

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de génie mécanique



Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme
d'ingénieur d'état en génie mécanique

Thème :

**Mise en œuvre de mesures visant à exploiter toutes les
possibilités offertes sur le banc d'essais « Pertes de
charge » du laboratoire d'hydraulique**

Présenté par

Wassim BOUTALEB

Oussama SOLTANE

Dirigé par :

M. H. BENNOUR

M. M. LATRECHE

Promotion 2013

ملخص

هبوط الضغط، مشكلة متكررة في ميدان نقل الموائع. هو عبارة عن انخفاض الضغط في خط الأنابيب. الهدف من دراستنا هو إعادة تهيئة و تطوير منضدة الاختبارات التي تقع في مخبر الطاقويات، وتستعمل في قياس هبوط الضغط بنوعيه الخطي والمفرد. ثم التطرق إلى اقتراح نموذج أعمال مخبرية يصف العمليات التي يمكن للمنضدة القيام بها. وأخيرا، قمنا بالاختبارات اللازمة من أجل مقارنة النتائج المخبرية مع النظرية. **كلمات مفتاحية:** قوانين هبوط الضغط، انخفاض الضغط، معايرة التدفق.

Résumé

Les pertes de charge sont un problème récurrent dans le domaine des transports de fluide. Elles correspondent à une perte de pression dans une canalisation. Notre étude consiste à remédier et améliorer le banc d'essai qui se trouve au niveau de laboratoire de l'hydraulique et qui permet de mesurer les pertes de charge singulières et linéaires. Ensuite de proposer un manuel de travaux pratiques décrivant les manipulations qui peuvent se faire sur ce banc, enfin, nous avons fait les essais nécessaires afin de comparer les résultats trouvés avec celles calculés théoriquement.

Mots clés : lois de pertes de charge , chute de pression , étalonnage de débit

Abstract

head losses are a recurring problem in the field of transport of fluid. They correspond to a pressure drop in a pipeline. The Object of our study is to maintain and improve the testbed, which is located at the hydraulic laboratory, and used to measure linear and singular pressure drops. then to propose a practical laboratory work's manual describing manipulations that can be done on the bench, finally, we did the necessary tests to compare the results found with those calculated theoretically.

Key words: laws of head losses, pressure drop, flow calibration.

Remerciements

Nous remercions avant tout ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la force, le courage et la volonté pour achever ce travail.

Nous tenons tout d'abord à exprimer nos remerciement les plus sincères à nos encadreurs MM. H.Bennour et M.Latreche, pour nous avoir conseillé et dirigé pendant la réalisation de ce travail.

Nous tenons tout particulièrement à remercier M. Ahmed-ZAID du département de génie chimique et M. Salim BENZIADA du département d'hydraulique pour l'aide qu'ils nous ont si généreusement accordée.

Nous remercions aussi les membres de notre Jury (MM. M.T. ATTOUCHI et S. BENZIADA) d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous tenons également à exprimer nos gratitude à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation pendant toute la durée de nos études, afin d'acquérir ce modeste savoir.

Nous remercions enfin tous nos amis de promotion ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Dédicace

*Mes très chers parents qui se sont sacrifiés
toute leur vie pour que je réussisse dans
mon cursus scolaire et universitaire.*

A mes frères et sœurs;

A toute ma famille ;

A tous mes amis;

A tous mes collègues;

*A tous ceux que j'ai connus durant ma
formation;*

*A tous ceux pour qui je compte et qui
comptent pour moi*

Oussama SOLTANE

Dédicace

Je dédie ce modeste travail d'abord à mes très chers parents pour tout leurs sacrifices corps et âme afin de m'offrir le repos et le bonheur. Pour l'éducation qu'ils m'ont inculquée, pour leur soutien moral et matériel dont j'ai bénéficié à chaque fois que j'en ai en besoin, pour l'amour et la tendresse qu'ils m'ont réservé et la patience et le dévouement qu'ils m'ont insufflés. Très chers parents, je ne vous remercierai jamais assez pour vos actes.

Ensuite à mon adorable sœur MAROUA et mon très cher petit frère SAMI.

Puis à mes amis d'Ain M'lila, de CUB 3 et de l'ENP qui ont toujours été à mes cotés et a toutes les personnes qui m'ont soutenu dans ce projet.

Wassim BOUTALEB

Sommaire

Liste des figures	i
Liste des tableaux	iv
Nomenclatures	v
Introduction générale	1

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge

Introduction.....	4
I.1 Banc d'essai.....	4
I.1.1 Description de l'installation.....	4
I.2 Phénomène de perte de charge	7
I.2.1 Introduction et Définitions	7
I.2.2 Historique].....	9
I.2.3 Calcul des pertes de charge	12
I.2.3.1 Pertes de charge linéaires.....	12
I.2.3.2 Pertes de charge singulières	21
I.2.4 Perte de charge d'un circuit hydraulique.....	30
I.2.5 Notion de Longueur équivalente.....	30
I.3 Conclusion.....	32

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

Introduction.....	34
II.1 Le réservoir qui alimente les conduites.....	35
II.1.1 Opération effectuées :.....	36
II.1.2 Analyse des résultats de l'observation :	37
II.1.3 Remise en état :.....	37
II.2 Les compteurs d'eau totaliseurs.....	37
II.2.1 Opérations effectuées :	37
II.2.2 Actions de remédiation.....	39

II.3	Les vannes de garde et les vannes de réglage de débit.....	39
II.3.1	Opérations effectuées	39
II.3.2	Observations	39
II.3.3	Analyse et remédiation	40
II.4	Les conduites	40
II.4.1	Opérations effectuées	40
II.4.2	Observations :	41
II.4.3	Analyse des résultats obtenus :	42
II.4.4	Remise en état :	43
II.5	Les flexibles	44
II.5.1	Opérations effectuées :	44
II.5.2	Observations :	44
II.5.3	Analyse des résultats obtenus :	45
II.5.4	Remise en état :	45
II.6	Les tubes piézométriques :	45
II.6.1	Opérations effectuées :	45
II.6.2	Observations :	45
II.6.3	Remise en état :	45
II.7	Les singularités	46
II.7.1	Opérations effectuées et remise en état :	46
II.7.1.1	Mesure des dimensions des singularités :	46
II.7.1.2	Le nettoyage.....	47
II.8	Conclusion.....	48

Chapitre III : Dispositions conçues en vue d'améliorer les conditions

D'expérimentation pour le banc d'essais

	Introduction	50
III.1	Fabrication d'un support pour le montage et le démontage des singularités.....	50
III.1.1	Objectif.....	50
III.1.2	Description du dispositif.....	51
III.1.3	Procédure d'usinage	51
III.1.3.1	Gamme d'usinage.....	51
III.1.3.2	Assemblage et finition	53
III.1.4	Mode d'emploi.....	54

III.2	Fabrication d'un dispositif porte-flexibles	54
III.2.1	Objectif.....	54
III.2.2	Description de dispositif.....	54
III.2.3	La gamme d'usinage	55
III.2.4	Mise en place des flexibles	56
III.3	Fabrication d'un échafaudage.....	57
III.4	Utilisation du bassin de déversement en bassin tampon pour l'étalonnage des compteurs.....	58
III.5	Conclusion.....	58

Chapitre IV : Etude expérimentale des pertes de charge : Essais, Calculs ; Résultats et interprétations

Introduction.....	60
IV.1 Etalonnage des compteurstotaliseurs	60
IV.2 Etude des pertes linéaires	63
IV.2.1 Effet de la longueur et du débit.....	63
IV.2.2 Etude de l'effet du diamètre sur les pertes de charge linéaires	70
IV.3 Etude des pertes de charge singulières.....	71
IV.3.1 Tube de Venturi	72
IV.3.2 Diaphragme.....	73
IV.3.3 Robinet-Vanne.....	74
IV.3.4 Elargissement et rétrécissement brusques	75
IV.3.5 Coude arrondi à 180°.....	77
IV.4 Conclusion :.....	78
Conclusion générale	79
Bibliographie	81
Annexes	82

Liste des Figures

Figure I.1 : Ensemble des singularités.....	05
Figure I.2 : Vue d'ensemble du banc d'essais des pertes de charge.....	06
Figure I.3 : Perte de charge linéaire dans une conduite.....	07
Figure I.4 : Une singularité - Elargissement brusque	08
Figure I.5 : Expérience de Reynolds (régime d'écoulement).....	08
Figure I.6 : Perte de charge entre deux points selon Bernoulli	10
Figure I.7 : Élément de conduite.....	13
Figure I.8 : Section d'un élément de conduite.....	14
Figure I.9 : Diagramme de Moody	18
Figure I.10 : Elargissement brusque	22
Figure I.11 : Rétrécissement brusque	23
Figure I.12 : Coefficient de perte de charge pour l'élargissement et le rétrécissement brusques	23
Figure I.13 : Robinet-vanne	24
Figure I.14 : Coefficient de perte de charge pour les vannes.....	24
Figure I.15 : Coude arrondi	25
Figure I.16 : Valeurs de K pour un coude arrondi à 90°	26
Figure I.17 : Diaphragme	27
Figure I.18 : Valeurs de coefficient de décharge pour diaphragmes	28
Figure I.19 : Tube de Venturi	29
Figure I.20 : Valeurs de coefficient de décharge d'un venturi (Norme ISO)..	29
Figure I.21 : Élément d'un circuit hydraulique	30
Figure I.22 : Schéma représentatif de la longueur équivalente pour une vanne	31
Figure II-1 : Organigramme de la méthodologie suivie	34
Figure II-2 : Schéma descriptif du réservoir	35
Figure II-3 : L'eau est boueuse dans le réservoir	36
Figure II-4 : Réparation des compteurs.....	38
Figure II-5 : A la sortie du réservoir : corrosion et absence de filtres	38

