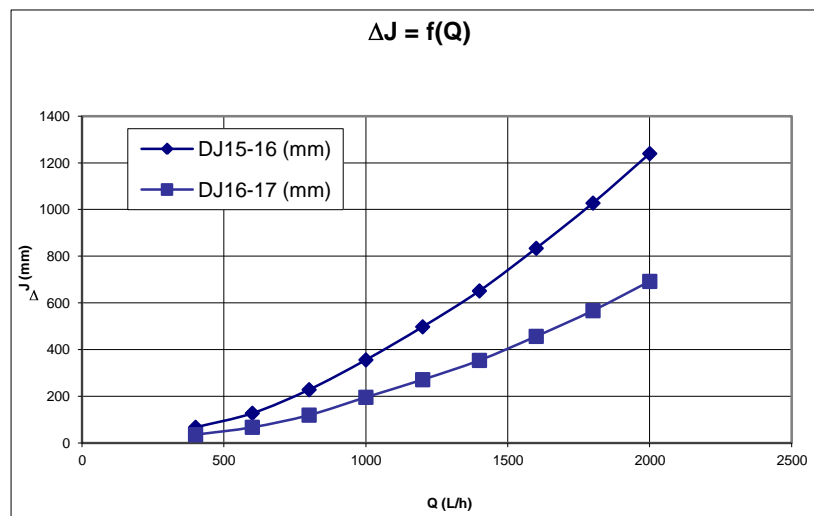
b - Pour un angle droit,  $\zeta$  est voisin de 1,2.

$$\zeta_{\text{théo 1-2}} = 1,25 \text{ selon a}$$

$$\zeta_{\text{théo 1-2}} = 1,2 \text{ selon b}$$

On observe que les résultats sont proches de la théorie pour des débits peu élevés. On constate également que la perte de charge dans les 2 coudes à  $90^\circ$  qui se suivent est bien égale au double de la mesure pour un seul angle.

Courbe obtenue :



### 3.3 PERTES DE CHARGE SINGULIERES : VARIATIONS BRUSQUES DE SECTION

#### OBJECTIF

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

Nature du tube	Diamètre (mm)	Numéro de piquages
Elargissement brusque	di=14-de=20 à di=20-de=34	8-9
Rétrécissement brusque	di=20-de=34 à di=14-de=20	9-10

#### 3.3.1 Equation de continuité et de Bernoulli

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

$$Q = S_8 V_8 = S_9 V_9 = S_{10} V_{10}$$

La connaissance du rapport des sections permet de déterminer le rapport inverse des vitesses. La formule de Bernoulli, qui exprime la conservation de l'énergie contenue dans le fluide s'écrit :

$$a) \quad \frac{1}{2} m V^2 + \frac{mP}{\rho} + mgZ = cste$$

Quand Z est constant, comme pour notre banc d'essai, il y a échange d'énergie entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle due à la pression. En unités correspondant aux hauteurs d'eau, la formule de Bernoulli prend la forme suivante :

$$b) \quad \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\omega} + Z = cste$$

Appliquons cette formule générale aux phénomènes se produisant, par exemple, entre les prises de pression 10 et 11 :

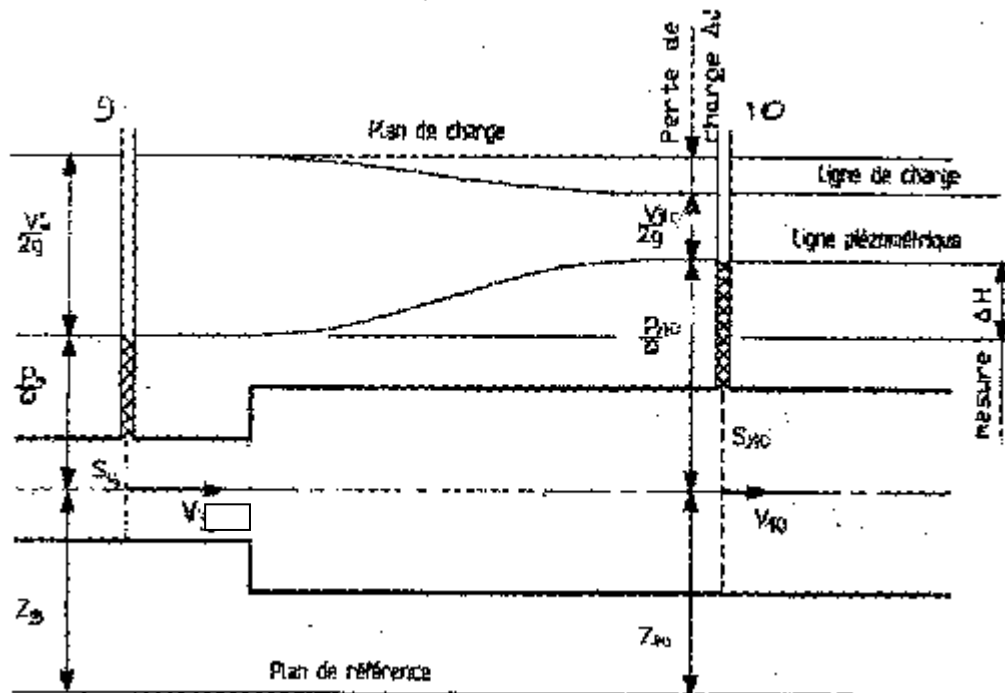
$$c) \quad \frac{V_9^2}{2g} + \frac{P_9}{\omega} + Z_9 = \frac{V_{10}^2}{2g} + \frac{P_{10}}{\omega} + Z_{10}$$

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  $\Delta J$  cette perte d'énergie, exprimée en hauteur d'eau, alors :

