

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

8/98

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT HYDRAULIQUE



DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR  
D'ETAT EN HYDRAULIQUE

## THEME

CONCEPTION  
ET  
REALISATION  
D'UN  
MINI-LABORATOIRE  
HYDRAULIQUE



Proposé et dirigé par :  
Mr MOULOUDI Yahya

Etudié par :  
Mr *BIDI Nezar*  
Mr *OUAGUINI Abderrahmane*

Promotion 98

ADRESSE / 10 Avenue Hacer Badi EL HARRACH

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

*MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR*

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT HYDRAULIQUE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

**MEMOIRE**

**DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR  
D'ETAT EN HYDRAULIQUE**

## **THEME**

**CONCEPTION  
ET  
REALISATION  
D'UN  
MINI-LABORATOIRE  
HYDRAULIQUE**



Proposé et dirigé par :  
Mr MOULOUDI Yahya

Etudié par :  
Mr *BIDI Nezar*  
Mr *OUAGUINI Abderrahmane*

**Promotion 98**

**ADRESSE / 10 Avenue Hacen Badi EL HARRACH**

# REMERCIEMENTS

Nous remercions sincèrement Monsieur Y.MOULOUDI notre promoteur qui nous a aidé et conseillé durant la réalisation de cette présente thèse.

En outre, nous voudrions remercier les enseignants du département hydraulique pour leur aide qui nous a été bénéfique.

Nous tenons à remercier en particulier Monsieur SAID.

En fin, nous remercions M<sup>lle</sup> OUAGUENOUNI HIND de toute la peine quelle s'est donnée pour écrire cette thèse.

# DEDICACE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents

Mes sœurs et frères

Et tous ceux que j'aime.

NEZAR.

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents

Mes deux sœurs et mes deux frères

Mes oncles Maternel et Paternel

Et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

ABDERRAHMANE.

# PREFACE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

C'est devenu un lieu commun de dire que la mesure est à la base de toute science est de tout technique mais on ne dira jamais assez combien la pratique en est difficile cela est particulièrement vrai de la mesure en hydraulique ou la particule fluide échappe à l'étreinte de l'appareil comme au regard de l'observateur.

En hydraulique on a affaire, en général, à des ouvrages de très grandes dimensions, ou l'ingénieur est toujours ramené, dans la conception d'ouvrages, comme dans la recherche scientifique à combiner entre la fiabilité des résultats et le coût économique, d'où la nécessité d'effectuer des essais sur des modèles de dimensions réduites au minimum compatibles avec les exigences de la similitude pour avoir une très forte réduction de prix et un gain de temps considérable.

# INTRODUCTION



La présente étude a pour but, la reproduction du laboratoire hydraulique de l'école nationale polytechnique en échelle réduite et l'aménager en vue des essais sur modèles.

Ce mini-laboratoire étant une maquette, ne permet pas d'étudier un phénomène physique bien déterminé, puisque les lois de la similitude ne sont pas prises en compte, mais surtout de bien visualiser le fonctionnement d'un laboratoire hydraulique en circuit fermé.

La dite étude permet de définir le domaine des laboratoires hydrauliques en premier lieu, et de montrer les différentes parties du mini-laboratoire, leur fonctionnement et les lois qui régissent certaines parties comme le groupe motopompe, le siphon, auto-nivellateur et les débitmètres à section rétrécie sous forme de segments, et enfin effectuer des essais sur les débitmètres à sections rétrécies pour établir pour chaque débitmètre une abaque définissant la plage des débits dans laquelle les résultats obtenus sont précis, fidèles et fiables.

# SOMMAIRE

## **CHAPITRE I**

### GENERALITE SUR LES LABORATOIRES HYDRAULIQUES.....1

- 1 – Type de laboratoires hydrauliques.....1
- 2 – Equipement d'un laboratoire hydraulique.....1
- 3 – Les principes généraux pour l'étude d'un projet de laboratoire hydraulique...2

## **CHAPITRE II**

### CARACTERISTIQUE HYDRAULIQUE DU LABORATOIRE DE L'ENP.....3

## **CHAPITRE III**

### DESCRIPTION SOMMAIRE D'UN MINI-LABORATOIRE.....5

## **CHAPITRE IV**

### DESCRIPTION DETAILLEE DU MINI-LABORATOIRE :.....7

- 1- Réservoir (bac d'alimentation).....7
- 2- La pompe :.....7
  - 2-1 Type de la pompe utilisée et ses caractéristiques.....8
  - 2-2 Principe de fonctionnement de la pompe.....9
  - 2-3 Caractéristiques de la pompe.....9
  - 2-4 Démarrage de la pompe.....10
  - 2-5 Théorie d'une pompe centrifuge.....10bis.
  - 2-6 Théorème de BENOULLI.....10
    - 2-6-1 Théorème de BERNOULLI  
au mouvement relatif pour une rotation uniforme.....12
    - 2-6-2 Application au mouvement du fluide à l'intérieur  
de la roue d'une pompe centrifuge.....14

3- Château d'eau.....	17
4- Siphon autonivellateur.....	18
4-1 Description.....	18
4-2 Principe général de fonctionnement d'un siphon.....	19
4-3 Fonctionnement du siphon autonivellateur.....	20
4-4 Comparaison entre l'utilisation du siphon autonivellateur et d'un trop plein dans notre projet.....	21
5- Boite parallépipédique.....	21
6- Les vannes.....	23
7- Dispositif de mesure des débits.....	24
7-1 Mesure des débits.....	24
7-2 Classification des méthodes de détermination des débits.....	25
7-3 Appareil de mesure.....	26
7-4 Dispositif de mesure à étranglement.....	26
7-5 Théorème de BERNOULLI.....	29
7-6 Etablissement de l'équation de BERNOULLI.....	29
7-7 Venturimètre .....	32
7-8 Débitmètre à section rétrécie en forme de segment.....	35
7-9 Les manomètres différentiels.....	37
7-9-1 définition.....	37
7-9-2 Mesure d'une pression par un piézomètre.....	39

## CHAPITRE V

ESSAIS, RESULTATS, ET INTERPRETATIONS.....	40
--	----



# CHAPITRE I

## **GENERALITE SUR LES LABORATOIRES :**

### **1-Types de laboratoire hydraulique :**

Un laboratoire hydraulique est un ensemble d'installations, de dispositifs et d'appareils destinés à l'étude des phénomènes du mouvement des liquides, et selon ces domaines de recherches que les laboratoires hydrauliques sont divisés-en :

- Laboratoires des ouvrages hydrauliques
- Laboratoires des machines hydrauliques.
- Laboratoires des distributions d'eau.

Certains laboratoires sont aménagés en vue de recherches bien déterminées tel que :

- Les laboratoires d'essais sur modèles.
- Les laboratoires d'étude de la houle.
- Les bassins de carènes.

Par contre d'autres laboratoires font des études comparatives de méthodes de mesures hydrauliques.

### **2- Equipement d'un laboratoire hydraulique :**

Presque chaque laboratoire hydraulique se compose des groupes d'installations suivantes, formant un ensemble coordonné :

- Les installations alimentants les dispositifs de mesure, notamment les réservoirs surélevés, les accumulateurs hydrauliques, les turbopompes ainsi que des dispositifs de commande.
- Les conduites d'alimentations avec la robinetterie et les dispositifs de commande.
- L'installation d'essais des dispositifs de mesure hydrauliques, ainsi que les installations pour l'étude des pertes de charge dans les conduites, des phénomènes liés aux mouvements des ondes, du coup de bélier dans les conduites, des remous et du ressaut dans les canaux découverts.

- les installations pour l'épuration de l'eau de circulation et son refoulement dans les installations d'alimentations.

### **3-Principes généraux pour l'étude d'un projet de laboratoire hydraulique :**

L'étude du projet d'un laboratoire hydraulique, demande de se conformer aux suivants principes :

Les appareils, les machines et les installations hydrauliques doivent être étudiés dans les conditions qui se rapprochent des conditions de fonctionnements réelles, tant de point de vue de la pression que du débit, et étudiés aussi avec des nombres de similitudes identiques ou rapprochées des conditions réelles.

L'alimentation en eau de chacune des installations doit être suffisamment indépendante de celle des autres pour qu'une variation de pression ou de débit dans l'une de ces installations n'influe pas sur l'évolution des phénomènes dans les autres installations.

Les intervalles de variation des pressions et des débits doivent être appropriés à la destination et aux tâches du laboratoire hydraulique.

Les locaux destinés à un laboratoire hydraulique doivent répondre aux conditions suivantes :

- La superficie des locaux doit être suffisamment grande pour permettre un accès aux réservoirs et aux conduites de mesures.
- Les locaux doivent être clairs et pourvus de moyens d'éclairage suffisamment pour permettre le travail à la lumière artificielle.
- Les radiateurs doivent être disposés de manière que l'effet du rayonnement thermique sur les réservoirs jaugés ne soit pas sensible.
- Les fonds des réservoirs aval doivent être situés au-dessus des entrées dans les égouts.

# CHAPITRE II

### Caractéristiques générales du laboratoire Hydraulique de l'école :

Le laboratoire fonctionne en circuit fermé.

Les installations d'essais de laboratoire sont implantées dans un local de  $170\text{m}^2$  ( $17\text{m} \cdot 10\text{m}$ ) de surface.

La dalle du laboratoire est située à même le sol du fait de l'existence d'un bassin de pompage de profondeur utile 2m environ.

Deux pompes verticales immergées de caractéristiques :

$$Q=100 \text{ l/s}$$

$$H=7\text{m}$$

Aspirent dans un puisard en relation avec un bassin général de pompage de volume  $40\text{m}^3$  ( $10\text{m} \cdot 2\text{m} \cdot 2\text{m}$ ) et refoule dans un réservoir métallique à niveau constant par déversement disposé dans le laboratoire même.

Le château d'eau alimente une conduite générale de distribution de 250mm de diamètre.

L'aménagement de ce laboratoire est prévu dans le but de pouvoir aborder l'étude des chapitres essentiels de l'hydraulique appliquée, à savoir :

- Déversoirs.
- Orifices.
- Pertes de charges.
- Ecoulements à surface libre.

Avec la possibilité d'utiliser les principaux appareils de mesure hydrauliques que l'ingénieur peut être amené à rencontrer industriellement.

En conséquence les installations comprennent :

Un canal de mesure de largeur 600 mm permettant l'étalonnage de divers types de déversoir amovibles (Rehbock, à contraction, triangulaire, etc...) à l'aide d'une capacité jaugée.

Ce canal de mesure permet de plus le calcul du débit par mesures au moulinet.

Une installation d'essais de pertes de charge en conduites, composée de trois conduites d'essais montées en parallèle, de diamètres différents, de longueurs rectilignes, munies de prises de pressions, en position, reliée à un manomètre à tubes de verre permettant la mesure des pertes de charge linéaires et la visualisation de la ligne piézométrique.

Un canal vitré à fond horizontal, muni de deux éléments vitrés sur leurs faces latérales équipé à l'amont d'un dispositif d'alimentation avec tranquillisateurs.

Indépendamment des installations décrites, et utilisés d'ailleurs sur nombre d'entre elles, sont prévus des appareils permettant l'exécution de toutes mesures de niveaux (limnètres, manomètres simples ou différentiels), débits (venturi, déversoirs, compteurs d'eau), vitesses (moulinet, micromoulinet), pressions manomètres métalliques, balance de pression ou presse à étalonner).

# CHAPITRE III

## **Description sommaire du mini – laboratoire :**

Le but de ce projet est la reproduction du laboratoire hydraulique de l'**école nationale polytechnique** en maquette et aménagé en vu des essais sur modèles.

Ce mini-laboratoire réalisé sous forme de circuit fermé est composé des installations suivantes :

### **1-Installation d'alimentation :**

La pompe, le bassin d'alimentation et leurs dispositifs de commande (vannes).

### **2-les conduites d'alimentations :**

(réalisées en Plexiglas), et leurs dispositifs de commande.

### **3-Les dispositifs de mesure :**

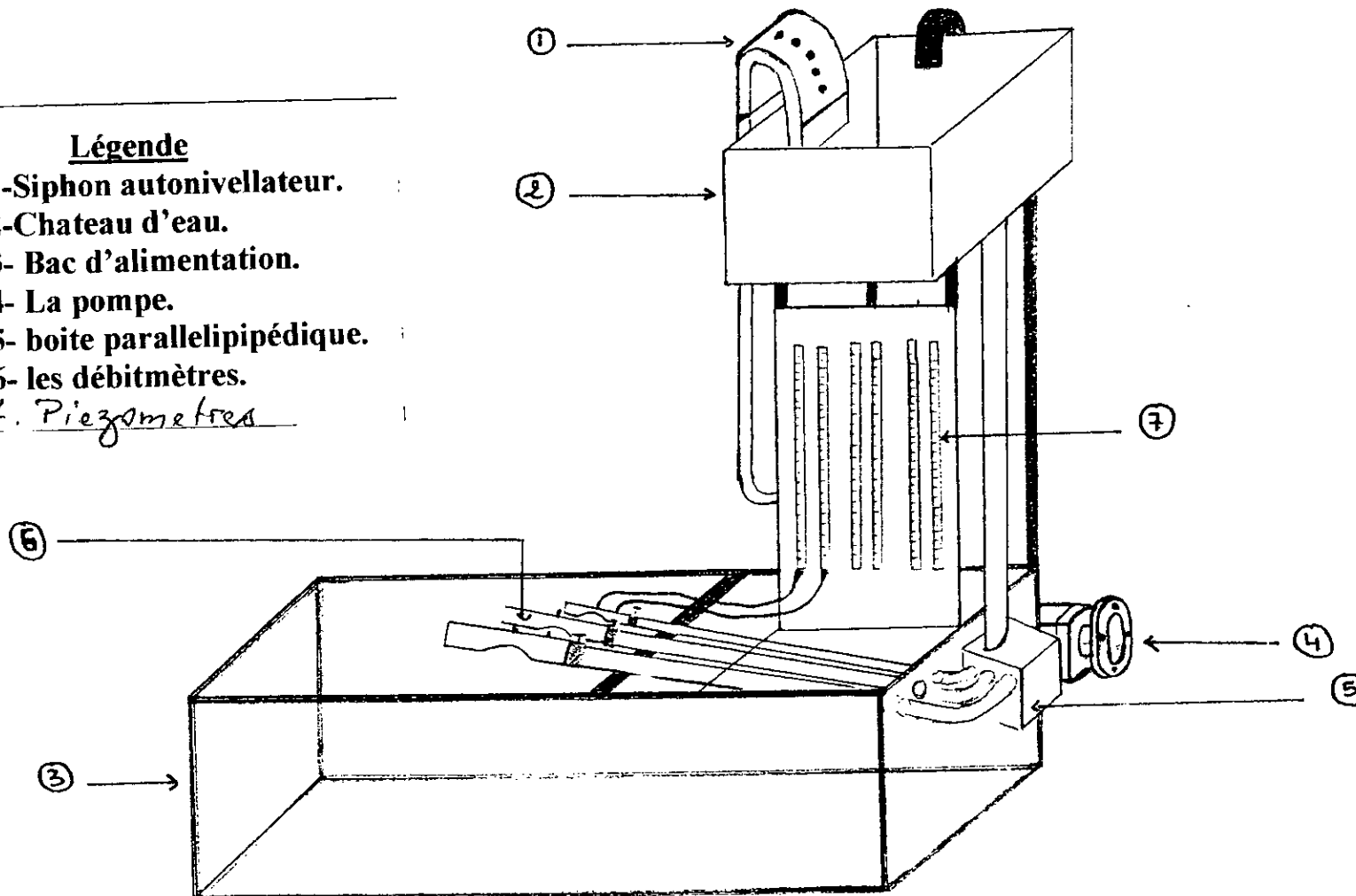
A savoir les manomètres différentiels servant à mesurer la différence de pression entre la section rétrécie et son amont dans le débitmètre.