Figure II-6 : Démontage des différents tronçons constituant les conduites.....	41
Figure II-7 : L'état des conduites au cours de leurs démontage	42
Figure II-8 : Les différentes opérations effectuées pour remédier à l'état des conduites	43
Figure II-9 : L'état des flexibles avant de procéder à leur remplacement.	44
Figure II-10 : Schéma de l'élargissement-rétrécissement brusques.....	46
Figure II-11 : Schéma du diaphragme	46
Figure II-12 : Schéma de tube de Venturi.....	47
Figure II-13 : Schéma de coude	47
Figure II-14 : Schéma de la vanne	47
Figure III.1 : Support de singularités	53
Figure III.2 : Schéma d'un support	55
Figure III.3 : La fixation du support sur le banc d'essais	56
Figure III.4 : La mise en place des flexible	57
Figure III.5 : Schéma de l'échaffaudage.....	57
Figure III.6 : Les modifications apportées au bassin de déversement	58
Figure IV.1 : Courbe d'étalonnage du compteur monté au départ de la conduite de diamètre $\varnothing 80$	61
Figure IV.2 : Courbe d'étalonnage du compteur monté au départ de la conduite de diamètre $\varnothing 50$	61
Figure IV.3 : Courbe d'étalonnage du compteur monté au départ de la conduite de diamètre $\varnothing 26$	62
Figure IV.4 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing 80$ pour un débit $Q = 0.37l/s$	63
Figure IV.5 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing 80$ pour un débit $Q = 0.58l/s$	64
Figure IV.6 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80mm$	

pour un débit $Q = 1.01l/s$	64
Figure IV.7 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80mm$ pour un débit $Q = 1.70l/s$	65
Figure IV.8 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80mm$ pour un débit $Q = 2.09l/s$	65
Figure IV.9 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80mm$ pour un débit $Q = 2.42l/s$	66
Figure IV.10 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80mm$ pour un débit $Q = 2.85l/s$	66
Figure IV.11 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80mm$ pour un débit $Q = 3.40l/s$	67
Figure IV.12 : Courbe du gradient hydraulique en fonction du débit	67
Figure IV.13 : Courbes de la perte de charge le long de la conduite pour différentes valeurs du débit	70
Figure IV.14 : Influence du diamètre sur le gradient hydraulique	71
Figure IV.15 : Tube de Venturi	72
Figure IV.16 : Courbe de la perte de charge en fonction du débit pour le tube de Venturi	73
Figure IV.17 : Diaphragme	73
Figure IV.18 : Courbe de la perte de charge en fonction du débit pour le diaphragme	74
Figure IV.19 : Robinet-vanne	74
Figure IV.20 : Courbe de la perte de charge en fonction du débit pour le robinet-vanne	75
Figure IV.21 : Elargissement et rétrécissement brusques.....	75
Figure IV.22 : Courbe de la perte de charge en fonction du débit	

pour l'élargissement brusque	76
Figure IV.23 : Courbe de la perte de charge en fonction du débit	
pour le rétrécissement brusque	76
Figure IV.24 : Coude arrondi à 180°	77
Figure IV.25 : Courbe de la perte de charge en fonction du débit	
pour le coude arrondi à 180°	77

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Indice de rugosité absolue	20
Tableau I.2 : Formules de calcul des pertes de charge linéaires.....	09
Tableau IV.1 : Longueurs équivalentes aux différentes singularités	
pour un débit de 2 l/s	78

Nomenclature

Symbole	Unité	Signification
C_d	Adimensionnel	Coefficient de décharge
D	mm	Diamètre de la conduite
D_i	mm	Diamètre intérieur
D_e	mm	Diamètre extérieur
d	mm	Le petit diamètre d'une singularité
f	Adimensionnel	Facteur de friction
g	m/s^2	Accélération de la pesanteur
h	$cm CE$	La charge (la hauteur piézométrique)
h/D	Adimensionnel	Degré de fermeture de la vanne
Δh	m	Perte de charge
Δh_{th}	m	Perte de charge théorique
Δh_{mes}	m	Perte de charge mesurée
J	$cm CE/cm$	Gradient hydraulique
K	Adimensionnel	Coefficient de perte de charge
L	m	Longueur de la conduite
p	Pa	Pression statique du fluide
Δp	Pa	Perte de pression
Q_m	kg/s	Débit massique
Q_v	l/s	Débit volumique
Re	Adimensionnel	Nombre de Reynolds
S	m^2	Section de la conduite
S_c	m^2	Section du col
t	s	Temps
u_m	m/s	Vitesse moyenne
V	l	Volume
v	m/s	Vitesse d'écoulement
z	m	Élévation du tuyau

Lettres grecs		
Symbole	Unité	Signification
β	Adimensionnel	Rapport d'ouverture
ϵ	mm	Rugosité absolue
ρ	kg/m^3	Masse volumique
τ_0	Pa	Contrainte de cisaillement
ν	m^2/s	Viscosité cinématique

Introduction

L'homme a utilisé les conduites pour le transport de l'eau depuis qu'il s'est sédentarisé. Au cours du XVIII^e siècle, les ingénieurs en hydraulique ont constaté l'existence d'un problème de perte de pression lorsqu'un fluide s'écoule le long d'une conduite, cette perte de pression ils l'ont appelée "*perte de charge*". La mesure de ces pertes et la détermination des causes principales responsables de leur apparition sont devenues une préoccupation majeure pour les chercheurs.

Il existe deux types de pertes de charge : les pertes de charge linéaires qui interviennent dans toutes les canalisations et les pertes de charge singulières qui interviennent lors d'un changement de géométrie de la canalisation ou des obstacles que rencontre le fluide en traversant un objet.

L'évaluation des pertes de charge est fondamentale en mécanique des fluides en général et en hydraulique en particulier; cette évaluation est à la base de tout dimensionnement de conduites et de réseaux. C'est un outil que tout ingénieur censé avoir affaire aux écoulements doit maîtriser, il doit donc impérativement faire partie de sa formation.

A l'Ecole Nationale Polytechnique, nous disposons des équipements nécessaires pour étudier le phénomène des pertes de charge, plus précisément ces équipements constituent un banc d'essais au laboratoire d'hydraulique. Malheureusement, au fil des années, les possibilités d'essais sur le banc se réduisent, une seule conduite sur trois est exploitée, en guise de pertes de charge singulières, seul le Venturi reste monté en permanence sur la conduite, le remplacement des singularités nécessitant quelques efforts particuliers et demanderait un peu plus de temps, alors qu'on a pris l'habitude d'être toujours pressé d'en finir avec les manipulations. Par ailleurs, il devient évident que quelqu'un doit s'occuper du banc d'essais pour lui redonner pleinement vie. En effet, personne ne s'occupe de son entretien, ni même de sa préservation. On s'était dit alors, pourquoi ne pas le prendre en charge dans le cadre d'un projet de fin d'études ? Nous essayerons de faire le nécessaire pour que les travaux pratiques puissent redémarrer au complet sur le banc et nous espérons qu'après nous, d'autres veilleront à ce qu'il ne s'arrête plus.

Introduction

Nous irons donc vers notre objectif en procédant comme suit :

Une brève présentation descriptive du banc d'essai, suivi de rappels sur les pertes de charge seront les thèmes que nous abordons chapitre I. Au chapitre II, nous allons décrire les démarches effectuées pour établir le diagnostic de l'état de chaque élément, avant d'agir pour remédier aux problèmes de pannes et défaillances. Le chapitre III sera consacré à la présentation des améliorations que nous avons pu apporter au banc d'essai. L'expérimentation du banc d'essai fera l'objet du chapitre IV, des essais seront menés, des calculs seront effectués pour traiter les mesures obtenues, suivi par la présentation des résultats et leur interprétation. Nous finirons par une conclusion avec quelques recommandations sur la suite à donner à cette modeste contribution.

Chapitre I

Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

Introduction

Ce chapitre sera consacré à la description du banc d'essai étudié et au rappel de certains aspects théoriques portant sur le phénomène des pertes de charge et les lois essentielles qui le gouvernent. Nous évoquerons également l'implication des pertes de charge linéaires dans les écoulements en conduites et des pertes de charge singulières dans les éléments accessoires qui se trouvent forcément montés sur ces conduites.

I.1 Banc d'essai

L'installation dont le schéma est donnée à la *figure 1.2* ci-dessous, est destinée à l'étude des pertes de charge dans 3 conduites de diamètres différents dans lesquelles s'écoule un fluide de l'eau en régime turbulent.

Elle permet, en fonction des débits ou des vitesses :

- l'étude quasi-systématique de la perte de charge linéaire dans les conduites circulaires, conduisant à une gamme de variation assez étendue du coefficient de perte de charge f en fonction du nombre de Reynolds Re .
- l'étude de la perte de charge due aux singularités interposées sur un tronçon de la conduite de plus gros diamètre.

I.1.1 Description de l'installation

La longueur utile des tuyauteries d'essais est de **9m** environ, leurs diamètres intérieurs sont de :

80 mm, 50 mm et 26 mm

Le débit maximum de l'installation est de l'ordre de **4 l/s** dans la conduite de diamètre **80 mm**.

L'installation comprend :

- Un réservoir métallique (1) à niveau constant par déversement à sa partie supérieure, de **0.700 m** de diamètre et de **3 m** de haut assurant l'alimentation des conduites sous une charge amont constante.
- Une conduite de **80 mm** de diamètre (2) en acier inoxydable de longueur utile **9 m** environ, équipée d'une vanne de garde (3), d'un compteur d'eau proportionnel (4), d'une vanne de réglage des débits (5), de **4** collecteurs de prises de pression (6) et d'un élément amovible (7) de **1 m** de longueur permettant le montage interchangeables des diverses singularités.

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

- Une conduite de **50 mm** de diamètre (8) également en acier inoxydable, de longueur utile **9 m** environ, équipée de manière identique à la précédente, sauf que dans ce cas il n'y a pas d'élément amovible.
- Une conduite de diamètre **26 mm**(9) également en acier inoxydable de caractéristiques identiques à la précédente.
- Des singularités (13) disposées sur un râtelier-support (14) (*figure I.1*), prévues seulement pour la conduite de **80 mm** de diamètre et comprenant :
 - Un ensemble de 4 coudes en acier inoxydable (15)
 - 4 éléments en acier inoxydable de longueur **1 m** comportant respectivement :
 - Un élargissement et un rétrécissement brusques (16)
 - Un venturi (norme française AFNOR) (17)
 - Un robinet-vanne (18)
 - Un diaphragme (19)
- Un manomètre à 10 tubes (10)
- Un manomètre différentiel à 2 tubes (11)
- 40 mètres de tuyau (12)

Les conduites et les singularités sont équipées de prises de pression en position et nombre judicieux permettant la détermination correcte de la ligne piézométrique, donc celle des pertes de charge de l'installation.