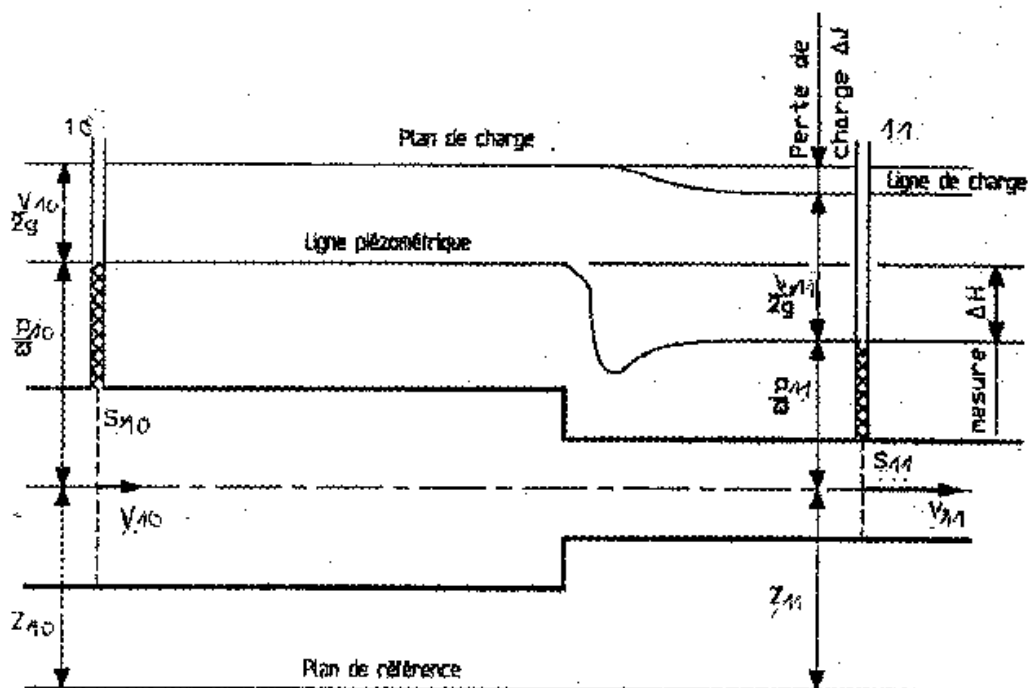
$$d) \quad \frac{V_9^2}{2g} + \frac{P_9}{\omega} + Z_9 = \frac{V_{10}^2}{2g} + \frac{P_{10}}{\omega} + Z_{10} + \Delta J$$

### 3.3.2 Interprétation graphique

#### *Elargissement brusque*



#### *Rétrécissement brusque*



### 3.3.3 Observations

#### Constatations

Que constate-t-on ?

#### Interprétation

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

#### Différence de hauteur piézométrique

Exprimer pour un fluide parfait  $\Delta J = 0$ , avec pour le banc de dynamique des fluides  $Z_9 = Z_{10}$ , à partir de l'équation c) la différence :

$$\frac{P_9}{\omega} - \frac{P_{10}}{\omega} =$$

### 3.3.4 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  $Z_9 = Z_{10}$ , déterminer l'expression de la perte de charge  $\Delta J$  en fonction de  $P_9$  et  $P_{10}$  :

#### Mesures expérimentales de la perte de charge

Effectuer les mesures des pertes de charges au niveau de chaque variation brusque de section.

Débit (L/h)	$\Delta J$ 8-9 (mmCE)	$\Delta J$ 9-10 (mmCE)
500	9	53
600	15	75
700	22	103
800	28	135
900	41	175
1000	50	220
1100	59	264
1200	75	314
1300	86	358
1400	104	420
1500	117	487
1600	140	553
1700	152	615
1800	177	694
1900	191	758
2000	206	
2100	234	

#### Exploitation des résultats

Etablir pour chaque type de variation étudiée l'évolution de la perte de charge en fonction du débit  $\Delta J=f(Q)$ . On analysera les courbes obtenues.

Comparer les résultats obtenus avec ceux prévus par les modèles théoriques.  
Commenter et analyser les résultats.

## Conclusion

Que peut-on en conclure quant à l'évolution du coefficient de perte de charge ?

### 3.3.5 Exemple d'analyse des mesures

Mesures effectuées entre les points 8 et 9 : élargissement brusque

Paramètres :

T : 20 °C    D1 : 14 mm    D2 : 24mm     $\nu : 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$      $\rho : 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Débit (L/h)	V (m/s)	Re	$\Delta J$ 8-9 (mmCE)	Sexp
500	0,90	12631	9	0,22
600	1,08	15158	15	0,25
700	1,26	17684	22	0,27
800	1,44	20210	28	0,26
900	1,62	22736	41	0,30
1000	1,80	25263	50	0,30
1100	1,98	27789	59	0,29
1200	2,17	30315	75	0,31
1300	2,35	32841	86	0,31
1400	2,53	35368	104	0,32
1500	2,71	37894	117	0,31
1600	2,89	40420	140	0,33
1700	3,07	42947	152	0,32
1800	3,25	45473	177	0,33
1900	3,43	47999	191	0,32
2000	3,61	50525	206	0,31
2100	3,79	53052	234	0,32

Formules de calcul :

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} \text{ avec } Q \text{ en } \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, D \text{ en m et } V \text{ en } \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$\Delta J = \frac{\Delta P}{\rho g} \text{ avec } \Delta P \text{ en Pa ou } \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}, \rho \text{ en } \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ et } \Delta J \text{ en m.}$$

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \text{ avec } V \text{ en } \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, D \text{ en m et } \nu \text{ en } \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}.$$

Pour calculer  $\zeta$  :