### **4-Siphon autonivellateur :**

Qui assure le régime permanent en maintenant une charge constante au niveau du château d'eau, et qui évite tout débordement de l'eau.



- Légende**
- 1-Siphon autonivellateur.
  - 2-Chateau d'eau.
  - 3- Bac d'alimentation.
  - 4- La pompe.
  - 5- boite parallelipédique.
  - 6- les débitmètres.
  - 7. Piezometres



Le mini-Laboratoire



VUE EN PERSPECTIVE

# CHAPTER IV

## **Description détaillée du mini-laboratoire :**

### **1-le réservoir 'bac d'alimentation' :**

C'est un bassin entièrement réalisé en Plexiglas, muni d'une capacité de stockage de 328L, de dimensions :

Largeur = 82cm.

Longueur = 100cm.

Profondeur = 40cm.

Ces dimensions lui permettent d'alimenter le château d'eau (à l'aide du groupe motopompe) d'une façon continue en eau nécessaire pour les essais, et la récupérer en fin de cycle ce qui forme un circuit fermé. Ce recyclage de l'eau permet d'exécuter un très grand nombre d'essais sans interrompre le fonctionnement du mini-laboratoire.

### **2-la pompe :**

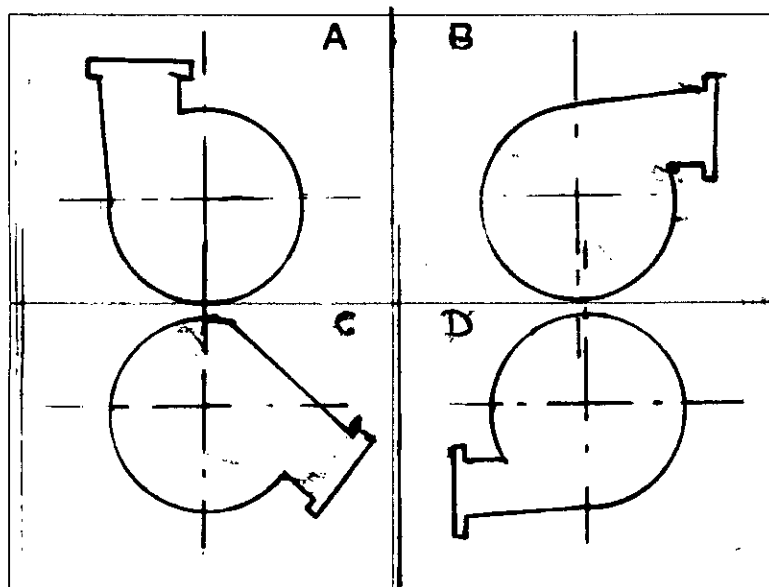
La pompe qui est du type (PMH 40 NVA 150-5) est installée à un niveau près de celui du bac d'alimentation, de telle sorte que la conduite d'aspiration soit complètement immergée pour avoir une meilleure aspiration.

Le type du mini-laboratoire et la nature des essais à exécuter imposent le choix d'une pompe centrifuge, celle-ci peut à des vitesses constantes, élever des variables tout en conservant un bon rendement.

L'installation de la pompe est faite d'une manière à ce que l'alimentation des dispositifs de mesure passe obligatoirement par le château d'eau pour éviter la transmission des vibrations causées par les impulsions des aubes de la roue de la pompe aux dispositifs de mesure.

## 2-1-type et caractéristiques de la pompe utilisée :

La pompe utilisée est une pompe monocellulaire à aspiration axiale, elle comporte un corps de pompe volute dont la tubulure de refoulement peut occuper indifféremment l'une des quatre(4) positions A, B, C ou D (position encombrement).



**Figure N°2 différentes positions de la tubulure**

Ce qui permet de répondre économiquement aux diverses conditions de raccordement des conduites de refoulement, la pièce d'aspiration est rapportée sur le corps de la pompe. L'ensemble corps-pièce d'aspiration est boulonné à un palier support fixé sur le sol commun à la pompe et au moteur.

Ce palier support comporte, pour guider l'arbre et assurer sa butée axiale, deux roulements à gorges profondes de forte capacité de charge dont la lubrification s'effectue à la graisse.

La roue à ailettes est calée sur l'arbre par emmanchement claveté, les ailettes comportent le dispositif d'équilibre des poussées axiales, constituées par un labyrinthe d'étanchéité arrière et des trous judicieusement calibrés, percés la voile près du noyau

## 2-2 principe de fonctionnement de la pompe :

De point de vue purement physique, le fonctionnement d'une pompe centrifuge consiste à ce qu'elle transforme l'énergie mécanique de son moteur d'entraînement en énergie hydraulique, en transmettant au courant liquide qu'il la traverse une puissance.

L'énergie reçue par le liquide lui permet de surmonter les pertes de charge et de s'élever jusqu'à une certaine hauteur  $H_p$ , la hauteur créée par la pompe et qui est donnée par la formule suivante :

$$H_p = (P_2/\varpi + \alpha_2 \cdot V_2^2 / (2 \cdot g)) - (P_1/\varpi + \alpha_1 \cdot V_1^2 / (2 \cdot g))$$

$P_1, P_2$  : les pressions du liquide aux deux points limites de parcours,  
(le début et la fin du parcours).

$V_1, V_2$  : les vitesses du liquide dans ces deux extrémités (1,2).

$\alpha_1, \alpha_2$  : les coefficients de correction des vitesses.

$\varpi$  : poids spécifique de l'eau =  $\rho \cdot g$

## 2-3 caractéristiques de la pompe :

Débit [l/s] :	$Q = 4.5$ l/s.
Charge [m] :	$H = 2$ m.
Vitesse de rotation [tour/min] :	$n = 1500$ trs/min
Rendement :	$e = 70$ %.

Le rendement de cette pompe tient compte de trois sortes de pertes de charges qui ont lieu dans cette pompe :

Les pertes hydrauliques dues aux frottements et à la formation de tourbillon.

Les pertes mécaniques, c'est à dire les pertes dues aux frottements mécaniques dans les paliers.

### 2-4 Démarrage de la pompe :

Lors des essais, la pompe aspire dans le bac d'alimentation et refoule dans le réservoir ou le château d'eau.

Si à l'arrêt on ne veut pas que l'eau revienne dans la conduite, il faut mettre une vanne dans la conduite de refoulement.

Pour la mise en marche, la conduite d'aspiration doit être pleine d'eau au moins jusqu'à la roue, sans quoi celle-ci tournerait à vide dans l'air, pour cela la conduite d'aspiration et le bac d'alimentation ont été disposés d'une façon à ce que la conduite soit toujours immergée, donc remplie d'eau.

### 2-6-1 Théorème de Bernoulli :

Soit le système de pompage suivant :

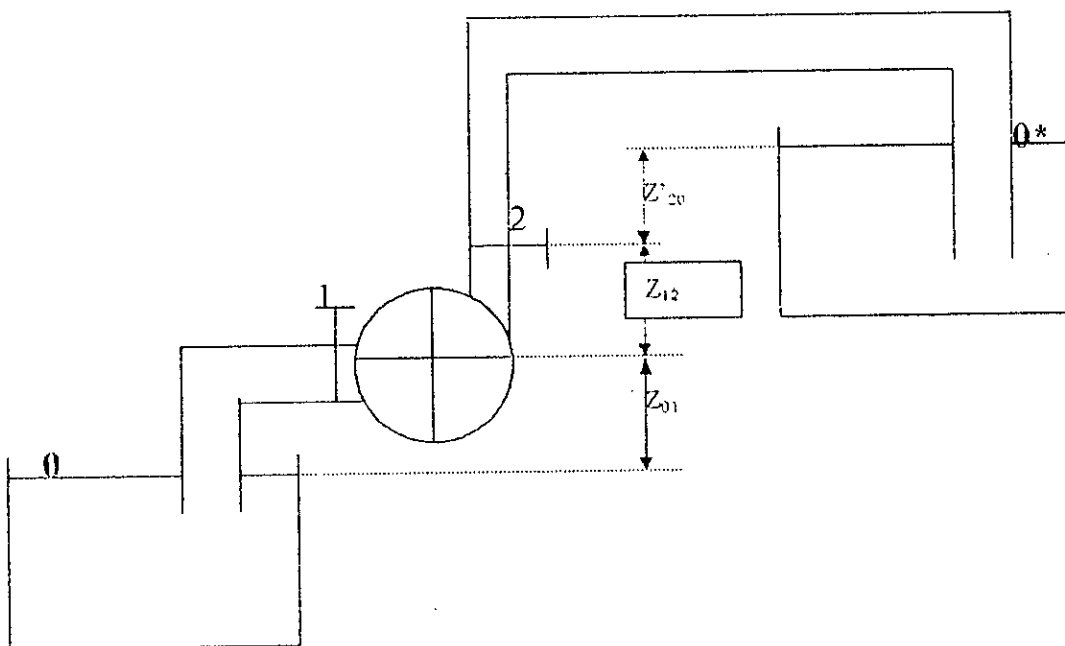


Figure N°3 système de pompage

Soit les points : 0,1,2,0\* des points fixés dans l'appareillage, ces points sont traversés par le fluide pompé de façon continue.

### **2-5- Théorie d'une pompe centrifuge :**

Une pompe centrifuge tourne sous l'action d'un couple moteur appliqué sur son axe, qui transforme la vitesse de l'eau en une pression.

Une pompe centrifuge se compose d'une roue mobile munie d'aubes sur son pourtour et d'un diffuseur qui est une roue fixe munie d'aubes directrices et dont la courbure est inverse de celle des précédentes.

L'ensemble est enfermé dans une bache en forme de spirale qui forme le corps de la pompe.

L'eau arrive au bief-aval par un tuyau d'aspiration et pénètre latéralement par une ouïe dans la roue ( au centre de celle ci et perpendiculaire à son plan ).

Elle est projetée vers le périphérique où elle acquit une grande vitesse en même temps que ce produit vers le centre une dépression qui entretient l'aspiration dès que la pompe est amorcée.

L'eau traverse ensuite le diffuseur dont les canaux vont en s'élargissant vers l'extérieur et où elle abandonne la plus grande partie de sa vitesse qui se transforme en pression.

Elle est enfin recueillie par la bache et pénètre dans le tuyau de refoulement où elle monte jusqu'à une hauteur égale à celle représentant la pression qu'elle a acquise.

La roue doit être tournée d'autant plus vite que la hauteur d'élévation est plus grande.



En appliquant le théorème de Bernoulli entre 0 et 1 : nous aurons :

$$Z_0 + P_0/\varpi + V_0^2/(2.g) = Z_1 + P_1/\varpi + V_1^2/(2.g) + \Delta h_{01} \quad (1)$$

$P_0$  : la pression atmosphérique que nous prendrons comme origine des pressions.

$V_0$  : la vitesse à la surface libre du réservoir, qui est négligeable.

$h_0$  : la perte de charge entre 0 et 1.

Nous aurons alors :

$$Z_1 + P_1/\varpi + V_1^2/(2.g) = Z_0 - \Delta h_{01} \quad (2)$$

Entre 2 et 0\* nous avons :

$$Z_2 + P_2/\varpi + V_2^2/(2.g) = Z'_0 + P'_0/\varpi + V_0'^2/(2.g) + \Delta h_{201} \quad (3)$$

$P_0^* = P_0$  (origine des pressions).

$V_0^* = V_0$  (vitesse négligeable).

Enfin :

$$Z_2 + P_2/\varpi + V_2^2/(2.g) = Z'_0 - \Delta h_{201} \quad (4)$$

En appliquant  $E_1$  et  $E_2$  les énergies totales de l'unité de poids du fluide à l'entrée et à la sortie de la pompe, nous aurons la relation suivante :

$$E_1 - E_2 = (Z'_0 + Z_0) + (\Delta h_{201} + \Delta h_{01}) \quad (5)$$

C'est la différence d'énergie entre la sortie et l'entrée de la pompe.

Cette énergie est celle fournie à la roue par le moteur, elle représente la hauteur d'élévation de la pompe.

### 2-6-2 Théorème de Bernoulli en mouvement relatif pour une rotation uniforme :

Considérons le mouvement relatif d'un fluide par rapport aux aubes mobiles comme mouvement permanent, nous pouvons alors compte tenu de cette circonstance appliquer à un filet fluide une généralisation du théorème de Bernoulli.

Au cas du mouvement relatif, le mouvement d'entraînement est une rotation uniforme.

De ce fait l'accroissement de l'énergie d'une particule est égal au travail des forces agissant sur elle.

Dans le cas présent ce travail est surtout celui des forces de pression

Le travail des forces de pesanteur étant en général négligeable à la traversée d'une roue de turbomachine.