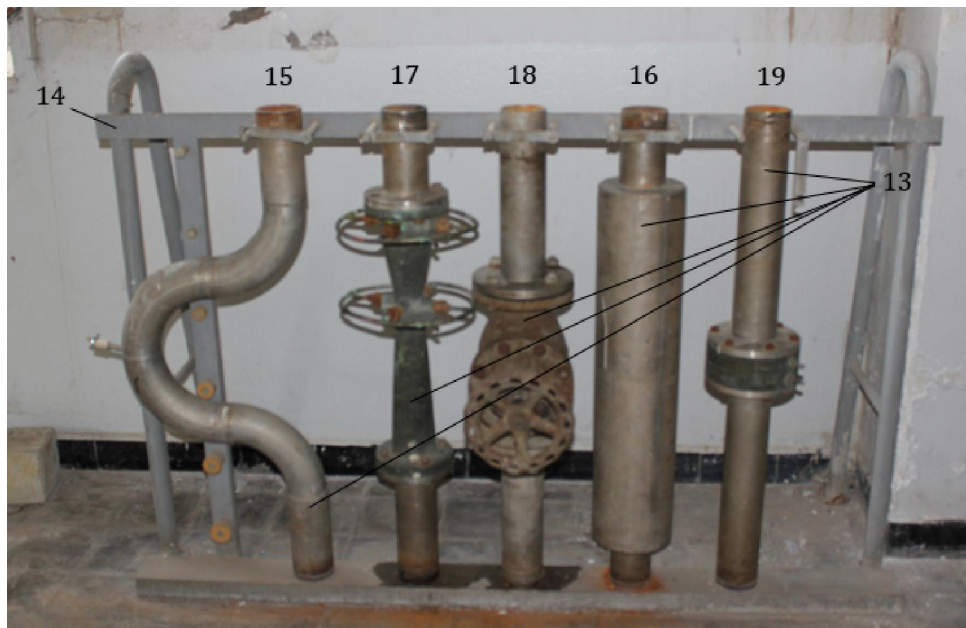


Figure I.1 : Ensemble des singularités

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

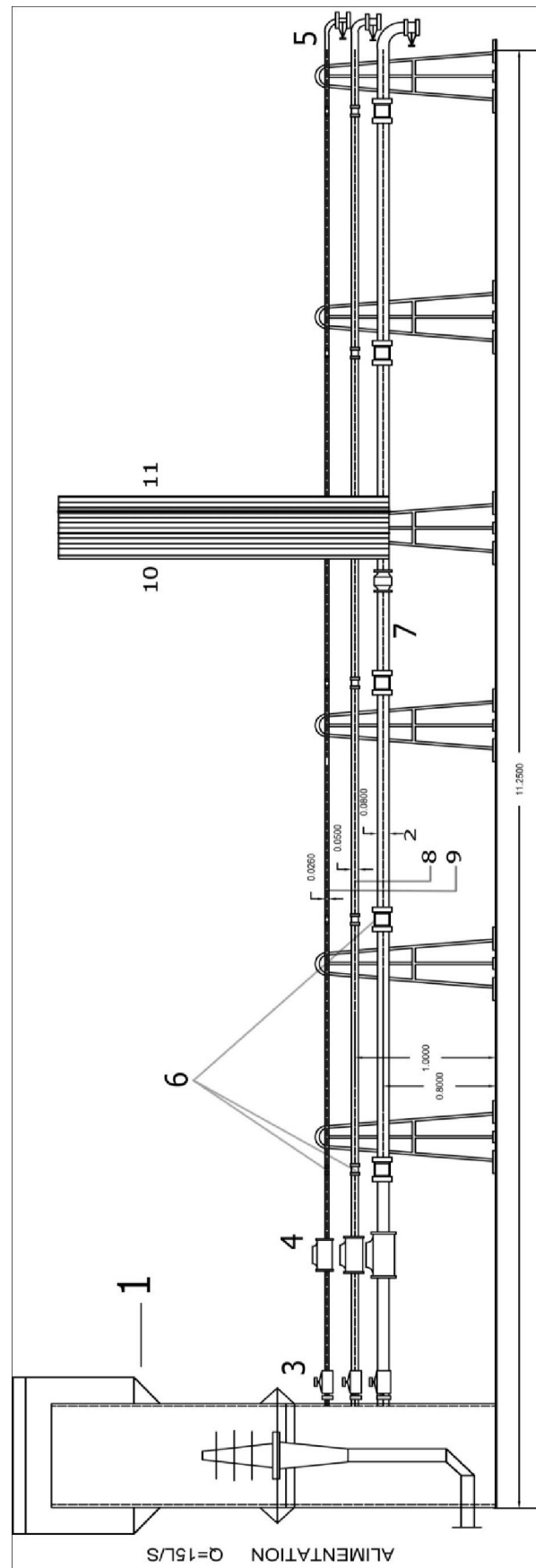


Figure I.2 : Vue d'ensemble du banc d'essais des pertes de charge

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

I.2 Phénomène de perte de charge

I.2.1 Introduction et définitions

Il n'y a pratiquement pas une seule branche de la technique qui ne soit plus ou moins intéressée par la nécessité du déplacement des liquides et des gaz dans des conduites, des canaux et divers appareils.

Ce déplacement de liquide visqueux provoque par frottement la dégradation de l'énergie mécanique en chaleur. Cette dégradation s'exprime par une variation de pression (ou une variation de hauteur de fluide), ces variations sont appelées **pertes de charge**.

- ❖ **La perte de charge** désigne la perte irréversible d'énergie de pression que subit un liquide ou un gaz lors de son passage dans un conduit, un tuyau ou un autre élément d'un réseau.

Il existe deux types de pertes de charge :

Les pertes de charge régulières (ou linéaires), qui représentent les pertes de charge par frottements dans les conduites. Elles sont provoquées par la viscosité du fluide et elles sont fonction du degré de turbulence (décrit par le nombre de Reynolds)

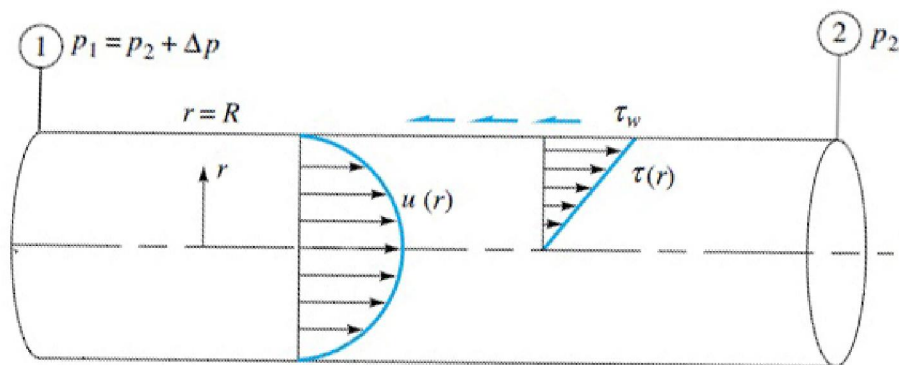


Figure I.3 : Perte de charge linéaire dans une conduite

Les pertes de charge singulières, sont le résultat des variations de vitesses et des changements de directions du fluide provoqués par les formes et obstacles que rencontre le fluide en traversant un objet: Cônes, coudes, grilles, raccords, jonctions...

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

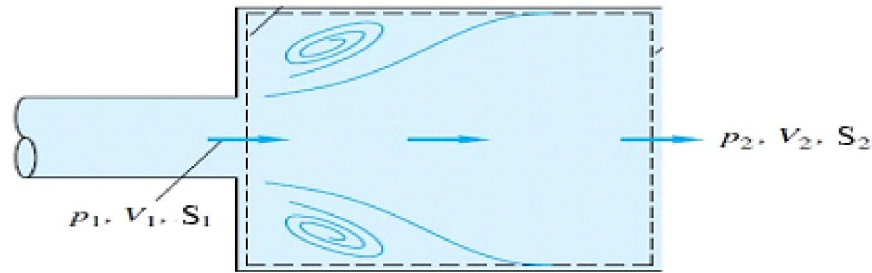


Figure I.4 : Une singularité - Elargissement brusque

En réalité ces 2 types de pertes de charges ne sont pas toujours séparés, ainsi dans un coude arrondi, il y a une part de perte de charge singulière due au changement de direction et une part de perte de charge régulière due aux frottements sur la longueur de conduite formée par le coude. Une addition des 2 pertes de charges peut être nécessaire si les surfaces de frottements sont importantes (un serpentín constitué de coudes par exemple), mais en général, les pertes de charge régulières sont négligées pour les éléments singuliers.

- ❖ **Le coefficient de perte de charge**, est une valeur sans unité qui permet de calculer la perte de charge d'une conduite (coefficient de perte de charge régulière) ou d'un élément singulier (coefficient de perte de charge singulière).

Il existe diverses formules pour déterminer le coefficient de pertes de charge régulières, le choix de la formule dépend du régime d'écoulement que l'on évalue.

- ❖ **Régime d'écoulement et expérience de Reynolds**

D'un point de vue expérimental, on peut relativement facilement distinguer deux régimes d'écoulement : le régime laminaire et le régime turbulent. L'expérience d'Osborne Reynolds (1883) permet en effet d'observer ces deux régimes à l'aide d'un dispositif comportant une conduite cylindrique transparente dans laquelle s'écoule un liquide avec un débit contrôlé par une vanne située en aval. En amont de cette conduite, un colorant est introduit à l'aide d'une pipette et permet la visualisation d'un filet de fluide coloré (ligne d'émission).