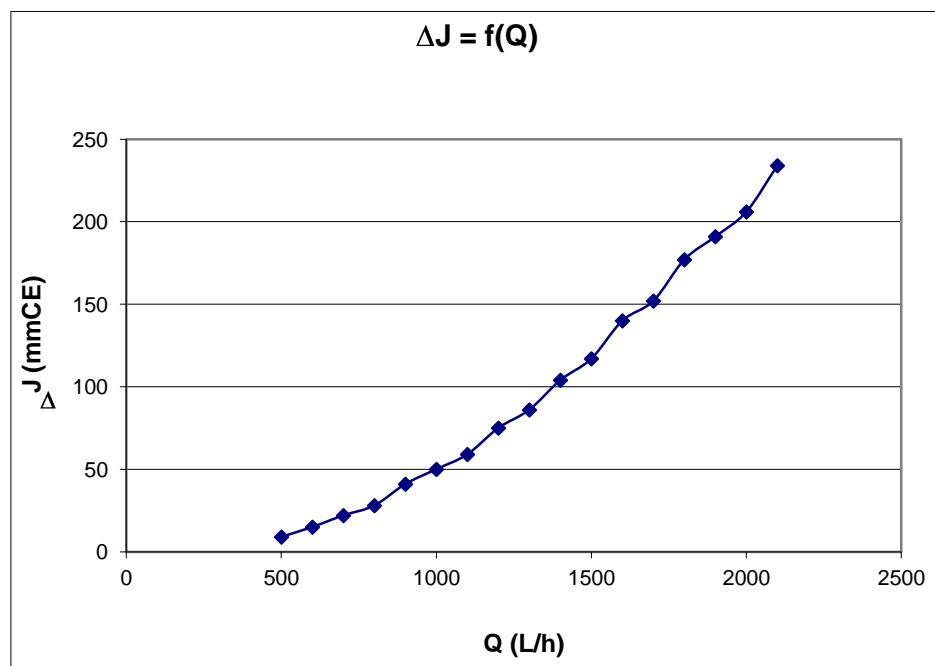
$$\Delta J = \zeta \frac{V^2}{2g} \text{ avec } V \text{ en } \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, g \text{ en } \text{m} \cdot \text{s}^{-2}, \Delta J \text{ en m et } \zeta \text{ sans dimension.}$$

$$\text{Et } \zeta_{théo} = \left[ 1 - \frac{S_1}{S_2} \right]^2$$

On trouve que  $\zeta_{théo} = 0,44$ .



Courbe obtenue :



### 3.4 ECOULEMENT LAMINAIRE / TURBULENT (OPTION)

Cette étude est possible sur la ligne d'injection de colorant.

#### OBJECTIF

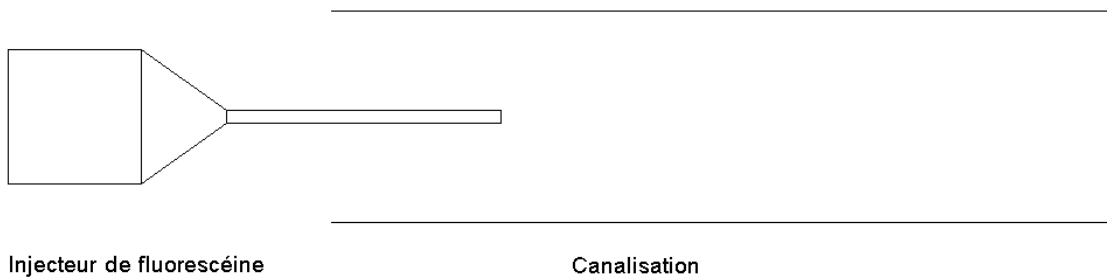
Visualiser les régimes laminaires, transitoires et turbulent d'un fluide dans une canalisation ( $d_i=14\text{mm}$ ) au moyen d'un colorant : la fluorescéine.

#### 3.4.1 Observations à faible vitesse

On observe que les lignes de courant sont des lignes fixes dans la canalisation ; elles ne se mélangent pas entre elles au cours du mouvement. Les couches fluides glissent les unes sur les autres sans qu'il y ait d'échange de particules d'une couche à l'autre. L'observation serait identique pour une conduite non rectiligne, et alors il est possible de dire que les lignes de courant suivent les formes des parois proposées à l'écoulement.

L'écoulement est laminaire.

Dessiner la forme que prend l'injection de fluorescéine sur 15 cm de conduite.



L'écoulement laminaire est stable si le nombre de Reynolds est faible :  $Re < 2000$

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

avec  $V$  : vitesse moyenne en  $\text{m.s}^{-1}$ ,  
 $D$  : diamètre en m,  
 $\nu$  : viscosité cinématique en  $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ .

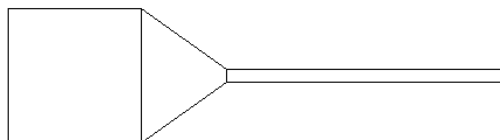
La viscosité cinématique de l'eau est de  $10^{-6} \text{m}^2.\text{s}^{-1}$ .

### 3.4.2 Observations à vitesse élevée

L'écoulement n'est pas stable et lorsqu'une perturbation apparaît, elle gagne rapidement toute la conduite. Le nombre de Reynolds correspondant est plus élevé que pour l'écoulement laminaire.

L'écoulement est turbulent.

Dessiner la forme que prend l'injection de fluorescéine sur 15 cm de conduite.



Injecteur de fluorescéine

Canalisation

L'écoulement est turbulent si le nombre de Reynolds est plus important :  $Re > 3000$

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

avec  $V$  : vitesse moyenne en  $m.s^{-1}$ ,  
 $D$  : diamètre en m,  
 $\nu$  : viscosité cinématique en  $m^2.s^{-1}$ .

La viscosité cinématique de l'eau est de  $10^{-6} m^2.s^{-1}$ .

#### Remarque :

Aux très faibles débits nécessaires pour observer le régime laminaire, il est possible de mesurer le débit à l'aide d'un récipient gradué et d'un chronomètre si le débit n'est pas assez lisible sur le débitmètre 30-300 L/h.

Le calcul du Reynolds peut être effectué.

### 3.5 ORGANE DEPRIMOGENE : DIAPHRAGME

#### OBJECTIF

Vérifier par des mesures, l'existence d'une perte d'énergie lorsque le fluide passe à travers un diaphragme et vérifier la corrélation entre perte de charge et débit pour valider l'utilisation du diaphragme comme instrument de mesure du débit.