Ceci donne :

$$D(V^2/2) + dP/\rho = 0 \quad (6)$$

D'après les théorèmes généraux de la mécanique sur le mouvement relatif, nous savons que l'application des mêmes équations qu'en mouvement absolu est possible, mais en ajoutant aux forces qui agissent sur système, deux forces fictives :

La première est la force d'inertie du mouvement d'entraînement.

La seconde est la force dite de coriolis dont l'expression est :

$$2\vec{\omega} \wedge \vec{W} \quad (7)$$

Dans laquelle  $\omega$  est la vitesse de rotation instantanée du mouvement d'entraînement et  $W$  la vitesse relative de la particule considérée ! La force de coriolis est à la fois perpendiculaire à  $\omega$  et  $W$ .

Dans un mouvement de rotation uniforme, la force d'inertie d'entraînement est la force centrifuge. C'est à dire  $U_2/r$  par unité de masse.

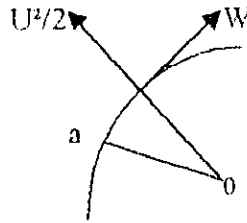


Figure N°4 triangle des vitesses

Considérons une ligne de courant, en mouvement relatif permanent et la vitesse relative correspondants  $W$ ,

En appliquant le théorème des forces vives à un intervalle infinitésimal  $[a b]$ , la variation de l'énergie cinématique est.

Le travail des forces comprend celui des forces de pression comme dans le cas du mouvement absolu. Celui des forces centrifuges et celui de la force centrifuge est :

$$U^2/r - dr = d(U^2/2) \quad (8)$$

$U$  : vitesse d'entraînement

Le travail de coriolis est nul, celui-ci étant en tout point perpendiculaire à  $W$  et nous aurons donc :

$$d(W^2/2) = -dP/\rho + d(U^2/2) \quad (9)$$

$$D'où : \quad d(W^2 - U^2)/2 + dP/\rho = 0 \quad (10)$$

C'est l'expression du théorème de Bernoulli en mouvement relatif, dans le cas d'une rotation uniforme pour un fluide parfait :

$$d(W^2 - U^2)/(2.g) + P/\varpi = C^{te} \quad (11)$$

La force de pesanteur est négligée.

Pour un fluide réel entre deux points 1 et 2 successifs dans le sens du courant, cas de la roue d'une pompe :

$$((W_1^2 - U_1^2)/(2.g) + P_1/\varpi) - ((W_2^2 - U_2^2)/(2.g) + P_2/\varpi) = \Delta h_{12} \quad (12)$$

$\Delta h_{12}$  : étant les pertes de charges entre ces deux points

**2-6-3 Application au mouvement du fluide à l'intérieur de la roue d'une pompe centrifuge :**

Nous désignons par :

V : les vitesses absolues.

W : les vitesses relatives.

U : les vitesses d'entraînement.

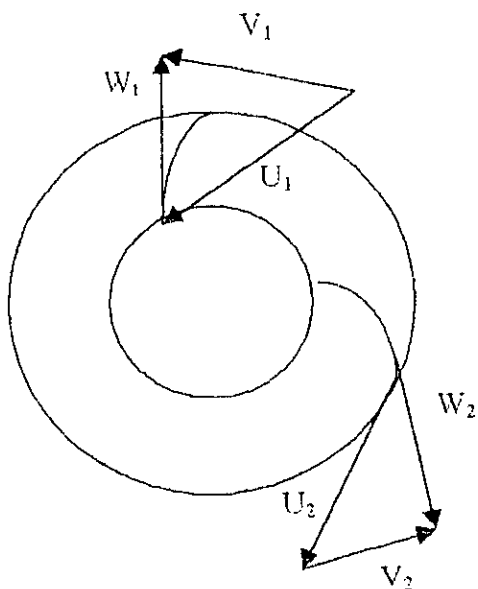


Figure N°5 triangles des vitesses

A l'entrée et à la sortie de la roue, ces vitesses forment deux triangles appelés triangles des vitesses :

$$\vec{V}_1 = \vec{W}_1 + \vec{U}_1 \quad (13)$$

$$\vec{V}_2 = \vec{W}_2 + \vec{U}_2 \quad (13')$$

En appliquant le théorème de Bernoulli en mouvement relatif entre l'entrée et la sortie de la roue, et en négligeant l'influence de la pesanteur, nous aurons :

$$\frac{((W_1^2 - U_1^2)/(2.g) + P_1/\rho)} = \frac{((W_2^2 - U_2^2)/(2.g) + P_2/\rho)} - \Delta h_{12} \quad (14)$$

Dans les triangles des vitesses, nous avons la relation géométrique :

$$W^2 = U^2 + V^2 - 2 \cdot \cos \alpha \quad (15)$$

D'où

$$V_2^2/(2 \cdot g) - (U_2 \cdot V_2 \cdot \cos \alpha_2)/g + P_2/\rho = V_1^2/(2 \cdot g) - (U_1 \cdot V_1 \cdot \cos \alpha_1)/g + P_1/\rho + \Delta h_{12} \quad (16)$$

A la roue nous avons :

$$E_2 - E_1 - \Delta h_{12} = 1/g \cdot (U_2 \cdot V_2 \cdot \cos \alpha_2 - U_1 \cdot V_1 \cdot \cos \alpha_1) \quad (17)$$

$E_2 - E_1 = \Delta h_{12}$  est la hauteur de charge H, mais si les pertes de charges sont enlevées la hauteur théorique devient :

$$H_{th} = 1/g \cdot (U_2 \cdot V_2 \cdot \cos \alpha_2 - U_1 \cdot V_1 \cdot \cos \alpha_1) \quad (18)$$

C'est l'expression du théorème d'Euler appliqué à la roue centrifuge.

En absence de prérotation ( $\alpha_1 = 90$ ), c'est le cas pour la pompe, et la formule devient :

$$H_{th} = 1/g \cdot U_2 \cdot V_2 \cdot \cos \alpha_2 \quad (19)$$

avec

$$V_2 \cdot \cos \alpha_2 = V_{2n} \quad (20)$$

$$H_{th} = 1/g \cdot U_2 \cdot V_{2n} \quad (20')$$

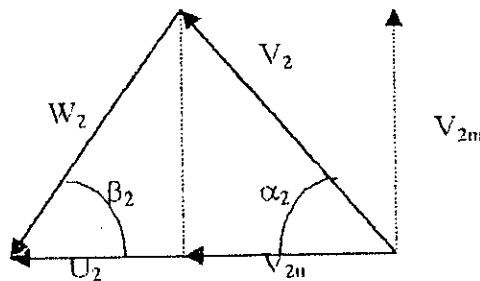


Figure N°5 triangles des vitesses

$$\operatorname{tg} \beta_2 = (V_2 \cdot \sin \alpha_2) / (U_2 - V_{2n}) \quad (21)$$

$$U_2 - V_{2u} = V_{2m} / \operatorname{tg} \beta_2 \quad (22)$$

Ce qui donne

$$H_{th} = 1/g \cdot U_2 \cdot (U_2 - V_{2m} / \operatorname{tg} \beta_2) \quad (22')$$

Données relevées sur le dessin de la roue :

$\beta_2 = 14$  (angle d'inclinaison de l'aube).

$r_2 = 75$  mm (rayon extérieur de la roue).

$b_2 = 4.5$  mm (largeur de la roue à  $d = 150$  mm).

$\eta = 6$  (nombre d'aubes).

Nous avons :

$$V_{2m} = Q / (2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot b_2 \cdot k_2) \quad (23)$$

avec

$$k_2 = 1 - (\eta e_2 / 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \sin \beta_2) \quad (24)$$

$$U_2 = \pi \cdot D_2 \cdot N / 60 \quad (25)$$

$H_{th} = 52.9 - 6362.6 \cdot Q$  [équation d'une droite].

$Q = 0$        $H_{th} = 52.9$  m [hauteur manométrique maximale].

$H_{th} = 0$        $Q_m = 29.9$  m<sup>3</sup>/h [débit maximal].

La courbe  $H_{th} = F(Q)$  peut être tracée après le calcul des pertes de charges.

### **Remarques :**

Depuis leurs apparitions, les pompes centrifuges ont subi plusieurs modifications et se sont beaucoup développées, et nous pouvons dire qu'elles conviennent aujourd'hui pour tous les usages.

Elles présentent beaucoup d'avantages par rapport aux autres systèmes.

Elles peuvent à des vitesses constantes, élever des débits très variables, tout en conservant un bon rendement.

N'ayant pas de joints elles conviennent même pour des eaux boueuses.

Elles sont très robustes, et leurs usures sont lentes car tournant toujours dans le même sens, les effets d'inertie si fâcheux dans les machines alternatives ne se produisent pas.

Elles sont moins encombrantes que les pompes à piston.

Enfin, elles ont à débit et vitesse angulaire constante un couple résistant rigoureusement constant.

### **3- château d'eau :**

C'est un réservoir surélevé assurant les conditions constantes d'alimentation des installations, moyennant une charge constante.

Il comporte un orifice au fond, qui à l'aide d'une conduite en Plexiglas verticale, permet d'évacuer l'eau vers les dispositifs de mesures. Ce réservoir peut être utilisé aussi, dans les essais de réception de pompes centrifuges, pour des débits égaux ou inférieurs aux débits d'équilibre entre l'eau pompée et l'eau évacuée par l'orifice, sans l'utilisation de siphon autonivellateur.

Le débit sortant de l'orifice est calculé par la formule :

$$Q = \mu (2.g.h)^{1/2} . s \quad (22)$$

Où :

S : la section libre du dispositif d'étranglement de sortie.

$\mu$  : le coefficient de débit qui tient compte de la réduction du débit due au frottement et à la contraction du jet et qui dépend surtout de la hauteur h de remplissage.

### **Remarque :**

Dans notre cas nous n'avons pas pu utiliser le réservoir comme tel à cause des grands débits pompés qui mettaient toujours en fonction le siphon autonivellateur.

### **4-Siphon autonivellateur :**

Le siphon autonivellateur est d'une importance très grande dans le mini-laboratoire. Il est le régulateur du niveau, assure le régime permanent, et évite au château d'eau tout débordement.

Il est totalement réalisé en Plexiglas, matière relativement facile à modeler, et se compose de :

-d'une conduite à profil réctangulaire en forme de siphon.

-D'un col supérieur largement ouvert et comportant une échancrure triangulaire.

-D'une double cloison médiane dans le col supérieur portant une série d'orifices de partialisation du débit.

-De deux déviateurs, un sur chaque paroi de la conduite droite du siphon.

Le siphon autonivellateur assure le caractère permanent des appareils des mesures du débit devant fonctionner moyennement une charge constante, à l'aide des caractéristiques suivantes :

La capacité de déverser dans la réserve d'eau, un trop plein équivalent au débit total de la station de pompage.

La capacité d'éviter tout débordement par son amorçabilité.



### 4-2 Principe général de fonctionnement d'un siphon :

Le siphon est une conduite rectiligne en partie inférieure, et cintrée en partie supérieure. Il fonctionne toujours en tant que conduite forcée qui fait augmenter le plan d'eau (à l'intérieur) par rapport à celui du réservoir, et lui fait changer la direction (dans la partie cintrée), et puis déverser finalement par un orifice situé au-dessous du plan liquide amont.

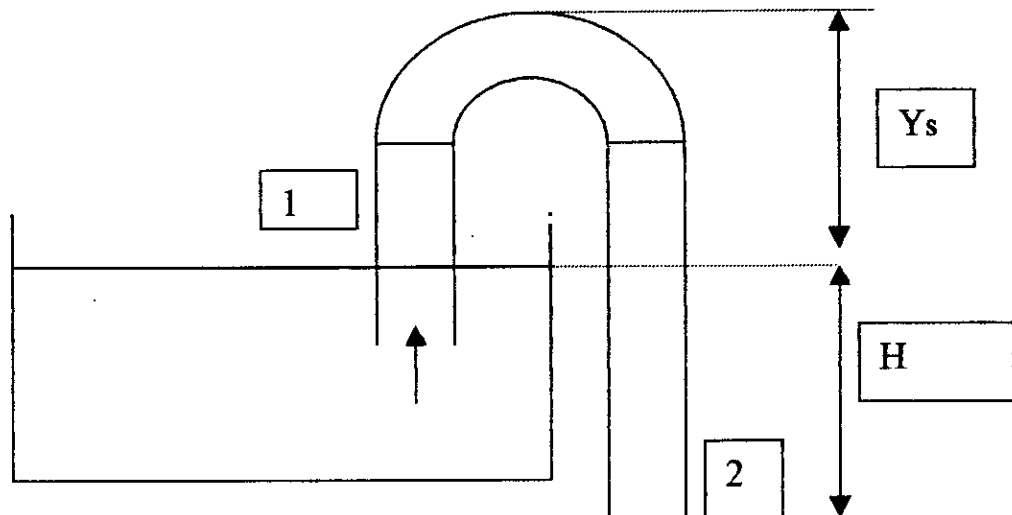


Figure N°7 Siphon

Lors du fonctionnement le siphon est rempli d'eau et la colonne est continue.