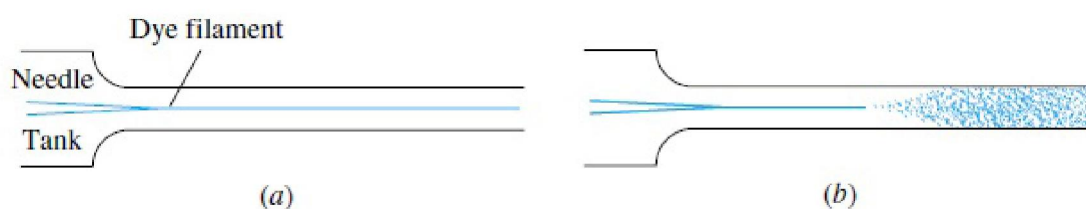


Figure I.5 : Expérience de Reynolds (régime d'écoulement)

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

L'expérience montre qu'avec l'augmentation du débit, le filet coloré passe d'un état régulier et rectiligne (le régime laminaire *figure I.5 (a)*) à une forme chaotique et instable (le régime turbulent *figure I.5 (b)*).

❖ La rugosité d'une conduite

La rugosité est un paramètre essentiel dans le domaine des pertes de charge. Elle nous renseigne sur l'état de surface des parois en contact avec le fluide. La rugosité des conduites est un facteur déterminant dans le choix des matériaux des tuyaux. Lors de l'étude d'un écoulement, on entend souvent les termes conduite lisse et rugueuse dans l'application des formules de calcul.

Les formules d'évaluation du régime d'écoulement (voir la formule de Colebrook , équation (1.9), par exemple) utilisent un rapport de la rugosité moyenne ϵ sur le diamètre D des conduites appelé **rugosité relative**.

Il faut savoir aussi que la rugosité des conduites d'un matériau donné évolue dans le temps suivant le fluide transporté (agressif, oxydant, acide, chargé de matière abrasives..) et les conditions d'exploitation (constamment en eau ou avec des temps d'exposition a l'air oxydant..).

Tableau I.1 : Indice de rugosité absolue

Nature de la surface intérieure	Etat de la surface	Indice de rugosité (mm)
Fonte	Neuve	0.25 - 0.8
Fonte	Usagée	0.8 - 1.5
Fonte	Incrustée	1.5 - 2.5
Acier	Inoxydable	0.015
Acier	Galvanisé	0.15
Acier	Rouillé	0.1 - 1
Tube PVC	Neuf	0.0015
Cuivre	Neuf	0.13 - 0.0015

I.2.2 Historique [1]

Le sujet des pertes de charge et l'estimation du coefficient de frottement pour un fluide newtonien s'écoulant à travers un tuyau est connue depuis longtemps, en 1738, le mathématicien Daniel Bernoulli (1700-1782) a publié le principe qui porte son nom dans l'hydrodynamique. Ce principe indique que la perte de charge (perte de la hauteur) entre les positions 1 et 2 de la *figure I.6* dans une conduite fermée est exprimée par :

$$\Delta h = \left(\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right) \quad (1.1)$$

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

où Δh est la perte de charge entre les positions indicées 1 et 2, v est la vitesse moyenne, g est l'accélération de la pesanteur, p est la pression statique du fluide, ρ est la densité du fluide, et z est l'élévation du tuyau par rapport à un niveau de référence.

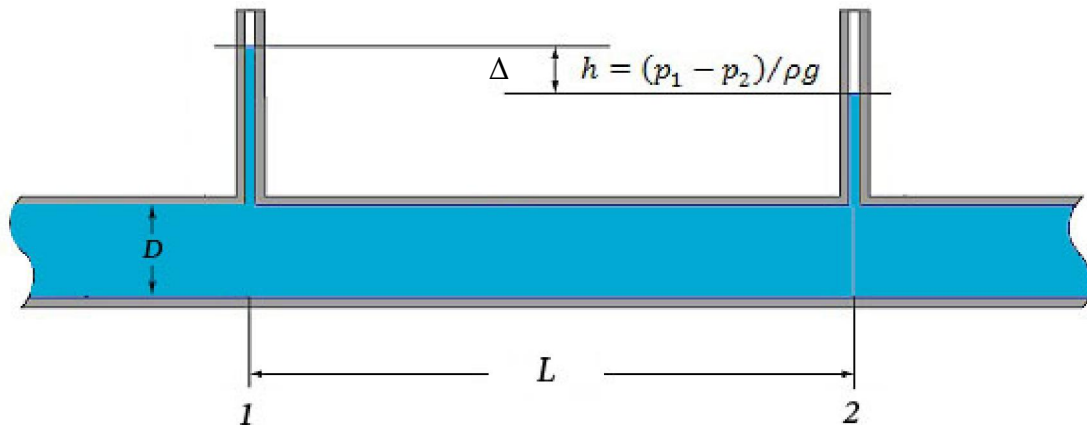


Figure I.6 : Perte de charge entre deux points selon Bernoulli

En 1845, Julius Weisbach (1806 - 1871) a proposé une relation de cette perte. Weisbach a mis en évidence l'influence de la rugosité, du diamètre et de la vitesse sur le coefficient de frottement, mais la communauté scientifique de l'époque avait apparemment ignoré ses conclusions. Ce n'est que suite aux travaux de Henry Darcy (1803-1858) qu'en 1857 Weisbach a été réhabilité avec la fameuse équation désormais dite de Darcy-Weisbach.

La relation de Weisbach se basait en partie sur ses propres données expérimentales et en partie sur des données publiées par Claude Couplet (1642-1722), Charles Bossut (1730-1799), Pierre Du Buat (1734-1809), Gaspard Riche de Prony (1755 - 1839), et Johann Eytelwein (1764-1848).

Vers 1770 Antoine Chézy (1718-1798) avait publié les concepts fondamentaux relatifs à un écoulement uniforme dans les canaux. Malheureusement, son travail a été perdu de vue, jusqu'en 1800 lorsque son ancien élève, de Prony, a publié des documents où il décrit le travail de Chézy.

Dans les années 1830, la différence entre le régime (laminaire) et le régime (turbulent) devenait évidente, indépendamment et presque simultanément, Gotthilf Hagen (1797 - 1884) en 1839 et Jean Poiseuille (1799-1869) en 1841, ont défini le régime à faible vitesse (laminaire) dans des petits tubes. En 1857, Darcy a également noté la similitude de ses expériences du régime de faible vitesse dans les conduites avec les travaux de Poiseuille.

En 1883, Osborne Reynolds (1842-1912) décrit la transition de l'écoulement du régime laminaire vers le régime turbulent et il a montré qu'il pouvait être caractérisé par le paramètre :

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (1.2)$$

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

Où Re est maintenant désigné comme le nombre de Reynolds.

Dans les tuyaux, le régime est généralement laminaire pour $Re < 2000$ alors que l'écoulement turbulent se produit généralement pour $Re > 4000$. Une région difficile à caractériser entre ces deux limites est appelée zone de transition.

En 1857, Henry Darcy (**1803-1858**) a publié une nouvelle forme de l'équation de Prony basée sur des expériences menées avec divers types de tuyaux et avec différents diamètres. Contrairement à la théorie qui prévalait à l'époque, il a montré que le coefficient de frottement dans une conduite est une fonction à la fois de la rugosité et du diamètre. Aujourd'hui, le coefficient de frottement f est appelé "*facteur de friction de Darcy*".

En 1877, J.T. Fanning (**1837-1911**) sera le premier à combiner efficacement l'équation de Weisbach avec le facteur de friction de Darcy. Il a simplement publié des tableaux de valeurs de f prises sur de nombreuses publications, celle de Darcy étant la source la plus importante. Il faut bien noter que Fanning a utilisé le rayon hydraulique, R au lieu de D . Ainsi, le coefficient f de Darcy est quatre fois plus grand que le coefficient f' de Fanning.

Au début du 20^{ème} siècle, Ludwig Prandtl (**1875-1953**) et ses étudiants Theodor von Karman (**1881-1963**), Paul Richard Heimich Blasius (**1883 - 1970**), et Johann Nikuradse (**1894-1979**) ont tenté de fournir une prédiction analytique du coefficient de frottement en utilisant la nouvelle théorie des couches limites de Prandtl. Apparemment, Blasius (1913) a été la première personne à appliquer la théorie des similitudes pour établir que le coefficient de friction f est fonction du nombre de Reynolds en s'appuyant sur les données de Nikuradse.

Les tuyaux rugueux offrent un défi supplémentaire. Avec un nombre de Reynolds élevé dans les tuyaux rugueux, le coefficient de frottement f devient une constante qui est fonction uniquement de la rugosité. Von Karman (1930) a développé pour les tuyaux rugueux une équation semblable à la formule des tubes lisses, confirmée par les données recueillies par Nikuradse (1933).

La zone de transition entre le régime laminaire et le régime turbulent dans les tuyaux rugueux a été définie de manière empirique par des mesures détaillées par Nikuradse (1933) sur des tubes présentant une rugosité uniforme. Ces données ont montré des tendances claires qui pourraient s'expliquer par l'interaction de la rugosité de la conduite avec la couche limite. Pour les conduites commerciales Cyril F. Colebrook (**1939**) a montré que dans la zone de transition f peut être décrit par une équation appelé équation de Colebrook-White.

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

Enfin, en 1942, Hunter Rouse (1906-1996) a intégré ces diverses formules en une structure utile. Il a noté que les équations ont été beaucoup plus complexes pour une utilisation pratique et qu'un diagramme pourrait être plus utile en intégrant toutes les formules. La contribution originale de Rouse est qu'en plus de la synthèse globale, il a défini la limite entre la zone de transition et la zone turbulente par la condition:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{\epsilon Re}{D 200} \quad (1.3)$$

Lewis Moody (1880-1953) était parmi l'audience scientifique quand Rouse a présenté son document en 1943. Moody a jugé que le diagramme de Rouse a été mal dessiné et il a décidé de le refaire.

Il faut noter que le diagramme de Moody est plus pratique à utiliser lors de la recherche d'une perte de charge avec débit et diamètre connus. Cependant, le diagramme de Rouse permet une solution directe non-itérative. Ainsi, chaque diagramme a ses avantages.

En 1942, Rouse semble être le premier à utiliser l'expression " l'équation de Darcy-Weisbach ", mais, cette désignation n'était pas acceptée par les auteurs scientifiques américains avant la fin des années 1980. Mais, ce qui est plutôt ironique, et contrairement à la pratique avec le nom de l'équation, le diagramme est universellement connu sous le nom de « diagramme de Moody », et les contributions des autres sont rarement reconnues.