Nature de l'élément	Diamètre (mm)	Numéro de piquages
Diaphragme	$d_1=21$ , $d_2=12$	E-F

#### 3.5.3 Equation de continuité et de Bernoulli

Le diaphragme est un appareil permettant de connaître le débit du fluide parcourant un circuit hydraulique. Le liquide utilisé dans le banc est de l'eau. C'est un fluide incompressible. Le débit d'eau est donc le même à travers toutes les sections des tubes ce qui se traduit par l'équation de continuité suivante :

$$Q = S_E V_F = S_F V_E$$

Avec  $Q$  : débit en  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 $S_E$  et  $S_F$  : sections en  $\text{m}^2$   
 $V_E$  et  $V_F$  : vitesses en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

La connaissance du rapport des sections permet de déterminer le rapport inverse des vitesses. La formule de Bernoulli, qui exprime la conservation de l'énergie contenue dans le fluide s'écrit :

$$\text{a) } \frac{1}{2} m V^2 + \frac{mP}{\rho} + mgZ = cste$$

Quand  $Z$  est constant, comme pour notre banc d'essai, il y a échange d'énergie entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle due à la pression. En unités correspondant aux hauteurs d'eau, la formule de Bernoulli prend la forme suivante :

$$\text{b) } \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\omega} + Z = cste$$

Appliquons cette formule générale aux phénomènes se produisant, par exemple, entre les prises de pression 22 et 23 :

$$\text{c) } \frac{V_E^2}{2g} + \frac{P_E}{\omega} + Z_E = \frac{V_F^2}{2g} + \frac{P_F}{\omega} + Z_F$$

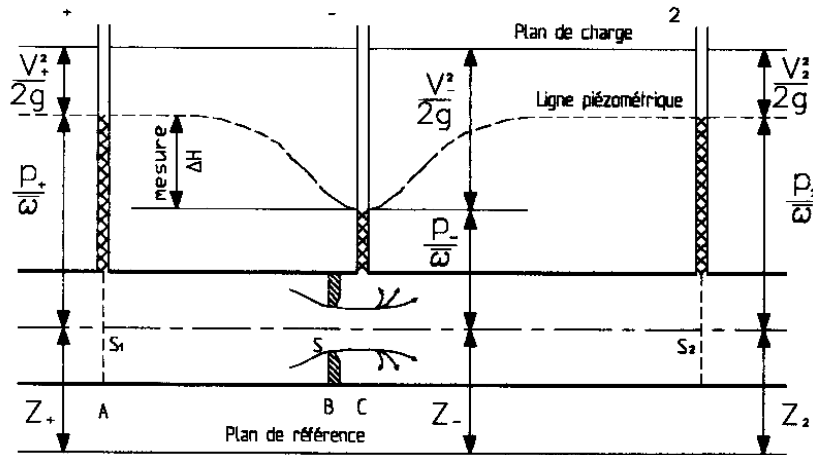
En réalité, l'eau n'est pas un fluide parfait et il existe des pertes d'énergie dues au frottement des particules fluides entre elles et sur les parois. Soit  $\Delta J$  cette perte d'énergie, exprimée en hauteur d'eau, alors :

$$\text{d) } \frac{V_E^2}{2g} + \frac{P_E}{\omega} + Z_E = \frac{V_F^2}{2g} + \frac{P_F}{\omega} + Z_F + \Delta J$$

Avec  $\Delta J = 0$ , on obtient la relation suivante :

$$\frac{P_E - P_F}{\omega} = \frac{V_E^2 - V_F^2}{2g}$$

### 3.5.4 Interprétation graphique



### 3.5.5 Expression du débit théorique

En faisant la synthèse de l'équation de Bernoulli simplifiée et de l'équation de continuité, il est possible d'exprimer le débit théorique en B dans le diaphragme :

$$Q_{théo} = \frac{S_E}{\sqrt{\left(\frac{S_E}{S_F}\right)^2 - 1}} \sqrt{2g\Delta J}$$

Avec  $Q$  : débit en  $m^3.s^{-1}$   
 $S_F$  : section du diaphragme en  $m^2$   
 $S_E$  : section du tube en  $m^2$   
 $\Delta J$  : perte de charge en m  
 $g$  : accélération de la pesanteur en  $m.s^{-2}$

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  $C_c$  :

$$Q_{théo} = C_c \frac{S_E}{\sqrt{\left(\frac{S_E}{S_F}\right)^2 - 1}} \sqrt{2g\Delta J}$$

$C_c$  est de l'ordre de 0,6-0,7.

Soit plus simplement :

$$Q = K\sqrt{\Delta J}$$

### 3.5.6 Détermination de la perte de charge

#### Mesures expérimentales de la perte de charge

Effectuer les mesures des pertes de charge dans le diaphragme pour différentes valeurs de débit lues sur le rotamètre.

Débit (L/h)	$\Delta P_{E-F}$ (mbar)
400	9
600	21
800	39
1000	61
1200	86
1400	127
1600	169
1800	212
2000	266
2200	316
2400	381

Débit (L/h)	$\Delta J_{E-F}$ (mmCE)
300	52
400	98
500	150
600	225
700	312
800	425
900	532
1000	688

#### Exploitation des résultats

Tracer la courbe  $Q_{exp} = f(\Delta P)$  avec  $Q_{exp}$ , débit lu au rotamètre. Observer que la courbe est une parabole d'axe horizontal.

Déterminer le  $K_{exp}$ .

Calculer la valeur de  $K_{théo}$  et calculer les valeurs de  $Q_{théo}$  pour les valeurs de  $\Delta P$  mesurées. Tracer la courbe  $Q_{théo} = f(\Delta P)$  sur le même graphique que précédemment.

Comparer les deux courbes.