En appliquant la lois de Bernoulli entre les sections (1) et (2) elle donne l'équation de la charge suivante

$$H = V^2/2.g + \xi.V^2/2.g + \lambda.L/D.V^2/2.g \quad (1)$$

Où :

$\lambda$  : coefficient de perte de charge linéaire tiré de l'abaque de Moody

L : longueur de la conduite

D: diamètre de la conduite

$\xi$  : la somme de tout les coefficients de pertes de charge singulières

V : la vitesse de liquide dans le siphon

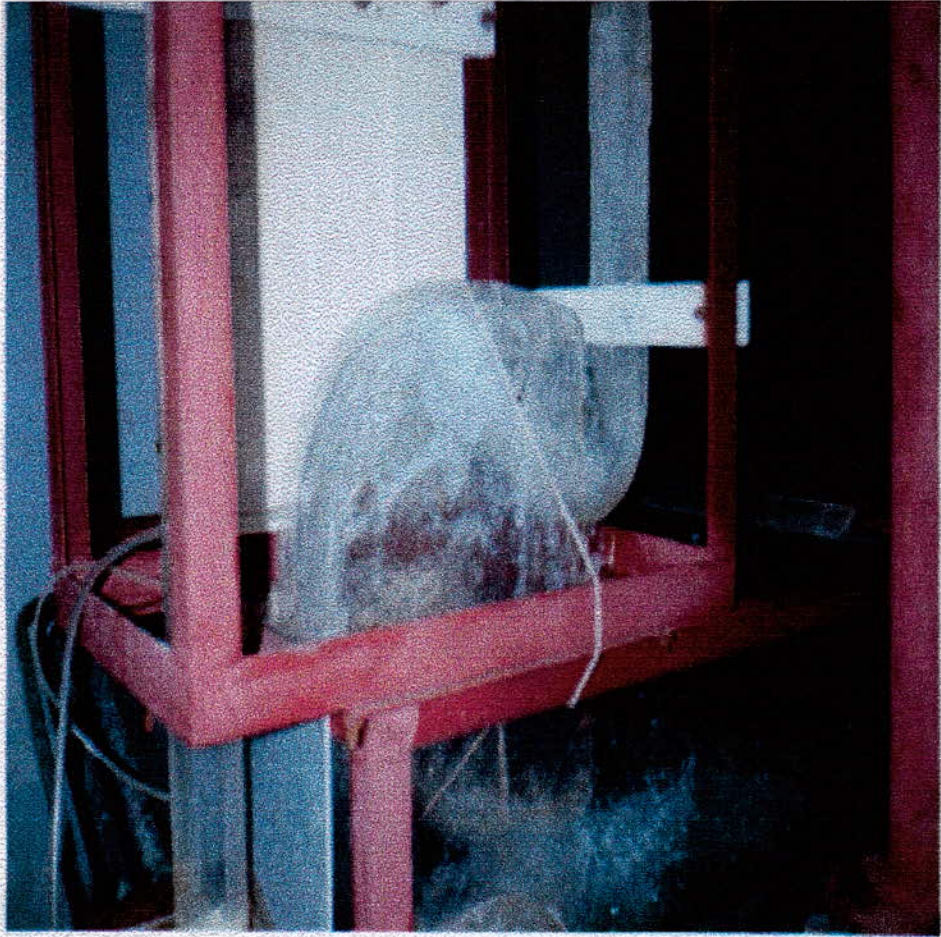
Dés lors l'équation (1) peut s'écrire :

$$H = V^2/2.g.(1 + \lambda + \xi) \quad (2)$$

Une fois le débit connu, la section quand à elle est donnée.



SIPHON



SIPHON

La vitesse peut être trouvée, et sachant que  $\lambda$  est fixée à 0.03 [Plexiglas], nous tirons H  
 Pour trouver la pression au sommet du siphon (susceptible d'héberger la pression négative).  
 Nous appliquons la lois de Bernoulli entre les sections (1) et (2) :

$$0 = V^2/2.g + P_s/\varpi + Y_s + \xi' . V^2/2.g + \lambda' . L'/D . V^2/2.g$$

Sachant que les valeurs de  $\xi'$  ,  $L'$  dans la partie cintrée du siphon, nous trouvons :

$$P_s/\varpi = - Y_s - V^2/2.g . (1 + \xi' + \lambda' . L'/D) \quad (3)$$

Cette équation nous renseigne sur la nature de  $P_s/\varpi$ .

Cette pression est négative et elle diminue avec l'augmentation de  $Y_s$  et  $V$ . La valeur limite de  $P_s$  est la pression de vapeur saturante, et les équations précédentes ne seront plus valables.

En pratique le siphon ne fonctionne correctement que si la valeur de  $P_s$  est franchement supérieure à la tension de vapeur. Les gaz et l'air en solution en eau se dégage et s'accumulent au sommet et réduisent la section utile.

### 4-3 Fonctionnement du siphon autonivellateur :

Ce fonctionnement se compose de deux parties

L'amorçage.

L'écoulement final.

L'amorçage est provoqué par une surélévation de l'eau à l'intérieur du siphon et introduit de ce fait une veine d'eau qui constitue soit l'écoulement initial dans le siphon, nous dirons alors que l'amorçage est instantané.

Cette veine liquide va se gonfler à l'intérieur du siphon à l'aide de la dépression créée par le déviateur qui va aider la veine à occuper totalement l'espace à l'intérieur du siphon en accélérant l'aspiration de l'eau, l'air est éliminé peu à peu de la partie supérieure du siphon.

L'amorçage dans ce cas est progressif.

Une fois l'écoulement final obtenu, le siphon aspire d'une façon continue la partie excédentaire de l'eau pour éviter le débordement, mais aussi pour assure le régime permanent. En effet. Si la charge est constante, et la vanne de contrôle du débit est ouverte de plus en plus, le siphon autonivellateur aspire automatiquement le surplus, pour garder le niveau de d'eau (dans le château d'eau ) stable.

En pratique la stabilisation de la charge est très difficile. Il faut d'abord ouvrir la vanne de contrôle au maximum possible et dès que l'amorçage du siphon est provoqué, elle doit être refermée progressivement, jusqu'à l'obtention d'un équilibre entre le débit d'alimentation et le débit aspiré par le siphon, les trois autres vannes étant fermées. Ce cas se manifeste par la stabilisation de la charge et le fonctionnement du siphon de façon continue.

#### **4-4 Comparaison entre l'utilisation du siphon autoniveleur et un trop plein dans le mini-laboratoire :**

Cette idée s'est imposée, lors de l'interprétation du deuxième essai qui consiste à combiner entre l'ouverture de deux ou trois vannes à la fois, pour étudier l'influence sur les débits.

Il n'y avait aucune influence sur les débits relevés aux niveaux des débitmètres pour des ouvertures connues des vannes. Pour expliquer ce phénomène il faut comparer les deux cas :

Dans le cas du trop plein la charge constante est assurée seulement par un équilibre entre le débit déversé par le trop plein et le débit d'alimentation (les trois vannes étant fermées).

Et chaque fois qu'une vanne est ouverte le point d'équilibre change et la hauteur d'eau baisse puisqu'il y a un nouveau débit sortant, donc il faut chercher le nouveau point d'équilibre entre le débit d'alimentation et le débit déversé par le trop plein et le débit sortant de la vanne.

Il est clair que l'expérimentation dans ces conditions est très difficile.

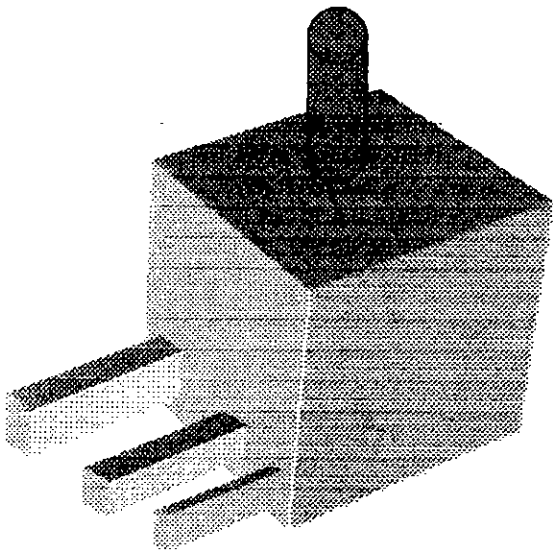
Dans le cas de l'utilisation du siphon autoniveleur, une fois la charge constante, les trois vannes peuvent être ouvertes en même temps sans le moindre abaissement de la hauteur d'eau. Lorsque l'écoulement final dans le siphon autoniveleur est obtenu, toute la quantité excédentaire d'eau, permettant d'augmenter le niveau d'eau dans le château d'eau, au-delà du niveau du siphon est aspirée pour assurer une charge constante et en l'occurrence un régime permanent.

Avec l'ouverture de l'une ou de toutes les vannes, le siphon diminue automatiquement de la quantité d'eau aspirée pour garder toujours la charge constante, et permettre d'avoir au niveau de chaque débitmètre un débit indépendant des autres, et pratiquement c'est un principe qui peut être utilisé en AEP.

#### **5- boîte parallélépipédique :**

Elle est conçue et installée de manière à ce qu'elle ait un point plus haut percé d'un trou qui permet de purger l'air qui se crée au moment du remplissage.

Elle communique avec le château d'eau à l'aide d'une conduite en Plexiglas de longueur 2.4m et diamètre 60mm, et avec les débitmètres à l'aide de trois conduites de diamètres différents.



**Figure N°8 Boite parrallépipédique**

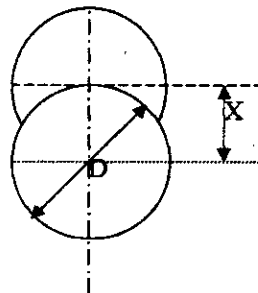
**7-vannes :**

03 robinets vannes ordinaires a opercule caracterises d'un passage directe du liquide sont utilisees .

les robinets vannes ordinaires a opercule sont des organes d'une section circulaire coupée par un opercule

que nous coulisons le long de la section a l'aide d'une vis de commande et cela proportionnellement aux nombres de tours de la vis

et de cette façon là que nous contrôlons le débit passant par l'organe



**Figure N°9 vanne à opercule**

au passage de ces organes , même s'ils sont entièrement ouverts , la veine liquide subit une contraction suivie d'un épanouissement souvent accompagné

d'une déviation . ces diverses causes de pertes de charges s'influencent mutuellement et il est difficile de prévoir par le calcul la perte de charge résultante

aussi nous préférons utiliser des formules expérimentales de la forme générale :  $j = k v^2 / 2g$  où  $v$  est la vitesse moyenne dans la canalisation sur laquelle est monté le robinet vanne .

le coefficient  $k$  varie évidemment avec le degré d'ouverture du cabinet vanne et avec les caractéristiques de l'appareil .

voici le tableau qui donne la valeur de  $k$  en fonction du rapport  $x/d$

avec

$x$  la course de l'opercule

$d$  : diamètre de la conduite

X/D	1/8	2/8	3/8	4/8	5/8	6/8	7/8
K	0.07	0.26	0.81	2.06	5.52	17	97.8

**Tableau N°1 Les valeurs de K**

il a été constaté que l'action du robinet vanne n'est pas du tout proportionnelle au nombre de tours du vis calculés d'étalonnage de nos dispositifs de mesure du débit que nous traitons par la

suite .mais que cette action sur la réduction du débit est surtout sensible à la fin de la course de l'opercule .

c'est vrais que le robinet vanne créé une perte de charge mais n'influe pas les calculs d'étalonnage des dispositifs de mesure du débit .

## **7-Dispositifs de mesure des débits :**

### **7-1 mesure des débits :**

Le débit peut être obtenu par les expressions suivantes :

- Débit volumétrique Q donné par l'expression

$$Q = dv / dt$$

dans lequel :

V : désigne le volume de liquide écoulé.

t : le temps.

- Débit en masse donné par l'expression

$$Q_p = dm/dt = \rho dV/dt = \rho.Q$$

- Débit en poids donné par l'expression

$$Q_\gamma = dG/dt = \gamma .dv/dt = \gamma.Q$$

Les dimensions des débits sont :

$$[Q] = L^3.T^{-1}; [Q_p] = M.T^{-1}; [Q_\gamma] = F.T^{-1} .$$

Ces débits sont déterminés par des méthodes à un paramètre ou des méthodes à paramètres multiples.

Dans les méthodes à un paramètre le débit est une fonction homogène d'une seule variable indépendante, par exemple, de la hauteur de la nappe déversante, et dans les méthodes à paramètres multiples le débit est une fonction de plusieurs variables indépendantes, par exemple, des vitesses locales et leurs coordonnées dans la section hydrométrique.

La détermination de la valeur du débit peut se faire soit par le calcul, en introduisant les valeurs des paramètres mesurés dans les formules appropriées, soit graphiquement en appliquant la méthode graphique, soit encore automatiquement au moyen d'appareils conçus de manière appropriée, par exemple, de manomètres à extraction de racine des pressions différentielles mesurées.



appropriée, par exemple, de manomètres à extraction de racine des pressions différentielles mesurées.

## **7-2 Classification des méthodes de détermination du débit :**

Ces méthodes peuvent être réparties par groupes comme suit :

- La méthode géométrique consiste à calculer le débit d'après la mesure de grandeurs géométriques, telles que la section transversale et la baisse de la ligne d'eau ou du fond du cours d'eau.
- Les méthodes d'exploration du champ des vitesses consistent à mesurer les vitesses d'écoulement locales ou moyennes et à déterminer d'après celles ci le volume du solide des vitesses dans ce groupe figure :
  - La méthode des flotteurs entraînés par le courant.
  - La méthode des moulinets hydrométriques.
  - La méthode de l'écran mobile Andersson.
  - La méthode du nuage coloré.
- Les méthodes volumétriques permettent de déterminer le débit d'après le temps et le volume de liquide qui a pénétré pendant ce temps dans réservoir jaugé.
- Les méthodes de transformation d'énergie s'appuient sur la loi de conservation de l'énergie parmi ces méthodes nous citerons :
  - Les méthodes des veines contractées qui s'appuient sur la mesure de l'abaissement du niveau de la surface libre du liquide ou de la chute de la pression statique.
    - Les pressions qui règnent sur la paroi concave et la paroi convexe d'un coude.
  - Les méthodes d'augmentation de la charge statique :
    - La méthode des obturateurs qui s'appuie sur la relation entre le débit et la perte de charge dans un robinet vanne, un robinet à pointeau ou un clapet.
    - La méthode du coup de bélier s'appuie sur la proportionnalité entre le débit et la hauteur de pression dynamique.
  - Les méthodes chimiques et électrochimiques qui comprennent,
    - La méthode de dilution.
    - La méthode du nuage salé.
    - La méthode électrochimique.

### **7-3 Appareils de mesure :**

Les appareils de mesure se divisent en deux groupes principaux suivant que le rapport de sections est constant ou varie en fonction du débit.

Parmi les débitmètres à rapport de section constante en conduite figurent :

- **Les débitmètres à étranglement :**

Persiennes de mesure.

Diaphragmes de mesure.

Tuyères de mesure.

Venturis combinés avec un manomètre différentiel.

- **Les débitmètres à coude.**

Parmi les débitmètres à rapport de section variable en conduite figurent :

- **Les débitmètres à flotteur.**

- **Les débitmètres à obturateur** qui se divisent d'après leur construction en :

Obturateur à soupape ou à pointeau.