Des efforts ont été déployés pour rationaliser la procédure et éliminer l'utilisation manuelle des graphes. Ainsi, en 1976, l'avancée la plus notable dans l'application de l'équation de Darcy-Weisbach a été faite par Prabhata K. Swamee et Akalank K. Jain qui ont publié des équations explicites pour le diamètre et la perte de charge à travers une conduite.

L'équation Darcy-Weisbach, combinée au diagramme de Moody est la méthode la plus fiable pour calculer les pertes de charge d'un écoulement de fluide dans une conduite. Avec cette méthode, les systèmes de tuyauterie peuvent être analysés et conçus pour tout fluide dans la plupart des conditions d'intérêt technique.

I.2.3 Calcul des pertes de charge

I.2.3.1 Pertes de charge linéaires

La perte de charge linéaire peut se déterminer par calcul en utilisant des formules empiriques ou des abaques, ou par une construction graphique à partir de grandeurs simples.

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

- **Le facteur de Henry DARCY (1803-1858) et l'équation de DARCY-WEISBACH [2]**

Dans la conception des systèmes de tuyauterie, le choix se situe entre la sélection du diamètre et de la perte de charge. Le choix d'un diamètre plus important conduit à un coût initial plus élevé. Mais la perte de charge est plus faible dans un tel cas, ce qui conduit à réduire le coût d'exploitation. Ainsi, il devient nécessaire d'enquêter sur la perte de charge pour différents diamètres de tuyau pour un débit donné. Un autre facteur qui affecte la perte de charge est la rugosité de la conduite. Il est facile de voir que la perte de charge dépend directement de la longueur et inversement du diamètre. La vitesse sera également un facteur et, dans ce cas, la perte de charge va dépendre du carré de la vitesse (voir équation (1.1)).

Alors on a :

$$\Delta p \propto \frac{Lv^2}{2D}$$

Il se trouve que la constante de proportionnalité dépend d'autres facteurs. Dans un tel procédé de détermination, **Darcy** a défini un coefficient de frottement f comme suit:

$$f = \frac{4\tau_0}{(\rho u_m^2/2g)} \quad (1.4)$$

Avec l'utilisation de la définition du facteur de friction de Darcy et les conditions d'équilibre mécanique. Prenons une longueur élémentaire L dans le tuyau. Les pressions aux sections 1 et 2 sont P_1 et P_2 .

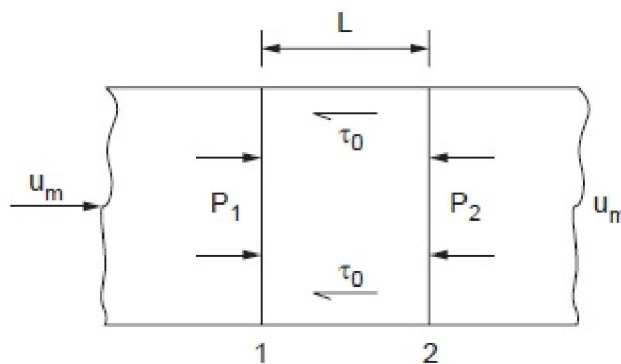


Figure I.7 :Elément de conduite

- La force de pression nette est $(P_1 - P_2) \frac{\pi D^2}{4}$
- La contrainte de cisaillement nette est $\tau_0 \pi D L$

Pour un équilibre des forces :

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

$$(P_1 - P_2) \frac{\pi D^2}{4} = \tau_0 \cdot \pi D L$$

D'après la définition du facteur de friction :

$$\tau_0 = \frac{f \rho u_m^2}{8g}$$

On remplace dans la première équation :

$$\Delta p \cdot \frac{\pi D^2}{4} = \frac{f \rho u_m^2}{8g} \cdot \pi D L$$

Ce qui nous donne :

$$\Delta p = \frac{f \rho L u_m^2}{2gD} \quad (1.5)$$

L'équation (1.5) est appelée **l'équation de Darcy-Weisbach** et elle est généralement applicable dans la plupart des problèmes d'écoulement dans les tuyaux (n'importe quel régime d'écoulement).

Il faut noter que Darcy et Weisbach ont été les premiers qui ont écrit une formule pour la résistance dans les conduites fermées, ils ont rapporté que dans la région turbulente le coefficient de frottement dépend du nombre de Reynolds pour les tubes lisses et les deux facteurs (nombre de Reynolds, rugosité) dans les tuyaux rugueux.

- **L'équation de HAGEN-POISEUILLE (1840) [2]**

Dans le cas d'un écoulement laminaire dans les conduites une autre équation est disponible pour le calcul des pertes de charge. L'équation est dérivée dans cette section.

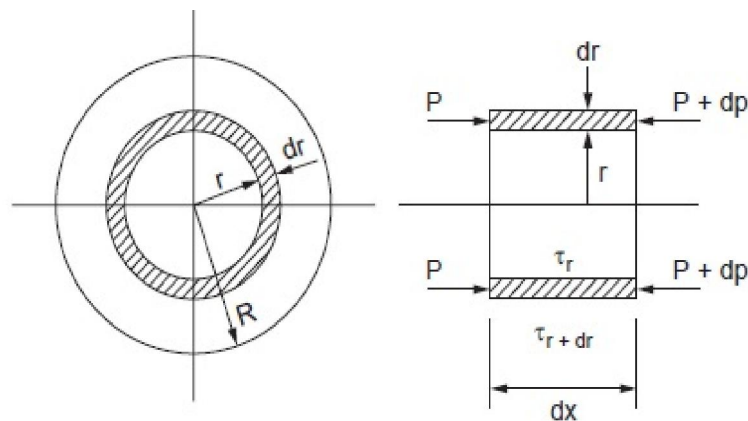


Figure I.8 : Section d'un élément de conduite

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

- La force de pression nette est $dp2\pi r dr$
- La contrainte de cisaillement nette est $\frac{d}{dr} \left(\mu \frac{du}{dr} 2\pi r dx \right) dr$

On aura :

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} r$$

Intégrons :

$$r \frac{du}{dr} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{r^2}{2} + C$$

Pour $r = 0$, $C=0$

Intégrons encore une fois, puis simplifions, on aura :

$$u = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{r^2}{4} + B$$

Pour $r = R$, $u = 0$ (à la paroi)

$$B = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{R^2}{4}$$

Ce qui nous donne :

$$u = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{R^2}{4} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

La vitesse est maximale pour $r = 0$,

$$u_{max} = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{R^2}{4}$$

Cela peut aussi être exprimé en termes de débit volumique Q :

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} u_m \Rightarrow u_m = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

$$\Delta P = \frac{128 \mu L Q}{\pi D^4}$$

Convertissons Δp en hauteur Δh

$$\Delta h = \frac{32 \mu L u_m}{D^2} \tag{1.6}$$

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

Cette équation est connue comme équation de Hagen-Poiseuille, et elle est applicable pour un écoulement laminaire seulement.

- **La formule de Nikuradse [3]**

Nikuradse (1933) a vérifié la théorie de Prandtl et il a proposé l'équation de la résistance universelle suivante pour les écoulements turbulents dans les canalisations lisses :

$$\frac{1}{f} = 2 \log(Re \sqrt{f}) - 0.8 \quad (1.7)$$

f : facteur de friction de Darcy

Re : nombre de Reynolds

- **La formule de Von Karman-Nikuradse [2]**

Dans le cas d'un écoulement dans une conduite rugueuse, le débit est dominé par la rugosité des parois de la conduite et le facteur de friction f est fonction uniquement de la rugosité relative (ϵ/D) et il est indépendant du nombre de Reynolds Re .

La forme suivante de l'équation est dérivée premièrement par Von Karman et soutenu plus tard par les expériences de Nikuradse :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.74 - 2 \log \left(\frac{\epsilon}{D} \right) \quad (1.8)$$

ϵ : rugosité de la conduite

f : facteur de friction de Darcy

D : diamètre intérieur de la conduite

- **La formule de Cyril Frank COLEBROOK (1910-1965) [3]**

En 1939, afin de couvrir la région transitoire, Colebrook a combiné les équations des parois lisses avec celles des parois rugueuses dans une formule d'interpolation intelligente :

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{Re_d f^{1/2}} \right) \quad (1.9)$$

Cette équation couvre non seulement la région de transition, mais elle est valable pour tous les tuyaux (rugueux et lisses) et elle est connue sous le nom de « l'équation de Colebrook-White »

ϵ : rugosité de la conduite

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

f : facteur de friction de Darcy

d : diamètre intérieur de la conduite

Re : nombre de Reynolds

C'est la formule de calcul la plus acceptée pour l'évaluation du coefficient de frottement des écoulements turbulents. Elle a été tracée en 1944 par Moody dans ce qui est maintenant appelé le diagramme de Moody.

En 1965, le Bureau du rapport de réclamation a affirmé que l'équation de Colebrook-White a été jugée inadéquate. En outre, plusieurs chercheurs ont constaté que l'équation de Colebrook-White est insuffisante pour les tuyaux dont le diamètre est inférieur à 2,5 mm.

- **Le diagramme de Lewis MOODY (1880–1953)**

Le diagramme de Moody est probablement la figure la plus célèbre et utile en mécanique des fluides. Il est précis à $\pm 15\%$ d'erreur pour les calculs de conception sur la gamme complète représentée sur la **Figure I.9**.