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

### 3.5.7 Exemple d'analyse des mesures

Mesures effectuées entre les points E et F : diaphragme

Paramètres :

$T : 20\text{ }^{\circ}\text{C}$     $D_E : 21\text{ mm}$     $D_F : 12\text{ mm}$     $v : 10^{-6}\text{ m}^2.\text{s}^{-1}$     $\rho : 1000\text{ kg.m}^{-3}$

$Q_{exp}$ (L/h)	$\Delta P_{E-F}$ (mbar)	$\Delta P_{E-F}$ (Pa)	$Q_{theo}$ (L/h)
400	9	900	358
600	21	2100	547
800	39	3900	746
1000	61	6100	933
1200	86	8600	1108
1400	127	12700	1346
1600	169	16900	1553
1800	212	21200	1739
2000	266	26600	1948
2200	316	31600	2123
2400	381	38100	2331

Formules de calcul :

$$Q_{théo} = Cc \frac{S_1}{\sqrt{\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 - 1}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

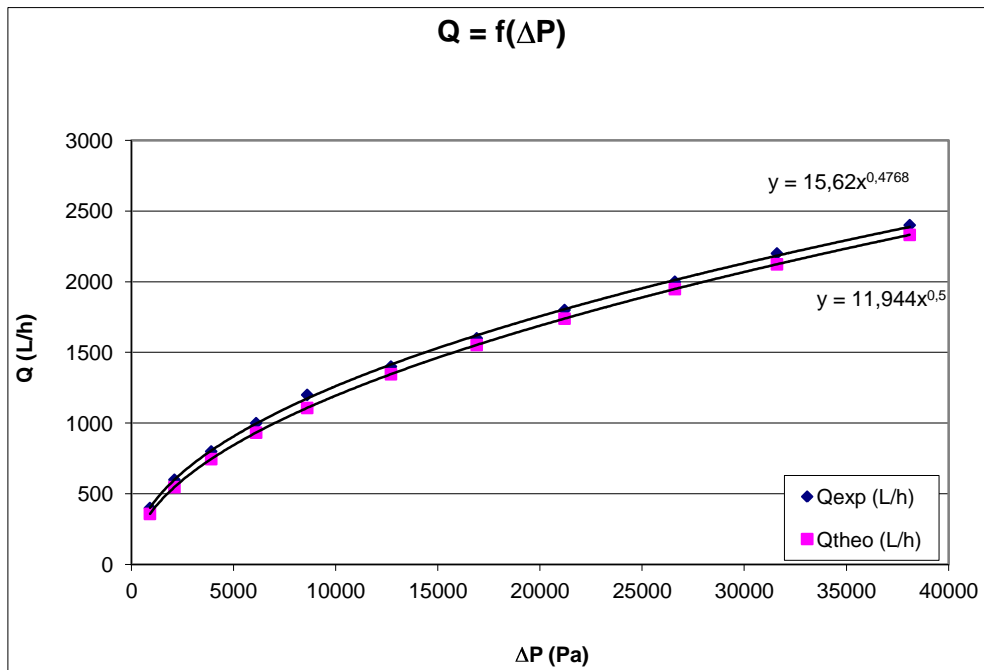
Avec  $Q_{théo}$  : débit théorique en  $m^3.s^{-1}$   
 $S_2$  : section du rétrécissement en  $m^2$   
 $S_1$  : section de la canalisation en  $m^2$   
 $\Delta P$  : perte de charge en Pa  
 $\rho$  : masse volumique en  $kg.m^{-3}$

Et  $Cc$  est un coefficient de contraction proche de 0,62

On trouve

$K_{théo} = 3,32.10^{-6}$  pour un débit en  $m^3.s^{-1}$   
 $K_{théo} = 11,94$  pour un débit en L/h

Courbe obtenue :



### 3.6 ORGANE DEPRIMOGENE : VENTURI

#### OBJECTIF

Vérifier par des mesures, l'existence d'une perte d'énergie lorsque le fluide passe à travers un venturi et vérifier la corrélation entre perte de charge et débit pour valider l'utilisation du venturi comme instrument de mesure du débit.

Nature de l'élément	Diamètre (mm)	Numéro de piquages
Venturi	$d_1=21, d_2=12$	G-H

#### 3.6.1 Expression théorique du débit

Le venturi est un appareil permettant de connaître le débit du fluide parcourant un circuit hydraulique. Le liquide utilisé dans le banc est de l'eau. C'est un fluide incompressible. Le débit d'eau est donc le même à travers toutes les sections des tubes ce qui se traduit par l'équation de continuité suivante :

$$Q = S_G V_G = S_H V_H$$

Avec  $Q$  : débit en  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 $S_G$  et  $S_H$  : sections en  $\text{m}^2$   
 $V_G$  et  $V_H$  : vitesses en  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Le débit se déduit du différentiel de pression mesuré sur les deux diamètres à l'aide des formules suivantes :

$$Q_{théo} = Cc \frac{S_G}{\sqrt{\left(\frac{S_G}{S_H}\right)^2 - 1}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

Avec  $Q_{théo}$  : débit théorique en  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$   
 $S_H$  : section du rétrécissement en  $\text{m}^2$   
 $S_G$  : section de la canalisation en  $\text{m}^2$   
 $\Delta P$  : perte de charge en Pa  
 $\rho$  : masse volumique en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Et  $Cc$  est un coefficient de contraction proche de 0,98

De manière plus générale,  $Q = K\sqrt{\Delta P}$



### 3.6.2 Détermination de la perte de charge

#### Mesures expérimentales de la perte de charge

Effectuer les mesures des pertes de charges au niveau du Venturi pour des valeurs de débit lues au rotamètre.

Débit (L/h)	$\Delta P_{G-H}$ (mbar)
400	4
600	9
800	17
1000	28
1200	39
1400	51
1600	69
1800	85
2000	105
2200	127
2400	152
2600	178
2800	208

Débit (L/h)	$\Delta J_{G-H}$ (mmCE)
300	29
400	43
500	66
600	95
700	131
800	172
900	223
1000	279
1100	334
1200	403
1300	467
1400	531
1500	617

#### Exploitation des résultats

Tracer la courbe  $Q_{exp} = f(\Delta P)$  avec  $Q_{exp}$ , débit lu au rotamètre. Observer que la courbe est une parabole d'axe horizontal.

Déterminer le  $K_{exp}$ .

Calculer la valeur de  $K_{théo}$  et calculer les valeurs de  $Q_{théo}$  pour les valeurs de  $\Delta P$  mesurées. Tracer la courbe  $Q_{théo} = f(\Delta P)$  sur le même graphique que précédemment.