A clapet.

A robinet vanne.

Le choix du système et du type d'appareil de mesure des débits dépend de la nature de l'essai lame, des conditions locales du mouvement, de la variabilité des paramètres hydrodynamiques et de la précision de mesure exigée, mais quand nous avons la possibilité du choix entre deux types d'appareils, nous donnons la préférence à celui dont les propriétés hydrauliques et hydrométriques ont été étudiées à fond. Ainsi, par exemple, pour la mesure du débit dans une conduite en charge nous employons plus volontiers des dispositifs de mesures à étranglement que les débitmètres à obturateur.

### **7-4 Dispositifs de mesure à étranglement :**

Le dispositif de mesure à étranglement est un dispositif d'étranglement monté dans une conduite en vue de causer une chute de pression sur laquelle s'appuie la mesure du débit.

Un dispositif d'étranglement constitue l'élément primaire et un manomètre différentiel l'élément récepteur.

Les dispositifs de mesure à étranglement se divisent en trois (03) groupes :

- Diaphragmes.
- Tuyères.
- Venturis.

Il n'est pas nécessaire de détailler les deux premiers groupes.

### **7-4-1 le Principe de fonctionnement d'un dispositif de mesure**

#### **à étranglement :**

L'évolution des phénomènes hydrodynamiques dans un dispositif d'étranglement est la suivante. -

Par suite de la diminution de section au passage de la conduite à l'étranglement, il se produit un accroissement de la vitesse moyenne d'écoulement et, de ce fait, une diminution de la pression statique. Mais la répartition de la pression statique dans la section transversale de la conduite n'est pas uniforme, de sorte que la variation de la pression le long de l'axe de la conduite.

Diffère de la variation de la pression le long des parois de la conduite.

### **7-4-2 Hypothèses physiques:**

#### **7-4-2-1 Hypothèse de continuité cinématique :**

La même masse de liquide passe par toutes les sections en amont et en aval du dispositif d'étranglement qui se trouve dans les limites du tronçon de mesure, ou, en d'autres termes, sur le tronçon de mesure de la conduite il ne peut exister ni sources, ni puits et, par conséquent, le liquide ne peut ni affluer vers la conduite, ni affluer de la conduite.

#### **7-4-2-2 Hypothèse de l'invariabilité de l'énergie disponible :**

Sur le tronçon de mesure du dispositif d'étranglement il n'y a ni apport d'énergie de l'extérieur vers le liquide qui s'écoule dans la conduite, ni prélèvement d'énergie de ce liquide. Les phénomènes de variation d'énergie se produisant entre les sections considérées consistent en

une variation de l'énergie de pression qui accompagne la diminution de pression de  $P_1$  à  $P_c$  et en une variation simultanée de l'énergie cinétique du liquide.

$$\gamma/g \cdot V_1^2/2 \rightarrow \gamma/g \cdot V_2^2/2 \quad (1)$$

Causée par l'augmentation de la vitesse moyenne d'écoulement de  $V_1$  à  $V_c$ .

En vertu de la loi de conservation d'énergie nous pouvons comparer la chute de pression observée à l'accroissement de l'énergie cinématique du liquide et, par conséquent, écrire

$$P_1 - P_c = \gamma/(2 \cdot g)(V_c^2 - V_1^2) \quad (2)$$

Dans cette équation fondamentale de l'énergie on ne tient pas compte des changements d'autres formes d'énergie qui peuvent intervenir dans le bilan d'énergie du phénomène d'écoulement du liquide par le dispositif d'étranglement.

En particulier, nous ne tenons pas compte de l'effet :

- Des changements de l'énergie de position,
- De la détente du liquide ( $\gamma \cong c^{te}$ ),
- De la tension superficielle,
- Une transformation de l'énergie thermique.

Par contre, les pertes d'énergie causée par le frottement interne ou la viscosité du Liquide, ainsi que par les résistances de frottement contre les parois limitant le liquide qui s'écoule, sont prises en considération par l'introduction d'un coefficient de correction qui dépend du nombre de Reynolds ou du rapport entre l'accroissement de l'énergie cinétique et l'énergie dépensée pour vaincre les résistances de frottement et les tourbillons.

### **7-4-2-3 Hypothèse de l'invariabilité du phénomène dans le temps :**

Dans un écoulement permanent par un dispositif d'étranglement ni la masse, ni l'énergie ne peuvent s'accumuler ou diminuer dans le tronçon de mesure de la conduite.

**7-5 Théorème de Bernoulli :**

Il est utile d'aborder l'établissement de l'équation de Bernoulli afin de bien se familiariser avec l'apport du théorème de Bernoulli, tout en vérifiant les hypothèses de calcul :

A : le fluide est parfait «eau ».

B : l'écoulement est permanent, il est assuré par le siphon autonivellateur.

C : les forces de volumes dérivant d'un potentiel U :

→ →  
 $F = - \text{grad } U$

D : ρ la masse volumique de l'eau est constante.

**7-6 Etablissement de l'équation de Bernoulli :**

Les équations d'Euler étudient les forces agissant, en distinguant :

A/ les forces de volume, proportionnelles a l'élément de volume.

B/ les forces de pression, proportionnelles aux éléments de surface et normales à ces éléments.

C/ les forces d'inertie proportionnelles à l'accélération  $\vec{\gamma}$  et au volume.

Donne la relation suivante :

$$\vec{\Sigma F} = m \vec{\gamma} \tag{1}$$

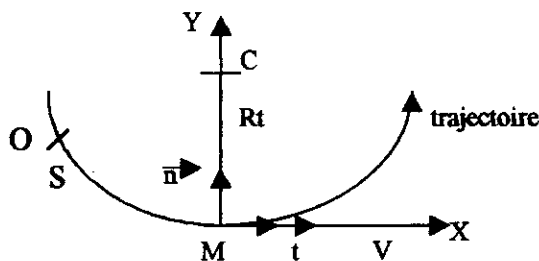
Le raisonnement sur un élément parallélépipédique donne :

Sous forme vectorielle la relation suivante :

$$\vec{\rho} \cdot \vec{\gamma} = \rho \cdot dV/dt = \rho \cdot \vec{F} - \text{grad } P \tag{2}$$

→  
 F : étant la force de volume par unité de masse.

Cette équation est aussi vraie en projection sur une direction quelconque tel que



- La tangente soit confondue avec Ox.
- La normale principale avec Oy .
- La binormale avec Oz.

En appelant  $\vec{\tau}$  : le vecteur unitaire de la tangente à la trajectoire en « m »

Dés lors nous aurons :

$$\vec{V} = V \cdot \vec{\tau} \tag{3}$$

$$\vec{\gamma} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{\tau} \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{d\vec{\tau}}{dt} \tag{4}$$

Soit s la longueur d'arc de la trajectoire.

La formule de Frénet s'écrit :

$$\frac{d\vec{\tau}}{dt} = \frac{d\vec{\tau}}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \frac{n}{Rt} \cdot V \tag{5}$$

Où Rt : le rayon de courbure

$\vec{n}$  : le vecteur unitaire de la normale principale

donc :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{\tau} \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{n}{Rt} \cdot V \tag{6}$$

De l'équation (4) et (6) :

$$\gamma_x = \frac{dV}{dt} \quad \gamma_y = \frac{V^2}{Rt} \quad \gamma_z = 0 \tag{7}$$

En plus

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial V}{\partial y} + \omega \cdot \frac{\partial V}{\partial z}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial V}{\partial x}$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V^2}{2 \cdot \partial x} \tag{7'}$$

Sachant que l'écoulement est permanent  $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ , les projections de l'équation (2) s'écrivent :

$$\rho \cdot V \cdot \frac{\partial v}{\partial \rho} = \rho T - \frac{\partial P}{\partial s}$$

$$\rho \cdot \frac{V^2}{r} = \rho \cdot N - \frac{\partial P}{\partial n} \tag{8}$$

Avec

→  
T et N les composantes de F sur M<sub>x</sub> et M<sub>y</sub>

D'après les hypothèses de calcul

→ →  
F = -grad U

Donc :  $T = -\partial U / \partial s$

Le long d'une ligne de courant, confondue avec la trajectoire, l'équation (8a) devient :

$$\rho \cdot V \cdot dv/ds = - \rho \cdot du/ds - dP/ds \quad (9)$$

Les forces de volume se réduisent aux forces de pesanteur

$$U = g \cdot h$$

En intégrant l'équation (9)

$$V^2 / (2 \cdot g) + g \cdot h + P/s = C^{te} \quad (10)$$

Ou bien

$$V_1^2 / (2 \cdot g) + g \cdot h_1 + P_1/s = V_2^2 / (2 \cdot g) + g \cdot h_2 + P/s_2 \quad (11)$$

Qui n'est autre que l'équation de **Daniel Bernoulli** qui est une équation de base de la **mécanique des fluides**, Néanmoins, les restrictions imposées sont multiples :

Pour la suite les différents termes de l'équation de Bernoulli sont écrits en quantités homogènes à des longueurs, donc ici en hauteur de liquide de poids volumique  $\omega$ .

$$V^2 / (2 \cdot g) + P/\omega + h = C^{te} \quad (12)$$

$V^2 / (2 \cdot g)$  : hauteur due à la vitesse

$P/\omega$  : hauteur due à la pression.

### 7-7 les venturimètres :

La partie essentielle, inséparable de tout appareil de mesure des débits, est le dispositif indicateur de débit, qui permet la lecture des valeurs instantanées du débit, quel que soit le principe sur lequel repose la relation entre le débit et la grandeur mesurée directement, par exemple la chute de pression.

Pour créer cette dernière il faut jouer sur l'accroissement de vitesse qui se produit entre des sections variables dans une conduite parcourue par le fluide.

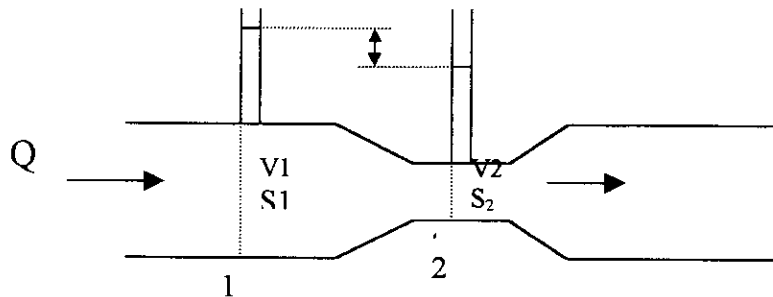


Figure N° 10 venturimètre

Les tubes piezométriques placés en diverses sections indiquent par conséquent des niveaux différents suivant le même sens de variation des sections

En assimilant la conduite à un filet de courant liquide l'application du théorème de Bernoulli donne :

$$P_{g1} / \varpi + V_1^2 = P_{g2} / \varpi + V_2^2 \quad (13)$$

Avec :

$P_g$  : la pression motrice.

$$P_g = P + \rho \cdot g \cdot H \quad (14)$$

$$\varpi = \rho \cdot G$$



D'après le théorème de Bernoulli, quand la section décroît la vitesse croît et par conséquent la pression motrice  $p_g$  diminue ce qui peut produire des pressions importantes que nous devons prendre en considération afin d'éviter le phénomène de la cavitation.

Dans ces conditions la loi de continuité de l'écoulement n'est plus observée et la formule de Bernoulli n'est plus applicable.

Pour se protéger de ce phénomène les débitmètres doivent être disposés en une position légèrement inclinée.

L'inclinaison du débitmètre n'influe aucunement la valeur des différences de pressions motrices relevées sur les piezometres, provoquées par l'augmentation de la vitesse dans la partie étroite.

Ce qui est démontré ci dessous :

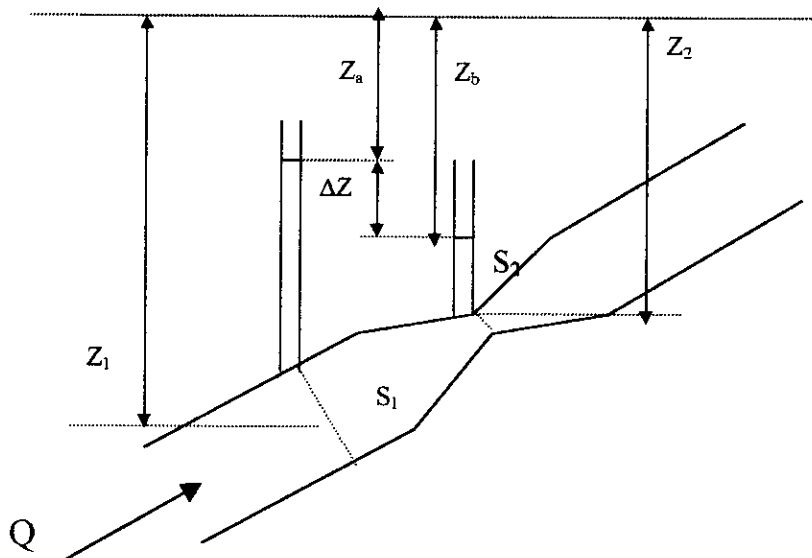


Figure N°11 venturimetre en position inclinée

L'application du théorème de Bernoulli entre la section s, et la section s2 donne :

$$P_1 / \varpi + Z_1 + V_1^2 / (2 \cdot g) = P_2 / \varpi + Z_2 + V_2^2 / (2 \cdot g) \quad (15)$$

$$(P_1 - P_2) / \varpi + Z_1 - Z_2 = (V_2^2 - V_1^2) / (2 \cdot g) \quad (16)$$

Avec :

$$P_1 = \varpi \cdot (Z_1 - Z_A) \quad (17)$$

$$P_2 = \varpi \cdot (Z_2 - Z_B) \quad (17')$$

D'où

$$P_1 - P_2 = \varpi \cdot (Z_1 - Z_A) + \varpi \cdot (Z_2 - Z_B)$$

$$\Delta Z = (V_2^2 - V_1^2) / (2 \cdot g) \quad (18)$$

Pour le cas horizontal  $Z_1 = Z_2 = Z$

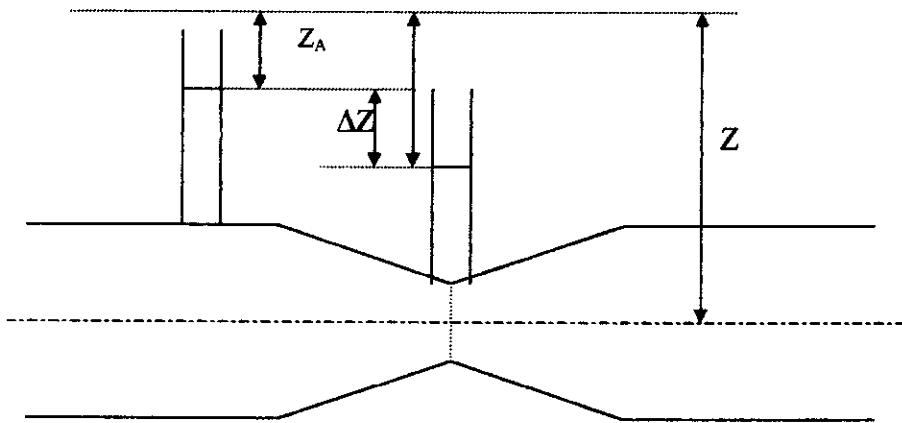


Figure N°12 venturimètre en position horizontale

Dans ce cas là l'équation (16) est :

$$P_1 - P_2 / \varpi = (V_2^2 - V_1^2) / (2 \cdot g) \quad (18)$$

Puisque

$$Z_1 - Z_2 = 0$$

Avec toujours

$$P_1 = \varpi \cdot (Z_1 - Z_A)$$

$$P_2 = \varpi \cdot (Z_2 - Z_B)$$

Alors devient

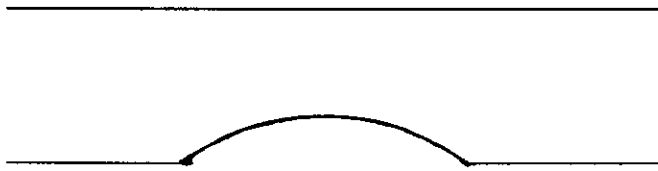
$$\Delta Z = (V_2^2 - V_1^2) / (2 \cdot g) \quad (19)$$