Il peut être utilisé pour les écoulements dans les conduites circulaires et non circulaires, les données peuvent même être adaptées comme une approximation des couches limites

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

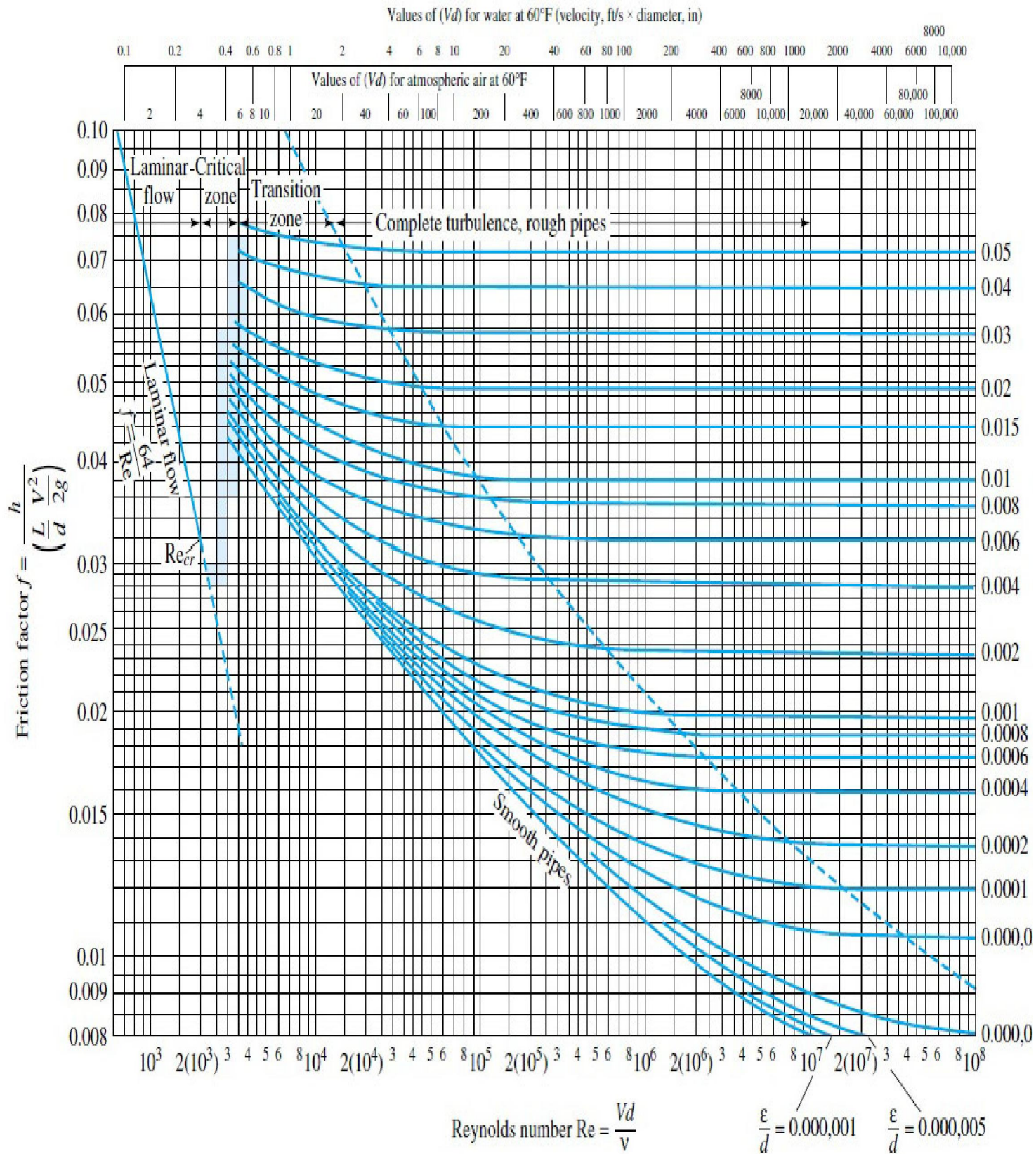


Figure I.9 : Diagramme de Moody

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

- **La formule de Paul BLASIUS (1883–1970) [2]**

L'équation de Blasius est l'équation la plus simple pour calculer le facteur de friction de Darcy, parce qu'elle ne comporte pas de terme pour la rugosité de la conduite, elle est valable uniquement pour des tubes lisses. Mais parfois elle est utilisée pour les tuyaux rugueux à cause de sa simplicité.

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \quad (1.10)$$

- **La formule de Wood (1966) [4]**

En 1966, Wood a proposé l'équation suivante :

$$f = a + bRe^{-c} \quad (1.11)$$

où :

$$a = 0.53 \left(\frac{\epsilon}{D} \right) + 0.094 \left(\frac{\epsilon}{D} \right)^{0.225}$$

$$b = 88 \left(\frac{\epsilon}{D} \right)^{0.44}$$

$$c = 1.62 \left(\frac{\epsilon}{D} \right)^{0.134}$$

Cette équation est valable pour un nombre de Reynolds $Re > 10000$ et une rugosité relative $10^{-5} < \frac{\epsilon}{D} < 0.04$.

- **La formule de SWAMEE-JAIN (1976) [1]**

Swamee et Jain ont développé l'équation suivante pour le facteur de friction de Darcy :

$$\frac{1}{f^{1/2}} = 0.25 \left[\log \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad (1.12)$$

Cette formule est explicite en f .

- **La formule de Churchill (1977) [4]**

Churchill a affirmé que son équation est valable quelque soit Re et ϵ/D :

$$f = 8 \left(\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{\frac{-3}{2}} \right)^{\frac{1}{12}} \quad (1.13)$$

où :

$$A = \left[-2 \log \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} \right) \right]^{16}$$

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

$$B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$$

- **La formule de HAALAND (1983)**

Haaland a donnée une autre formule explicite :

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (1.14)$$

La précision du facteur de friction de Darcy calculé par cette équation est de $\pm 2\%$, si le nombre de Reynolds est supérieur à 3000.

- **La formule de Romeo- Al (2002)**

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon}{3.7065 D} - \frac{5.0272}{Re} A \right] \quad (1.15)$$

où

$$A = \log \left(\frac{\epsilon}{3.827 D} - \frac{4.567}{Re} \log \left(\left(\frac{\epsilon}{7.7918 D} \right)^{0.9924} + \frac{5.3326}{208.815 + Re} \right)^{0.9345} \right)$$

I.2.3.1.1 Domaine d'applications des corrélations précédentes

Tableau I.2 : Formules de calcul des pertes de charge linéaires

Régime turbulent / Paroi lisse		
Blasius	$2300 < Re \leq 10^5$	
Nikuradse	$Re > 10^5$	
(a)		
Régime turbulent / Paroi rugueuse		
Moody	$4000 \leq Re \leq 10^7$	
Wood	$Re > 10000$	$10^{-5} < \epsilon/d < 0.04$
Swamee - Jain	$5000 \leq Re \leq 10^7$	$0.00004 < \epsilon/d < 0.05$
Colebrook		
Haaland	$Re > 3000$	
Romeo- Al		
(b)		
Autres corrélations		
Churchill	Applicable quelque soit Re et ϵ/d	
Hagen-Poiseuille	Régime laminaire	
Von Karman-Nikuradse	Indépendante de Re	
(c)		

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

I.2.3.2 Pertes de charge singulières

Les singularités hydrauliques sont présentes dans tous les réseaux. Il peut s'agir de coudes, clapets, vannes, changements de pente ou de section, entrée ou sortie d'un réservoir, grilles, branchements et bifurcations, regard... Toutes ces singularités sont responsables d'une dissipation d'énergie par turbulence qui affecte l'écoulement. Dans beaucoup de situations où le système hydraulique analysé est très étendu et les singularités hydrauliques sont modérées, les pertes de charge singulières peuvent être négligées par rapport aux pertes de charge linéaires par frottement. Dans d'autres situations, les pertes de charge singulières deviennent très importantes, voire même prépondérantes par rapport aux pertes de charge linéaires et ne peuvent plus être négligées.

En tout état de cause, les méthodes de calcul de ces pertes de charge singulières seront exposées. Une formule simple permettra de mesurer l'importance des pertes de charge singulières par rapport aux pertes de charge linéaires.

D'une manière générale, les pertes de charge singulières peuvent être estimées à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta h = K \frac{v^2}{2g} \quad (1.16)$$

ou encore, en remplaçant v par $4Q/\pi D^2$:

$$\Delta h = 0.0827K \frac{Q^2}{D^4}$$

où :

v : est la vitesse moyenne dans la conduite

D : le diamètre de la conduite

K : une constante qui dépend du type de singularité

Les valeurs de K sont indiquées dans les paragraphes qui suivent pour donner des ordres de grandeur. Il existe parfois des différences notables entre les valeurs de K déclarées dans les différents ouvrages et manuels pour la même singularité. Ces différences peuvent s'expliquer principalement par la variation des dimensions et les variantes de fabrication.

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

- **Elargissement brusque [5]**

Les pertes de charge dans ce cas sont dues à l'expansion du fluide dans un espace plus grand, s'accompagnant d'une diminution de vitesse et d'une augmentation de la pression. Borda (1733-1799) est le premier à avoir établi la formule de perte de charge dans un élargissement brusque. Par application de l'équation de quantité de mouvement au volume compris entre les sections 1 et 2 de la *figure I.10*, on trouve :

$$\Delta h = \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]^2 \frac{v^2}{2g} \quad (1.17)$$

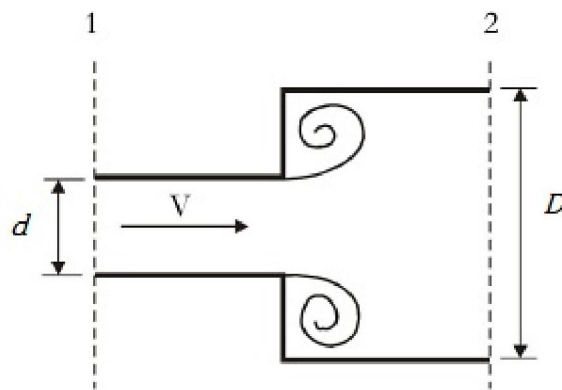


Figure I.10 : Elargissements brusques

Le coefficient de perte de charge singulière vaut par conséquent :

$$K = \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]^2 \quad (1.18)$$

Remarque :

La vitesse V à prendre en considération dans les calculs est celle qui prévaut avant l'élargissement (*figure I.10*)

- **Rétrécissements brusques [5]**

Ce phénomène est similaire à celui de l'élargissement brusque. Le décollement de la veine liquide au niveau du rétrécissement provoque une contraction de la section d'écoulement qui passe de S_1 à S_c (*figure I.11*) [6]. La section d'écoulement augmente ensuite comme dans un élargissement progressif pour atteindre S_2 .

Au niveau de la section contractée S_c , la vitesse augmente et la pression diminue avec un risque de cavitation.