Comparer les deux courbes.

Le venturi peut-il être considéré comme un appareil de mesure de débit ?

### 3.6.3 Exemple d'analyse des mesures

Mesures effectuées entre les points G et H : venturi

Paramètres :

$T : 20\text{ }^{\circ}\text{C}$      $D_G : 21\text{ mm}$      $D_H : 12\text{ mm}$      $v : 10^{-6}\text{ m}^2.\text{s}^{-1}$      $\rho : 1000\text{ kg.m}^{-3}$

$Q_{exp}$ (L/h)	$\Delta P$ (mbar)	$\Delta P$ (Pa)	$Q_{theo}$ (L/h)
400	4	400	378
600	9	900	566
800	17	1700	778
1000	28	2800	999
1200	39	3900	1179
1400	51	5100	1348
1600	69	6900	1568
1800	85	8500	1741
2000	105	10500	1935
2200	127	12700	2128

2400	152	15200	2328
2600	178	17800	2519
2800	208	20800	2723

Formules de calcul :

$$Q_{théo} = Cc \frac{S_1}{\sqrt{\left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 - 1}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

Avec  $Q_{théo}$  : débit théorique en  $m^3.s^{-1}$   
 $S_2$  : section du rétrécissement en  $m^2$   
 $S_1$  : section de la canalisation en  $m^2$   
 $\Delta P$  : perte de charge en Pa  
 $\rho$  : masse volumique en  $kg.m^{-3}$

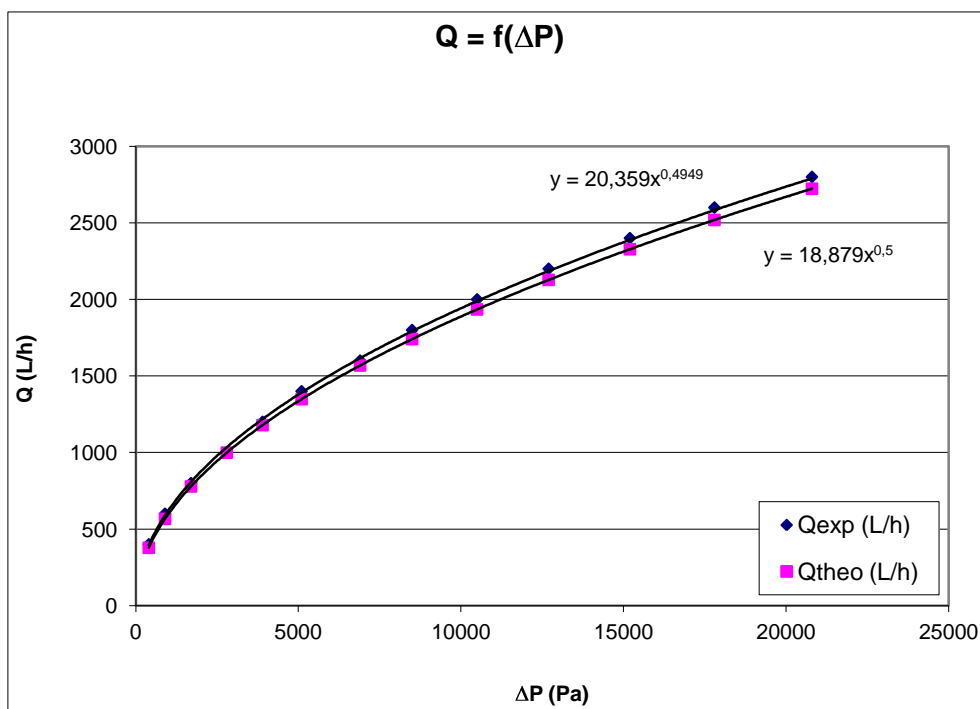
Et Cc est un coefficient de contraction proche de 0,98

On trouve

$K_{théo} = 5,24.10^{-6}$  pour un débit en  $m^3.s^{-1}$

$K_{théo} = 18,879$  pour un débit en L/h

Courbe obtenue :



### 3.7 ETUDE DES VANNES

#### OBJECTIF

Cette expérience a pour objet de déterminer la relation entre le coefficient de perte de charge  $K_v$  d'une vanne et le débit dans cette vanne. Cette relation sera étudiée pour une vanne à membrane, une vanne à boisseau sphérique et une vanne à opercule.

Nature de l'élément	Diamètre (mm)	Numéro de piquages
Vanne à boisseau sphérique	DN15-di=20	A-B
Vanne à membrane	DN15-di=20	B-C
Vanne laiton à opercule	DN15-di=20	C-D

#### 3.7.1 Détermination de la perte de charge

##### Expression de la perte de charge

Pour une vanne, la perte de charge peut être exprimée sous la forme

$$\Delta J = K_v \frac{V^2}{2g}$$

Avec  $K_v$ , coefficient de perte de charge de la vanne.

##### Mesures expérimentales de la perte de charge

Pour différentes valeurs de débit, relever les différences de pressions entre l'entrée et la sortie des vannes.

Débit (L/h)	$\Delta P_{A-B}$ (mbar)	$\Delta P_{B-C}$ (mbar)	$\Delta P_{C-D}$ (mbar)
400	2,0	14,8	4,6
600	4,3	28,4	9,1
800	7,0	52,6	15,5
1000	11,5	86,9	25,0
1200	15,8	116,7	34,5
1400	21,4	154,8	44,5
1600	27,2	197,2	56,4
1800	33,5	247,2	70,1
2000	41,5	295,3	85,3

##### Exploitation des résultats

En reprenant la formule  $\Delta J = K_v \frac{V^2}{2g}$ , calculer le coefficient  $K_v$  pour chacune des vannes pour une valeur de débit donnée.

Exemple pour  $Q=1000$  L/h

$$K_{A-B} = 2,7$$

$$K_{B-C} = 18,5$$

$$K_{C-D} = 5,6$$

En déduire quelle est la vanne qui occasionne le plus de perte de charge.