Ce qui montre que l'inclinaison n'influe pas la lecture de  $\Delta z$  en fonction du terme

$$(V_2^2 - V_1^2) / (2 \cdot g)$$

### **7-8 Débitmètre à section rétrécie en forme de segment :**

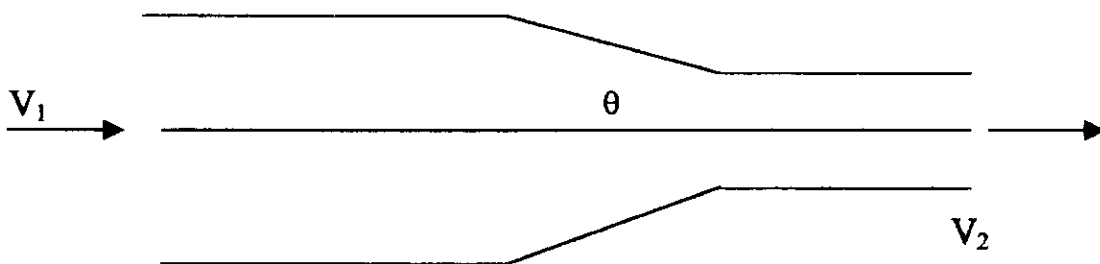
Le rétrécissement de la veine liquide peut être provoqué, par un diaphragme, par une tuyère, par un venturi ou bien par un tube de forme particulière inventé par monsieur G.Lapray appelé débitmètre à section rétrécie. (fig).



**Figure N°13 débitmètre a section rétrécie en forme de segment :**

Ce tube n'a rien de commun avec le tube venturi, si ce n'est qu'il est basé sur un rétrécissement graduel de la section suivi d'un élargissement graduel aussi, et qu'il sert également à la mesure des débits.

Pour déterminer l'ordre de grandeur de la perte de charge du débitmètre à section rétrécie en forme de segment, une comparaison entre la perte de charge dans le débitmètre à section rétrécie avec celle d'un rétrécissement progressif à cône convergent, est proposé.



**FigureN°14 Rétrécissement progressif à cône convergent.**

La perte de charge dans le débitmètre à section rétrécie en forme de segment est plus faible que celle provoquée dans le débitmètre à rétrécissement progressif à cône convergent.

La perte de charge provoquée par un rétrécissement progressif a cône convergent est :

$$H_s = kv^2 / (2.g)$$

$K$  : le coefficient de perte de charge donné par l'équation

$$K = (1/C_c - 1)^2 \cdot \sin \theta$$

$C_c = S_2/S_1$  : Le rapport des sections.

Mais dans ce cas le coefficient  $k$  doit être modifié

$$K = F(C_c, \theta, Re)$$

$\theta$  : l'angle du cône convergent

$Re$  : qui n'a qu'une faible influence ainsi le coefficient  $k$  est donné par la formule suivante

$$K = (1/C_c - 1)^2 \sin \theta$$

Mais pour un rétrécissement progressif et bien arrondi, la perte est très faible, soit  $k=0,02$ .

En se référant à cette faible perte de charge, le débit mètre à section rétrécie en forme de segment présente une perte de charge très faible, voir négligeable.

Dans les venturimètres le phénomène de décollement, peut se produire dans la section rétrécie, nous sommes obligés de prendre des prises de pression tout autour de cette section afin d'éliminer toutes les erreurs.

La hauteur piézométrique sera la moyenne arithmétique des différentes prises de pression.

Mais dans le cas des débit mètres à section rétrécie en forme de segment, les filets de courant passant à proximité de la prise de pression ne sont pas déviés de leur direction primitive et restent rectilignes, ce qui exclut la formation des tourbillons pouvant affecter la valeur de la pression indiquée par le manomètre branché sur le tube, et amène à ne prendre qu'une seule prise de pression dans la section rétrécie dans la partie où les filets de courant sont rectilignes et non perturbés.

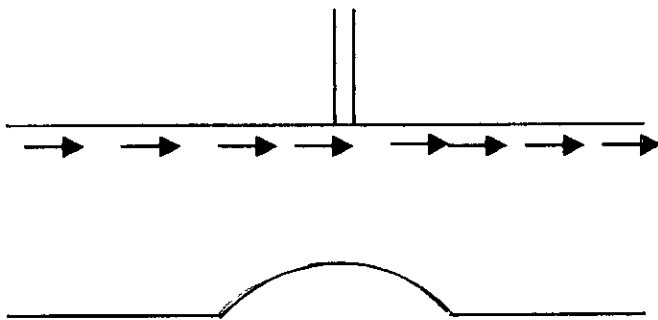
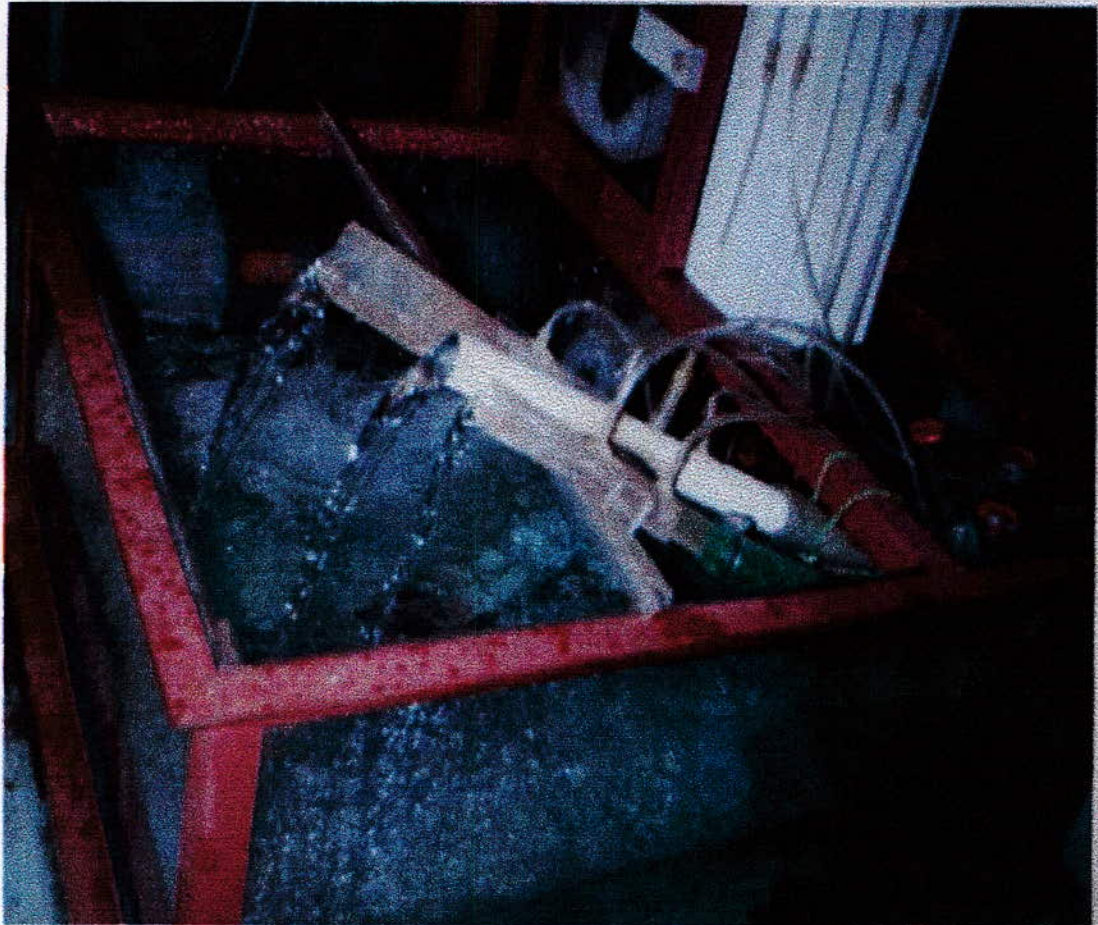


Figure N°15 passage de courant liquide dans le dispositif



## LES DEBITMETRES

**7-9 Les manomètres différentiels :**

La détermination du débit passant un débitmètre à section rétrécie en segment, la mesure de la différence des pressions entre la section de la conduite et celle rétrécie est nécessaire.

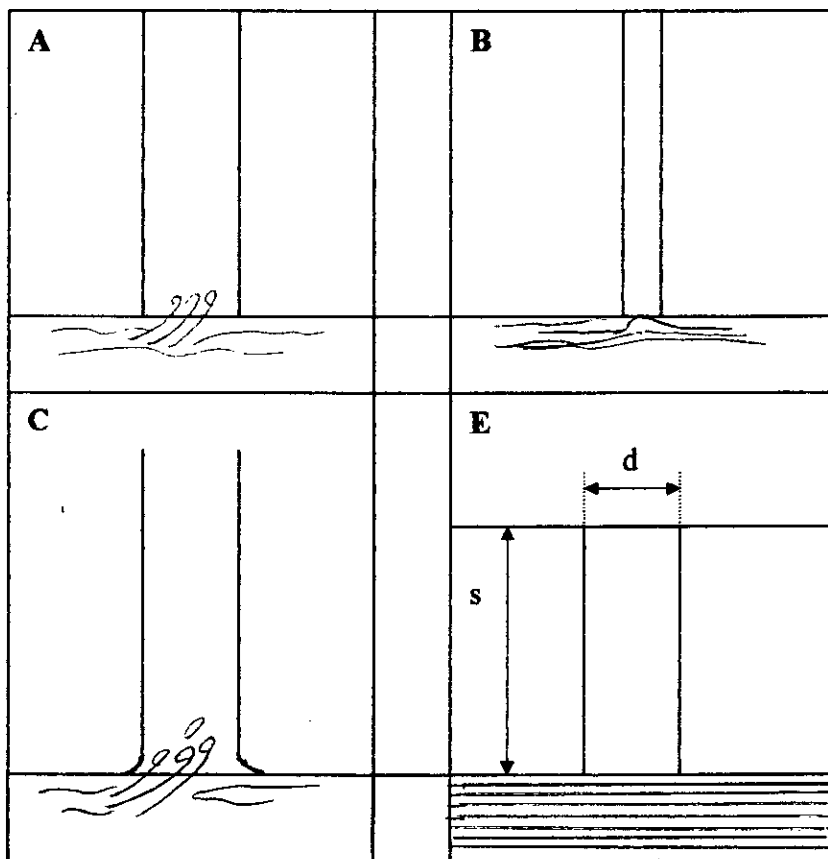
Des manomètres différentiels sont utilisés pour cette mesure.

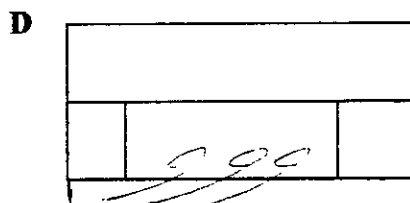
**Définition :**

Les manomètres différentiels sont par des piezomètres à air libre à eau ou à mercure, dans le modèle des piezomètres à air libre à eau sont utilisés.

Des tubes en Plexiglas représentent les piezomètres, rattachés par des accords flexibles transparents en Nylon aux prises des pressions sur les débitmètres. Ces prises de pressions sont réalisées au moyen d'un orifice beaucoup plus faible que celui du tube du manomètre afin d'éliminer toutes fluctuations dans les tubes.

Quelques formes caractéristiques des orifices de pris de pression reliant une conduite au manomètre sont présentées par les figures suivantes.





**Figure N°16 Les formes des orifices :**

**A :** le diamètre de l'orifice est trop grand, les filets qui passent au voisinage immédiatement de la paroi se détachent et frappent la paroi intérieure de l'orifice, causant un accroissement de la pression

**B :** Un décollement du courant liquide de la paroi et, de ce fait la pression indiquée par le manomètre est inférieure à la pression statique qui règne dans la section donnée.

**C :** c'est le phénomène contraire qui se produit par suite de l'arrondi trop grand du bord d'entrée

**D :** c'est une forme correcte d'un orifice de prise de pression, cet orifice est percé normalement à la paroi de la conduite, son diamètre varie de 03 à 08 mm, et inférieur ou égale à l'épaisseur de la paroi. La prise de pression est faite dans les sections où la répartition des lignes de courant est régulière et exempte des déformations provoquées par des obstacles aux mouvements locaux tel que : les vannes, coudes, déviations...