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

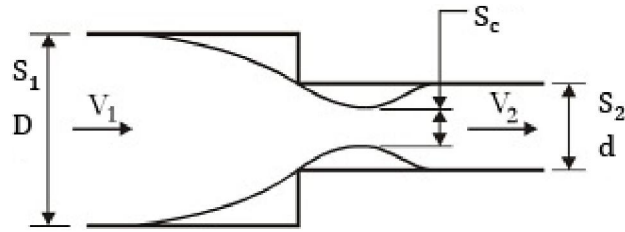


Figure I.11 : Rétrécissement brusque

La figure I.12 [3] fournit des valeurs de K en fonction de d/D pour l'élargissement et le rétrécissement brusques.

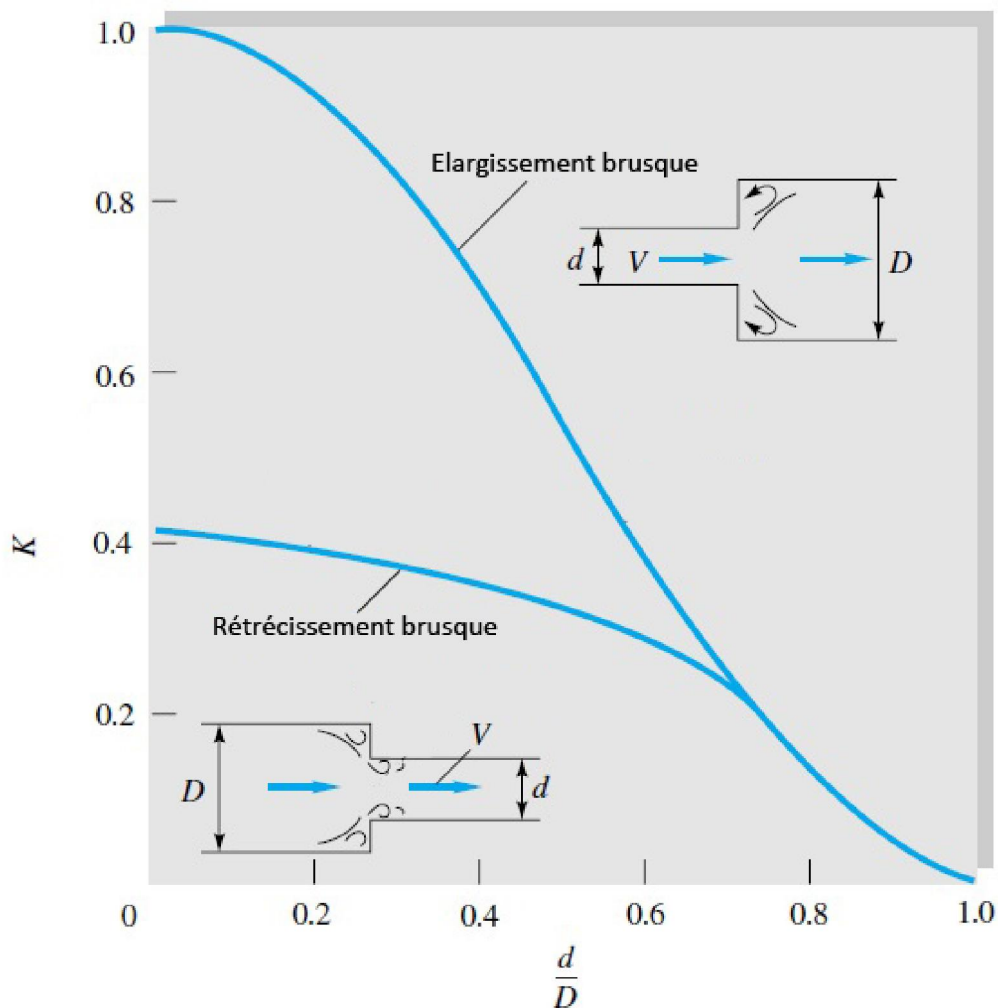


Figure I.12 : Coefficient de perte de charge pour l'élargissement et le rétrécissement brusques

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

• Vannes et robinets

Les pertes de charge singulières dans les vannes et robinets sont causées principalement par l'élargissement brusque après la restriction causée par la vanne ou le robinet. Pour certaines vannes, la déviation de l'écoulement à travers un chemin sinueux cause une perte d'énergie supplémentaire. Le coefficient de perte de charge singulière K peut atteindre une valeur infinie quand la vanne est complètement fermée. La valeur de K diminue à mesure qu'on ouvre la vanne.

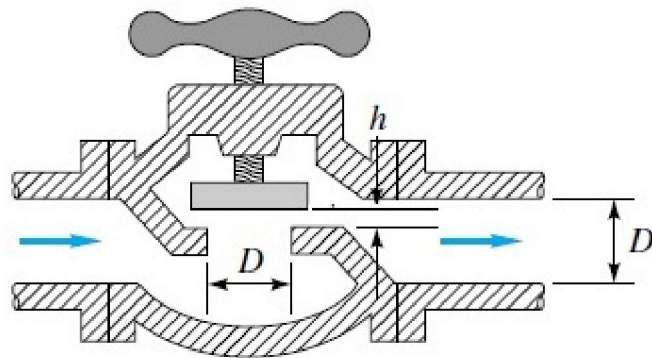


Figure I.13 : Robinet-vanne

Pour un robinet vanne (figure I.13), les ordres de grandeur des valeurs de K en fonction du degré de fermeture h/D sont donnés à la figure I.14. [3]

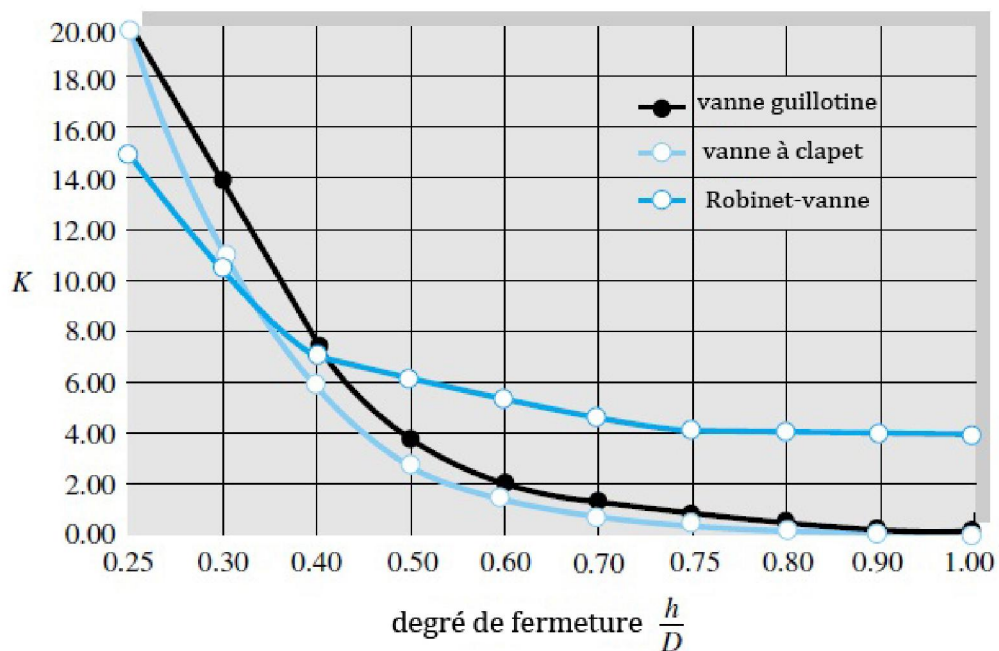


Figure I.14 : Coefficient de perte de charge pour les vannes

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

- **Coudes**

La déviation de l'écoulement dans un coude s'accompagne de forces centripètes qui modifient localement les champs de pression et de vitesse dans une section transversale à l'écoulement (*figure I.15*). [6]

Ainsi, dans un plan horizontal, la pression augmente en direction opposée au centre de courbure O selon la deuxième équation d'Euler :

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho \frac{v^2}{r} \quad (1.19)$$

où:

p : est la pression,

n : la coordonnée curviligne selon l'axe perpendiculaire,

r : le rayon de courbure local,

ρ : la masse volumique de l'eau,

v : la vitesse d'écoulement.

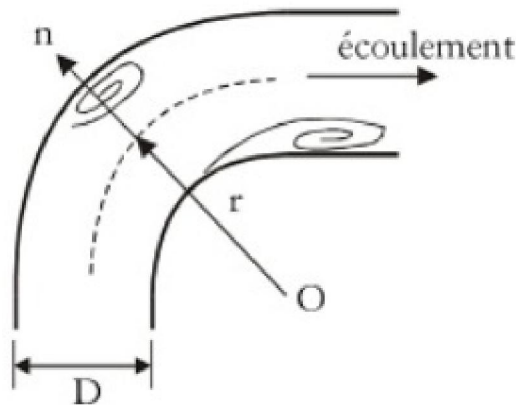


Figure I.15 : Coude arrondi

Inversement, la vitesse d'écoulement diminue en direction opposée au centre de courbure O. Cette perturbation locale de l'écoulement se manifeste par la formation de deux régions séparées qui sont le siège de mouvements.