Tracer les courbes représentatives du coefficient de perte de charge en fonction du débit pour chaque vanne.

### 3.7.2 Exemple d'analyse des mesures

Mesures effectuées entre les points B et C : vanne à membrane  $d_i=20$  mm

Paramètres :

$T : 28\text{ }^{\circ}\text{C}$      $d_i : 20\text{ mm}$      $v : 10^{-6}\text{ m}^2.\text{s}^{-1}$      $\rho : 1000\text{ kg.m}^{-3}$     Vanne ouverte totalement

Débit (L/h)	V (m/s)	$\Delta P_{B-C}$ (mbar)	$\Delta J$ (mm)	Kv
400	0,354	12	122	19,2
600	0,531	25	255	17,8
800	0,707	47	479	18,8
1000	0,884	74	754	18,9
1200	1,061	106	1081	18,8
1400	1,238	141	1437	18,4
1600	1,415	185	1886	18,5
1800	1,592	230	2345	18,2
2000	1,768	280	2854	17,9

Formules de calcul :

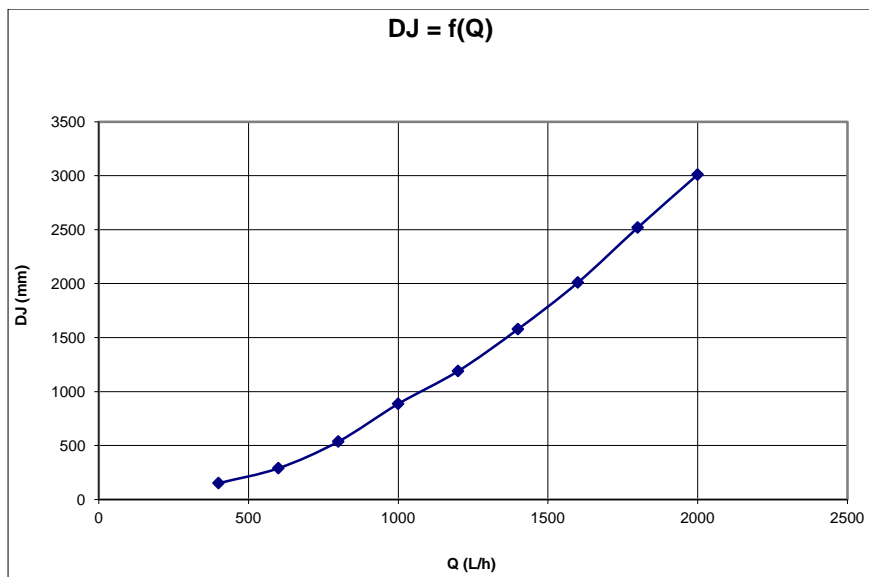
$$V = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2} \text{ avec } Q \text{ en } \text{m}^3.\text{s}^{-1}, D \text{ en m et } V \text{ en } \text{m}.\text{s}^{-1}.$$

$$\Delta J = \frac{\Delta P}{\omega} \text{ avec } \Delta P \text{ en Pa ou } \text{kg}.\text{m}^{-1}.\text{s}^{-2}, \omega \text{ en } \text{kg}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-2} \text{ et } \Delta J \text{ en m.}$$

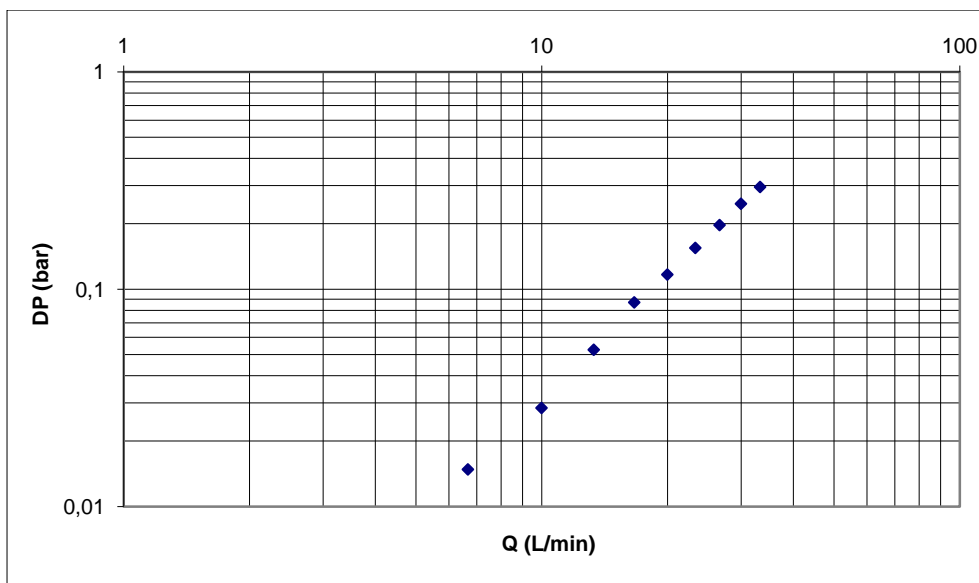
Pour calculer Kv :

$$\Delta J = K_v \frac{V^2}{2g} \text{ avec } V \text{ en } \text{m}.\text{s}^{-1}, g \text{ en } \text{m}.\text{s}^{-2}, \Delta J \text{ en m et } \zeta \text{ sans dimension.}$$

Courbe obtenue :



Ou bien en affichage logarithmique :