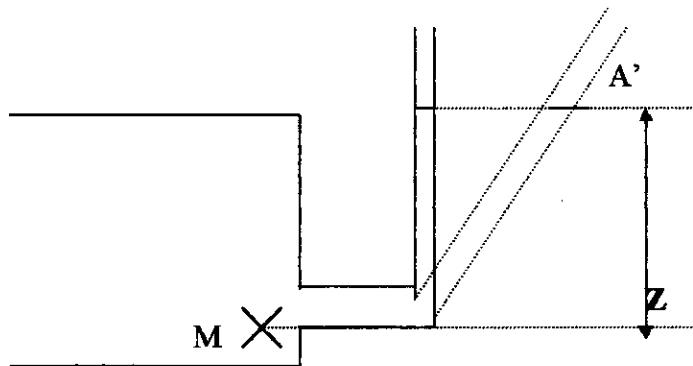
La purge est assurée par des flexibles raccordés en deux, et facilement détachables pour évacuer l'air.

La lecture sur deux tubes détermine la chute piezométriques «Z» intervenant dans le convergent en raison de la transformation en énergie cinétique, de l'énergie potentielle de pression.

C'est en fonction de Z que le débit est contrôlé.

### Mesure d'une pression par un piezomètre :

Soit in point M d'un liquide en équilibre, faisons déboucher en M un tube transparent, la surface libre du liquide se fixe à la hauteur verticale Z au dessus de M et donne le niveau piezométrique.



**Figure N°17 prise de pression :**

Il est le même quelque soit l'inclinaison du tube.

Soit  $P_a$  la pression atmosphérique régnant à la surface libre du liquide dans le tube, la pression  $P_m$  en M est donnée par :

$$P_M - P_a = \varpi \cdot Z \quad (22)$$

$\varpi = \rho \cdot g$  le poids volumique contenu dans le tube

$$Z = (P_M - P_a) / \varpi \quad (23)$$

Z mesure la différence de pression entre M et l'atmosphère elle est exprimée en hauteur

De liquide de poids volumique  $\varpi$ .

Cette relation justifie l'habitude que les prises de mesure des différences de pressions par des hauteurs de liquide.



# CHAPITRE V

### **1-Essais, résultats et interprétations :**

Une fois la réalisation du mini-laboratoire achevée nous avons entamé la partie «expérimentation» qui consiste à établir le régime permanent nécessaire pour les essais concernant les débitmètres, puis faire l'étalonnage de chacun d'entre eux (les débitmètres). Et enfin étudier l'influence de deux facteurs :

1-L'inclinaison des débitmètres.

2- La combinaison de l'ouverture de deux ou trois débitmètres à la fois, sur des débits recueillis au niveau des points de prise des mesures, pour des ouvertures des vannes bien connues.

#### **1-1 Etablissement du régime permanent à l'aide du siphon :**

Cette opération était très difficile au début à établir. Elle consiste à vérifier avant tout que toutes les vannes des dispositifs de mesures du débit sont fermées. Puis à ouvrir la vanne d'alimentation du château d'eau le maximum possible pour que le débit alimentant le réservoir soit supérieur à la limite du débit aspiré par le siphon autonivelleur, pour que ce dernier ne travaille pas comme étant un siphon simple et dès que le mouvement continu du liquide à l'intérieur du siphon est amorcé, la fermeture des vannes doit être progressive jusqu'à ce que le débit limite du siphon atteinte un certain équilibre entre le débit aspiré par le siphon autonivelleur et le débit d'alimentation.

Ceci se manifeste par l'établissement d'une charge constante dans le château d'eau et en l'occurrence un régime permanent.

## 1-2 L'étalonnage de chaque débitmètre :

Cet essai consiste à prendre les valeurs des débits et des dénivellations entre les deux piézomètres pour chaque débitmètre (pour des ouvertures des vannes bien déterminées) et puis tracer la courbe  $H=F(Q)$  propre à chaque débitmètre, et aussi déterminer les plages des débits sur lesquelles l'utilisation de ces débitmètres est valable.

Nous commençons par recueillir un certain volume à l'aide d'un récipient (gradué) et relever la valeur du temps 't' sur le chronomètre et cela pour plusieurs ouvertures de la vanne. Il faut noter aussi que le débitmètre a été incliné pour éliminer la cavitation (pour des grands débits) dans la section rétrécie.

A la fin de l'essai nous calculons le débit par la formule  $Q=V/t$ .

## 1-3 Principes théoriques du calcul des dispositifs de mesures à étranglement :

### 1-3-1-Paramètres et grandeurs fondamentaux :

section	Amont	contractée
aire de la section	S	S2
Diamètre	D	d2
Vitesse	V	V2
Pression Statique	P1	P2

Tableau :N° 1

Rapport des sections  $m=S_2/S$

Chute de pression mesurée  $\Delta p=p_1-p_2$

Perte de charge mesurée  $\Delta h=(p_1-p_2)/\gamma$

**1-3-2- Calcul du débit :**

L'application du théorème de Bernoulli aux sections 1-1 et 2-2 donne :

$$V^2/(2.g) + p_1/\gamma = V_2^2/(2.g) + p_2/\gamma \quad (1)$$

De la formule (1) la vitesse  $V_2$  est :

$$V_2 = [V^2 + (2.g) \cdot (p_1 - p_2)/\gamma]^{1/2} \quad (2)$$

En tenant compte de la condition de continuité de la veine pour l'eau -liquide incompressible - :

$$S \cdot V = S_2 \cdot V_2 \quad (3)$$

En introduisant cette valeur dans l'équation (2), après transformation de la formule qui détermine la vitesse moyenne d'écoulement dans la section contractée de la veine :

$$V_2 = (1 - m^2)^{-1/2} \cdot (2.g \cdot (p_1 - p_2)/\gamma)^{1/2} \quad (4)$$

L'expression :

$$\varepsilon = (1 - m^2)^{-1/2} \quad (5)$$

Tient compte de l'effet de la vitesse d'approche, ainsi que la contraction de la veine.

Toute fois, dans la pratique ce n'est pas la différence des pressions qui est mesurée mais la chute de pression.

Par conséquent un coefficient ( $\varphi < 1$ ) est introduit qui tient compte globalement des écarts causés par le changement des sections de prise de pression et les résistances aux mouvements.

La valeur de ( $\varphi$ ) dépend en premier lieu des dimensions du dispositif d'étranglement.

La valeur du coefficient ( $\varphi$ ) croît à mesure que la vitesse moyenne d'écoulement augmente, mais au-delà de la valeur ( $V_2$ ), la valeur de ( $\varphi$ ) reste invariable.

La vitesse moyenne d'écoulement dans la section contractée correspondant à la chute de pression mesurée  $\Delta p$  peut être donc exprimée par la formule :

$$V_2 = \varphi / (1 - m^2)^{1/2} \cdot (2 \cdot g \cdot (p_1 - p_2) / \gamma)^{1/2} \quad (6)$$

$$V_2 = \varphi / (1 - m^2)^{1/2} \cdot (2 \cdot g \cdot \Delta h)^{1/2} \quad (7)$$

le débit en volume est :

$$Q = S_2 \cdot V_2 = \alpha \cdot S_2 \cdot (2 \cdot g \cdot \Delta h)^{1/2} \quad (8)$$

Où  $\alpha$  désigne le coefficient de débit du dispositif d'étranglement qui tient compte du coefficient de vitesse d'approche ?

$$\alpha = \varphi / (1 - m^2)^{1/2} \quad (9)$$

Dans le cas présent le coefficient  $\varphi$  étant inconnu ainsi que l'aire de la section contractée  $S_2$  difficile à déterminer avec une grande précision.

Dès lors la démarche suivante s'impose :

En fonction du débit déduit d'après le volume d'eau écoulé pendant une durée  $t$  ;

La vitesse moyenne de l'écoulement peut être déduite :

$$V = Q / S \quad (10)$$

Dans ce cas :

$$V_2 = (V^2 + 2 \cdot g \cdot \Delta h)^{1/2} \quad (11)$$

Tirée de la formule (2).

Avec :

$$\Delta h = (p_1 - p_2) / \varpi \quad (12)$$

D'après la formule (8) :

$$\alpha = V_2 / (2 \cdot g \cdot \Delta h)^{1/2} \quad (13)$$

Par la suite le rapport de section  $m$  est déterminé par la formule :

$$m = (1 - 1/\alpha^2) \quad (14)$$

La valeur de  $m$  est déterminée d'après les valeurs moyennes de  $\alpha$  pour des vitesses

$V \cong 1 \text{ m/s}$ , et en déduisant l'aire de la section contractée  $S_2 = m \cdot S$

Le débit théorique est déterminé :

$$Q = S_2 \cdot \alpha \cdot (2 \cdot g \cdot \Delta h)^{1/2} \quad (15)$$

### 1-3-3-Effet du nombre de Reynolds :

La valeur du nombre de Reynolds est calculée par rapport au diamètre de la conduite

$$R = Vd/\nu \leq R_{\text{lim}}$$

$\nu$  : viscosité cinématique de l'eau variable en fonction de la température de l'eau

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre l'énergie cinétique d'un élément de liquide et le travail des forces de frottement interne qui se produisent dans cet élément.

Aux grandes valeurs du nombre de Reynolds le travail de frottement interne est négligeable par rapport à l'énergie cinétique du liquide.

Par conséquent, quand le nombre de Reynolds dépasse la valeur limite  $R_{e \text{ lim}}$

Le coefficient du débit est indépendant de  $R_e$ .

Par contre, l'effet du frottement interne est d'autant plus grand que  $R_e$  est inférieur à  $R_{e \text{ lim}}$ , ce qui cause la variation du coefficient  $\alpha$  en fonction de  $R_e$ .

T(°C)	0	1	2	3	4	5	6	7
v(cSt)	1,7923	1,7314	1,6728	1,6191	1,5674	1,5188	1,4728	1,4285
T(°C)	8	9	10	11	12	13	14	15
v(cSt)	1,3862	1,3465	1,3081	1,2718	1,2369	1,2035	1,1717	1,1414
T(°C)	16	17	18	19	20	21	22	23
v(cSt)	1,1122	1,0841	1,0574	1,0315	1,0068	0,9829	0,9600	0,9381
T(°C)	24	25	26	27	28	29	30	32
v(cSt)	0,9167	0,8963	0,8765	0,8575	0,8391	0,8213	0,8042	0,7719
T(°C)	35	40	50	60	70	80	90	100
c(cSt)	0,7268	0,6612	0,5560	0,4768	0,4151	0,3668	0,3279	0,2961

**Tableau :N° 2 viscosité dynamique de l'eau.**

m	$\alpha$	$Re_{lim}$
0.05	0.986	70000
0.10	0.989	76000
0.15	0.994	84000
0.20	1.001	96000
0.25	1.010	114000
0.30	1.021	133000
0.35	1.034	154000
0.40	1.049	175000
0.45	1.067	192000
0.50	1.090	200000
0.55	1.119	200000
0.60	1.155	200000
-	-	-

**Tableau :N° 3 la valeur de  $\alpha$  en fonction du nombre de Reynolds :**

Pour le venturi, les valeurs du coefficient  $\alpha$  ne varient pas en fonction du nombre de Reynolds lorsque la valeur de ce dernier est supérieure à la valeur limite  $Re$  au-delà de laquelle l'influence de ce dernier n'existe plus.

Pour des valeurs de Reynolds inférieures à  $Re_{lim}$  le coefficient  $\alpha$  prend des valeurs qui dépendent directement de la valeur  $Re$ .

Dans le cas du débitmètre à section rétrécie sous forme de segment, et par analogie avec le venturi, la valeur de  $\alpha$  dépend dans sa variation du nombre de Reynolds, dès lors la seule interprétation qui s'impose est que le nombre de Reynolds dans ce cas est inférieur à cette valeur limite  $Re_{lim}$ .



$\Delta Z$ (mm)	$v$ (l)	$T$ (l)	$Q$ (l/s)	$V$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\alpha$	$Q_n$ (l/s)	L'inclinaison (mm)
70	0.63	6.16	0.102	0.328	1.217	1.038	0.1017	25
47	0.68	8.10	0.084	0.267	0.997	1.038	0.0833	25
25	0.68	11.94	0.057	0.181	0.723	1.032	0.0607	25
14	0.74	17.41	0.043	0.137	0.542	1.034	0.0455	25
06	0.66	24.00	0.028	0.089	0.354	1.032	0.0298	25
02	0.32	24.75	0.013	0.041	0.202	1.020	0.0172	25*
01.5	0.132	11.97	0.011	0.035	0.175	1.020	0.0134	25*

Tableau :N°4 Essai sur l'étalonnage du débitmètre 1

$\Delta Z$ (mm)	$V$ (L)	$t$ (s)	$Q$ (L/s)	$V_1$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\alpha$	$Q_{th}$ (L/s)	$L'$ inclinai- son (mm)
110	0.65	4.91	0.132	0.420	1.528	1.040	0.127	48
95	0.67	5.47	0.122	0.398	1.419	1.039	0.118	48
75	0.69	6.53	0.105	0.334	1.258	1.037	0.105	48
70	0.75	7.47	0.100	0.318	1.214	1.036	0.102	48
60	0.68	7.38	0.092	0.293	1.124	1.036	0.094	48
42	0.64	8.82	0.073	0.231	0.937	1.032	0.079	48
36	0.58	8.28	0.070	0.223	0.870	1.035	0.073	48
25	0.45	7.81	0.057	0.181	0.723	1.032	0.061	48
22	0.51	9.37	0.055	0.175	0.680	1.035	0.057	48
15	0.65	14.22	0.046	0.146	0.562	1.036	0.047	48
12	0.68	17.25	0.039	0.124	0.501	1.033	0.042	48
7	0.63	21.50	0.029	0.092	0.382	1.031	0.032	48
3	0.21	12.62	0.016	0.051	0.248	1.022	0.021	48*
1.5	0.11	9.40	0.012	0.039	0.176	1.026	0.015	48*

Tableau :N°5 Essai sur l'étalonnage du débitmètre 1

$\Delta Z$ (mm)	$v$ (L)	$t$ (s)	$Q$ (L/s)	$V$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	$\alpha$	$Q_{th}$ (L/s)	L'inclinaison (mm)
36	3.80	10.41	0.366	0.518	0.987	1.17	0.352	47
30	2.08	6.85	0.304	0.430	0.879	1.15	0.321	47
25	1.45	4.91	0.295	0.418	0.816	1.16	0.293	47
20	2.18	8.69	0.251	0.355	0.720	1.15	0.262	47
14	1.69	7.40	0.228	0.322	0.615	1.17	0.220	47
9	1.57	8.41	0.187	0.265	0.497	1.20	0.176	47
4	0.86	6.37	0.135	0.191	0.339	1.21	0.117	47*
3	0.85	6.56	0.129	0.183	0.304	1.25	0.102	47*

Tableau :N°6 Essai sur l'étalonnage du débitmètre 2

$\Delta Z$ (mm)	v (l)	t (s)	Q (L/s)	V (m/s)	$V_1$ (m/s)	$\alpha$	Qth (L/s)	L'inclinaison (mm)
20	1.74	6.90	0.252	0.358	0.722	1.15	0.262	36
14	1.33	6.22	0.213	0.302	0.605	1.15	0.219	36
11	1.34	7.57	0.177	0.251	0.528	1.15	0.194	36
7	0.85	5.79	0.146	0.207	0.425	1.15	0.155	36
5	0.76	6.25	0.121	0.172	0.357	1.14	0.131	36*

Tableau : N°7 Essai sur l'étalonnage du débitmètre 2

<i>AZ</i> (mm)	<i>v</i> (L)	<i>t</i> (s)	<i>Q</i> (L/s)	<i>V</i> (m/s)	<i>V<sub>z</sub></i> (m/s)	<i>a</i>	<i>Q<sub>th</sub></i> (L/s)	<i>L'inclinaison</i> (mm)
43	4.26	4.62	0.923	0.735	1.176	1.280	0.865	68
37	4.07	5.03	0.810	0.645	1.069	1.255	0.803	68
25	3.30	5.19	0.635	0.505	0.863	1.232	0.659	68
18	2.93	5.37	0.545	0.437	0.739	1.242	0.560	68
13	2.14	4.47	0.480	0.382	0.633	1.253	0.476	68
8	1.99	5.28	0.377	0.300	0.497	1.254	0.373	68
5	1.85	6.40	0.289	0.230	0.389	1.242	0.295	68
3	1.49	6.50	0.229	0.182	0.303	1.249	0.228	68*
1	1.30	7.88	0.166	0.132	0.263	1.328	0.187	68*

**Tableau :N°8 Essai sur l'étalonnage du débitmètre 3**

$\Delta Z$ (mm)	$v$ (L)	$t$ (s)	$Q$ (L/s)	$V$ (m/s)	$V_2$ (m/s)	$\alpha$	$Q_{th}$ (L/s)	L'inclinaison (mm)
122	3.57	2.13	1.676	1.334	2.043	1.320	1.457	84
120	3.52	2.25	1.564	1.245	1.976	1.288	1.445	84
109	3.40	2.59	1.313	1.045	1.797	1.229	1.378	84
98	2.65	2.06	1.286	1.023	1.723	1.243	1.306	84
87	2.74	2.37	1.156	0.920	1.598	1.223	1.230	84
74	2.25	2.16	1.042	0.829	1.463	1.214	1.135	84
60	2.13	2.15	0.991	0.789	1.342	1.217	1.022	84
42	2.06	2.41	0.853	0.679	1.134	1.249	0.855	84
36	1.61	2.12	0.759	0.604	1.035	1.232	0.791	84
26	1.72	2.63	0.654	0.520	0.883	1.237	0.679	84
20	1.18	1.90	0.623	0.496	0.799	1.276	0.590	84
15	0.98	2.16	0.451	0.359	0.651	1.200	0.510	84
5	0.95	4.00	0.238	0.189	0.366	1.169	0.295	84
1.5	0.48	3.43	0.140	0.111	0.204	2.185	0.160	84

Tableau : N°9 Essai sur l'étalonnage du débitmètre 3

Cet essai a permis de déterminer une plage de débits pour chaque débitmètre sur laquelle ce dernier fonctionne en donnant des résultats exceptionnels, précis et fidèles (c'est à dire que dans tous les cas nous aurons le même débit pour une même pression différentielle).

Cet essai a, aussi, permis de donner dans système de coordonnées à divisions logarithmiques, pour chaque débitmètre, des points parfaitement alignés ayant une inclinaison rigoureusement égale à ce qui montre que ce type de débitmètres donne des résultats très précis grâce à l'absence totale de tout élément perturbateur le long de la ligne de courant (phénomène de cavitation, eau morte, phénomène de décollement.).

L'inclinaison du débitmètre permet d'éviter le phénomène cavitation dans la section rétrécie sans influencer sur les débits.

En effet par exemple pour le débitmètre de (20 mm) de diamètre, et pour la même ouverture de la vanne :

- la première inclinaison est de : 50 mm.
- La seconde est de : 70 mm.
- Le débit recueilli est le même (0.57 l/s) pour la même dénivellation (25 mm).

La seule interprétation pour ce résultat est que l'inclinaison du débitmètre n'intervient que pour éliminer les pressions négative dans la section rétrécie et n'influe pas sur le débit.

La comparaison de quelque valeurs des paramètres ( $Q, V_2, \alpha, V, Q_{th}$ )

Pour les mêmes ouvertures de la vanne permettent de constater qu'au delà des limites de la plage des débits, les résultats ne sont pas très précis.

#### **Exemple :**

**Le décalage entre les résultats données pour deux ouvertures consécutives de la vanne est remarquable dans cet exemple :**

**\_ pour la cinquième ouverture :**

**- $\Delta Z=6\text{mm}$**

**- $Q_{exp}=0.028\text{ l/s}$  .**

**- $V=0.089\text{ m/s}$ .**

**- $V_2=0.35\text{ m/s}$ .**

**- $\alpha=1.032$ .**

**- $Q_{the}=0.0298\text{ l/s}$ .**

Pour la sixième ouverture :

$$-\Delta Z=2\text{mm.}$$

$$-Q_{\text{exp}}=0.013 \text{ l/s.}$$

$$-V=0.041\text{m/s.}$$

$$-V_2=0.202\text{m/s.}$$

$$-\alpha=1.020.$$

$$-Q_{\text{the}}=0.0172\text{l/s.}$$

Ce décalage est du au fait que pour la cinquième ouverture constitue la limite de la plage des débits, et de ce fait les valeurs de la sixième ouverture sont hors cette plage.

### DEUXIEME ESSAI :

C'est essai qui consiste à étudier l'influence d'une vanne sur les autre.

Il faut fixer une vanne à une ouverture bien déterminée(donc le débit est fixé à une valeur déterminée),et puis varier l'ouverture de la deuxième vanne selon les positions du premier essai pour pouvoir comparer les débits.

#### 2-1 débitmètre D20 fixé- débitmètre D30 variable :

$\Delta Z$ (mm) -1	$Q_{\text{exp}}$ ( l/s )-1	$\Delta Z$ (mm) -2	$Q_{\text{exp}}$ (l/s)
110	0.132	36	0.365
«	«	31	0.307
«	«	25	0.295
«	«	20	0.250
«	«	15	0.230
«	«	10	0.187
«	«	4	0.135
«	«	3	0.129
75	0.105	36	0.366



«	«	30	0.304
«	«	25	0.295
«	«	20	0.251
«	«	14	0.228
«	«	9	0.187
«	«	4	0.135
«	«	3	0.129

Tableau :N° 10:

**2-2 DEBITMETRE D1 FIXE – DEBITMETRE D3 VARIABLE :**

$\Delta Z(\text{mm})$ -1	Qthe(l/s) -1	$\Delta Z(\text{mm})$ -3	Qthe(l/s) -3
95	0.122	43	0.923
		37	0.810
		29	0.635
		18	0.545
		13	0.480
		8	0.377
		5	0.289
70	0.100	40	0.913
		37	0.810
		30	0.635
		18	0.544
		13	0.478
		8	0.377
		5	0.289

Tableau :N° 11 :

**2-3 DEBIMETRE D2 FIXE- DEBIMETRE D3 VARIABLE :**

$\Delta Z(\text{mm})$ -2	Qthe(l/s)-2	$\Delta Z(\text{mm})$ -3	Qthe(l/s)-3
33	0.366	43	0.923
		37	0.810
		29	0.635
		18	0.545
		13	0.480
		8	0.377
		5	0.289
20	0.250	41	0.920
		36	0.809
		29	0.635
		20	0.550
		13	0.480
		8	0.376
		5	0.289

**Tableau :N<sup>o</sup> 12 :**

### 3-Troisième essai :

Cet essai consiste à faire fonctionner la pompe avec plusieurs débits et relever les pressions dans les conduites de refoulement et aspiration à l'aide de deux baromètres pour s'assurer du bon fonctionnement de la pompe.

<i>Débit</i>	<i>Dépression</i>	<i>Pression</i>	$\Delta P = P_1 - P_2$	<i>Charge</i>
<i>Q (m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>P<sub>1</sub> (bar)</i>	<i>P<sub>2</sub> (bar)</i>	<i>(bar)</i>	<i>H (m)</i>
0.00466	-0.44	0.25	0.69	7.6
0.00427	-0.38	1.04	1.42	14.87
0.00390	-0.30	1.43	1.73	17.92
0.00355	-0.28	1.78	2.06	21.19
0.00324	-0.22	2.07	2.029	23.45
0.00292	-0.19	2.32	2.51	25.62
0.00263	-0.17	2.44	2.61	26.59
0.00236	-0.14	2.60	2.74	27.87
0.00207	-0.13	2.73	2.86	29.05
0.00188	-0.09	2.82	2.91	29.53

**Tableau N°15 Caractéristiques intrinsèques de la pompe.**

Ce tableau montre bien que, effectivement, la pompe transforme la pression négative régnant dans la partie d'aspiration en une pression positive permettant de surélever l'eau du bac d'alimentation au château d'eau, ce qui fidèle à la théorie d'une pompe centrifuge.

### 3- Interprétations des résultats:

Les résultats obtenus à partir du deuxième essai sont identiques à ceux du premier essai se qui laisse dire que l'ouverture d'une vanne n'influe nullement sur les autres vannes et cela due à la présence du siphon autonivellateur où il garde une charge constante dans le château d'eau alimentant les débitmètres.

Lors des essais la température de l'eau enregistrée varie entre 15 et 20°C.

Dans ce cas le nombre de Reynolds est le suivant selon le tableau N°2 pour les trois débitmètres.

$$Re = V.D/v.$$

Avec

V: prise égale à 1m/s.

$$v = 1Cst = 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}.$$

Diamètre mm	T° c	Re	R <sub>lim</sub>
20	15	17522	114000
20	20	19865	114000
30	15	26284	200000
30	20	29797	200000
40	15	35044	200000
40	20	39770	200000

**Tableau N°13 Effet de Reynolds**

Nous remarquons que Re est très inférieur à R<sub>lim</sub> malgré que R<sub>lim</sub> est déterminé expérimentalement pour des venturis, mais vue la grande différence de dimension entre les valeurs de Re et R<sub>lim</sub>, nous pouvons conclure que le nombre de Reynolds influe sur la valeur de  $\alpha$ .

	$\phi 20$	$\phi 30$	$\phi 40$
$S \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$	314	706	1256
$\alpha_{\text{moy}}$	1.037	1.162	1.25
<b>M</b>	0.266	0.51	0.60
$Sc \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$	83.7	360	753
$\pm \Delta Q \text{ l/s}$	0.008	0.041	0.090

Tableau N° 14

$\alpha_{\text{moy}}$  : présente la moyenne des valeurs des  $\alpha$  pour des vitesses  $V_2$  voisinant les 1 m/s, et de cela la section contractée est déterminée.

Les valeurs de  $\alpha$  varient à cause de l'effet du nombre de Reynolds et du coefficient  $\phi$ .

#### **4-Calcul d'erreur :**

Lors des essais le diamètre du débitmètre ne doit pas être grand.

Des erreurs de lecture de Z est commises de l'ordre de 0.5 mm ce qui implique une incertitude sur la valeur finale trouvée pour le débit, cette incertitude augmente en augmentant le diamètre du débitmètre.

Par conséquent les diamètres des débitmètres sont limités pour avoir des bons résultats.

# CONCLUSIONS

Le mini-laboratoire n'étant pas un modèle réduit, ne peut permettre d'étudier un phénomène physique bien déterminé, mais permet de bien visualiser le fonctionnement d'un laboratoire hydraulique en forme de circuit fermé.

Les débitmètres à sections rétrécies sous forme de segments utilisées, permettent de quantifier les débits alimentant les installations du laboratoire hydraulique, situés à l'aval de ces derniers.

Un laboratoire hydraulique en circuit fermé présente plusieurs avantages, parmi lesquels le fonctionnement continue pendant une longue durée, en restituant l'eau déjà utilisée, ce qui permet d'économiser beaucoup d'eau, de temps et de travail.

En plus de la fonction auquel il a été réalisé, le siphon peut être utilisé dans le domaine d'AEP comme régulateur de débits dans les immeubles pour éliminer toute influence d'une installation accommodée.

Le siphon autoniveleur peut être utilisé en irrigation, et accélération de vidange des bassins réservoirs, et dérivation des eaux d'un bassin réservoir.

# BIBLIOGRAPHIE

- ∞ Banc d'essai d'une pompe centrifuge. - 1987 - KORICHI  
PFE -ENP
- ∞ Devis pour l'équipement du laboratoire hydraulique. -1966-  
NEYPRIC-AFRIQUE
- ∞ Hydraulique générale et appliquée. -1972- M.CARLIER  
EDITION EYROLLES - PARIS
- ∞ Hydraulique technique. -1954-JAEGER.  
EDITION DUNOD
- ∞ Hydrodynamique. -1980-HAGER.  
EDITION DUNOD
- ∞ Mécaniques des fluides. -1978-OUZIAUX  
EDITION DUNOD - BORDAS
- ∞ Mécanique expérimentale des fluides -1982- R.COMOLET  
EDITION MASSON- PARIS
- ∞ Réalisation d'un mini-laboratoire hydraulique. -1970-NASRI  
PFE -ENP
- ∞ Théorie et pratique des mesures hydrauliques. -1962-A.T.TROSKOLANSKI.  
EDITION DUNOD