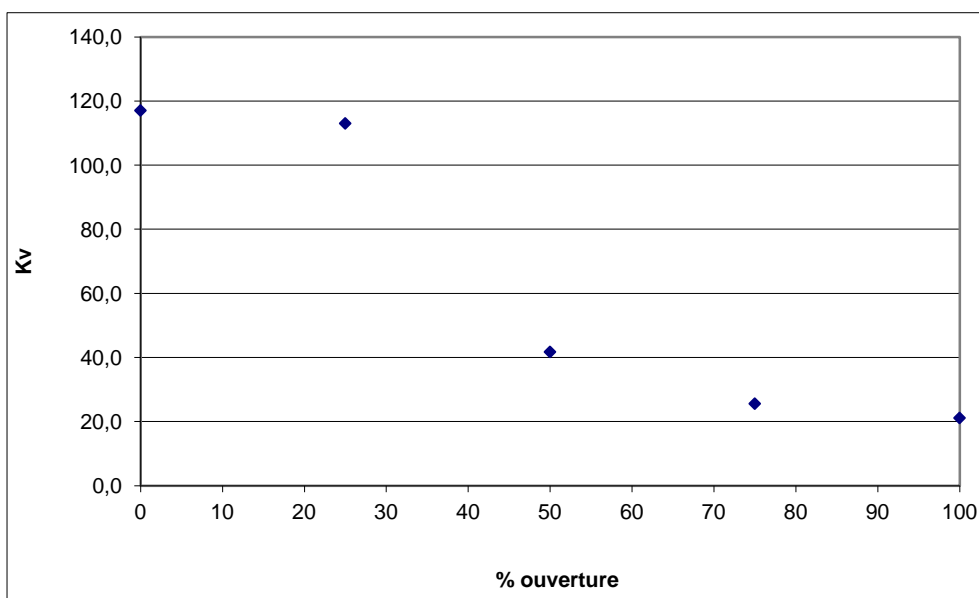
Il est également possible d'étudier la variation de perte de charge en fonction du pourcentage d'ouverture de la vanne.

Pour nous, le pourcentage d'ouverture correspond au nombre de tours effectués sur le nombre total de tours que l'on peut effectuer pour passer de l'état fermé à l'état ouvert.

Relevés effectués pour un débit de 1500 L/h sur la vanne à membrane :

% ouverture	$\Delta P$ (mbar)	$\Delta J$ (mm)	Kv
0	1029,4	10493	117,0
25	994,0	10132	113,0
50	367,0	3741	41,7
75	225,0	2293	25,6
100	185,8	1893	21,1

Soit sous forme graphique :



### **3.8 BIBLIOGRAPHIE**

#### ***DYNAMIQUE DES FLUIDES***

Mécanique expérimentale des fluides tome 1 (fluides non visqueux) :  
COMOLET, Masson

Mécanique expérimentale des fluides tome 2 (fluides réels) :  
COMOLET, Masson

Hydraulique pour l'adduction des eaux : M. VAUCLIN, J.L. THONY,  
J. HAMBURGER, J.P. CHOLLET, Presses universitaires de Grenoble.

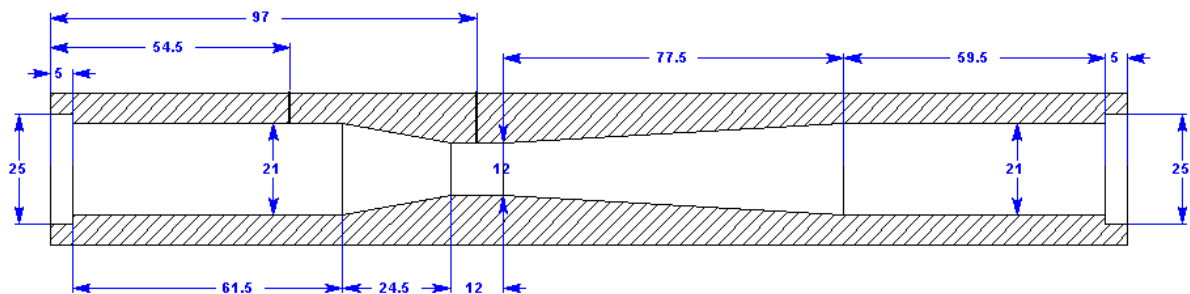
Hydraulique pratique :  
Christian ROUX, Pyc Edition

Les cahiers techniques : FONDATION DE L'EAU , Ministère de l'Environnement.

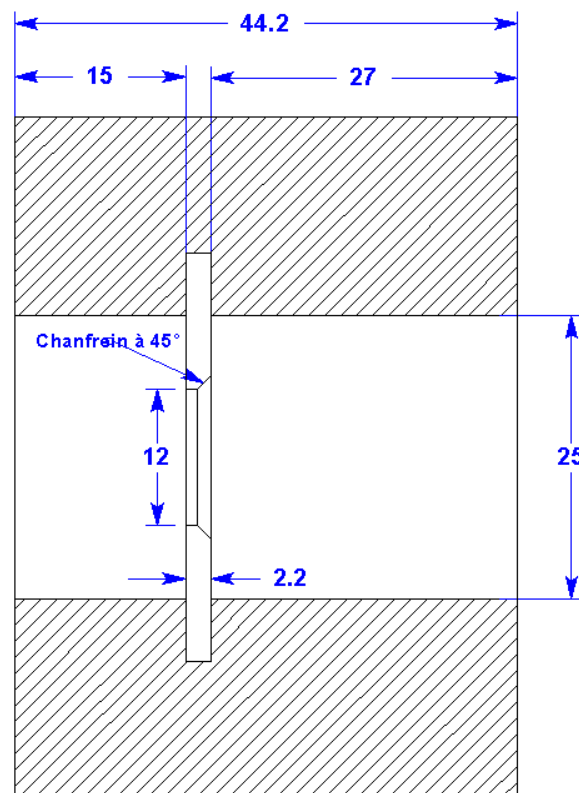
Mémento d'hydraulique pratique : J. VALEMBOIS, Collection de la  
Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France.

## 4 DOSSIER TECHNIQUE

### 4.1 SCHEMA DU VENTURI



### 4.2 SCHEMA DU DIAPHRAGME







### **4.3 POMPE**

Pompe centrifuge LOWARA CEAM70/3/A (0,37kW – 230V – 2,72A / 20,1 – 12,8 mCE / 30 – 80 L/min)



#### **4.4 DEBITMETRES**

Indicateur de débit plastique en PVC BAMO IDP P46275 (30-300 L/h)

Indicateur de débit plastique en PVC BAMO IDP P46285 (300-3000 L/h)