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

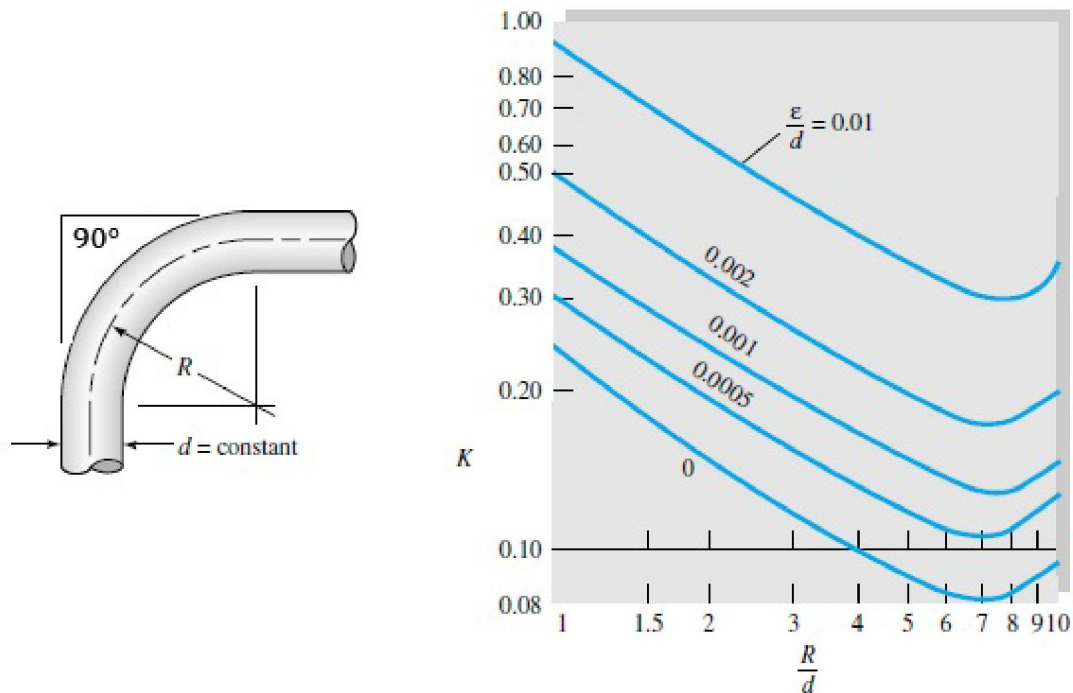


Figure I.16 : Valeurs de K pour un coude arrondi à 90°

- **Organes déprimogènes**

Un organe déprimogène est un appareil inséré dans une conduite de manière à limiter l'écoulement du fluide et ainsi créer une pression différentielle de part et d'autre de cet appareil.

Parmi les organes déprimogènes on trouve :

- **Le diaphragme**

Un diaphragme (*figure I.17*) est une plaque rigide de faible épaisseur et percée d'un orifice. Cette plaque s'introduit dans la canalisation perpendiculairement au sens d'écoulement. Le liquide dont le débit est constant voit obligatoirement sa vitesse augmenter au passage de l'orifice. Dans le même temps, on observe une variation opposée de la pression, c'est-à-dire une chute de la pression statique au niveau de l'orifice.

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

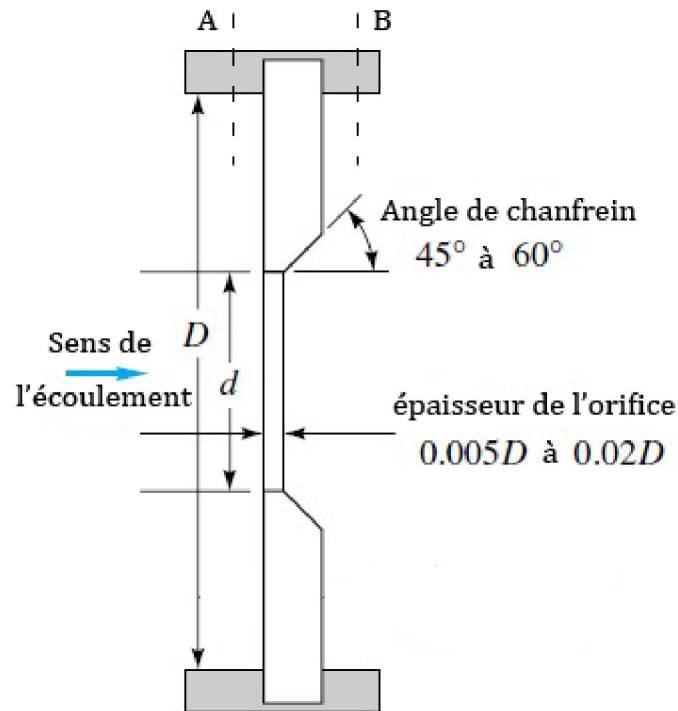


Figure I.17 : Diaphragme

L'équation de Bernoulli exprime la conservation de l'énergie volumique totale, ou pression totale.

Entre le point A et le point B, on peut donc écrire :

$$Q_v = s \sqrt{\frac{2}{\rho(1-d^4/D^4)}} \sqrt{p_A - p_B} \quad (1.20)$$

Dans la pratique on s'aperçoit que cette équation n'est pas vraiment vérifiée.

En effet, pour des raisons inertielles, le jet de fluide se contracte encore pendant quelques centimètres après l'orifice. Sa section de passage au niveau de la prise de pression aval est donc plus faible que la section de l'orifice; cette section est difficile à calculer. Il a donc été établi de façon expérimentale un coefficient C_d appelé **coefficient de décharge** dont la valeur dépend de l'écoulement (valeur du nombre de Reynolds) et du rapport $\frac{d}{D}$, appelé **rapport d'ouverture** et noté β .

On a donc la relation suivante :

$$Q_m = s C_d \sqrt{\frac{2\rho}{(1-\beta^4)}} \sqrt{\Delta p} \quad (1.21)$$

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

D'où, nous pouvons tirer les valeurs du coefficient de décharge de la courbe représenté dans la figure ci-dessous. [3]

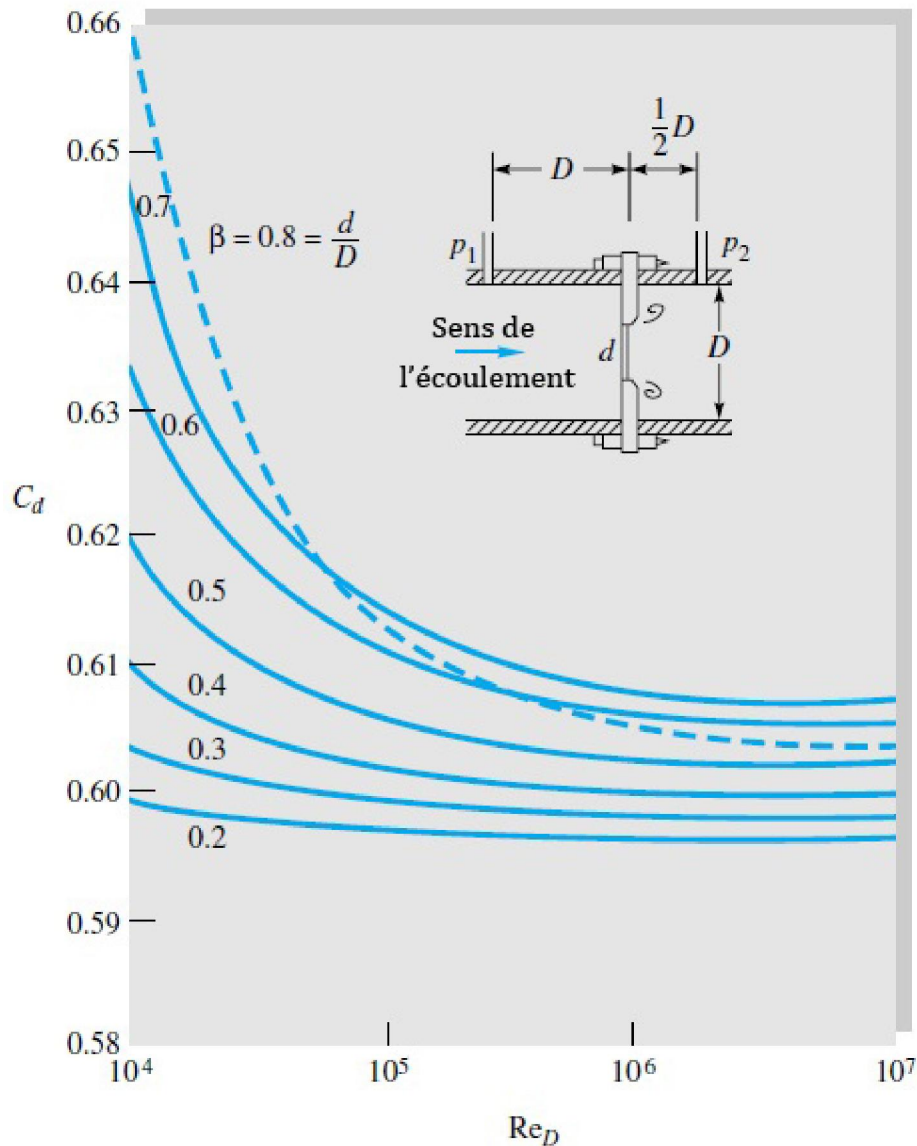


Figure I.18 : Valeurs de coefficient de décharge pour diaphragmes

➤ Le tube de Venturi

Un tube de Venturi est une conduite dont la section est variable. Dans une première partie, les sections vont en décroissant (zone convergente), dans la deuxième partie, les sections vont en augmentant (zone divergente). Un tube de Venturi est donc un « convergent-divergent »

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

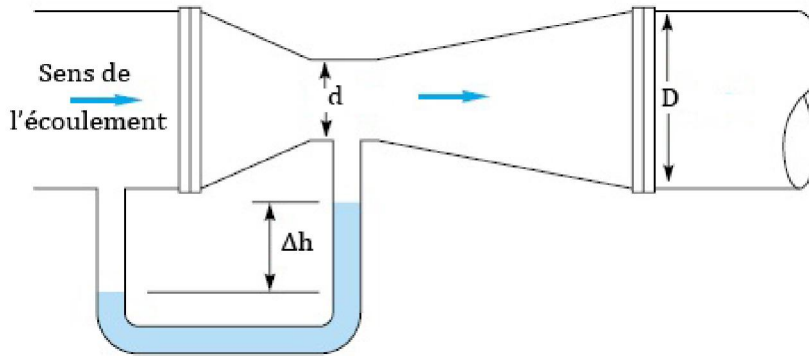


Figure I.19 : Tube de Venturi

Les avantages principaux sont une moindre perte de charge et un faible encrassement. Ils sont donc bien adaptés à la mesure de fluide visqueux ou chargé. Ils sont cependant plus chers à l'achat qu'un diaphragme.

Comme dans le diaphragme, si on applique le théorème de Bernoulli entre A et B, on trouve la même expression que précédemment :

$$Q_m = sC_d \sqrt{\frac{2\rho}{(1 - \beta^4)}} \sqrt{\Delta p}$$

Le coefficient de décharge pour le Venturi est représenté par la courbe de la *figure I.20* ci-dessous. [3]

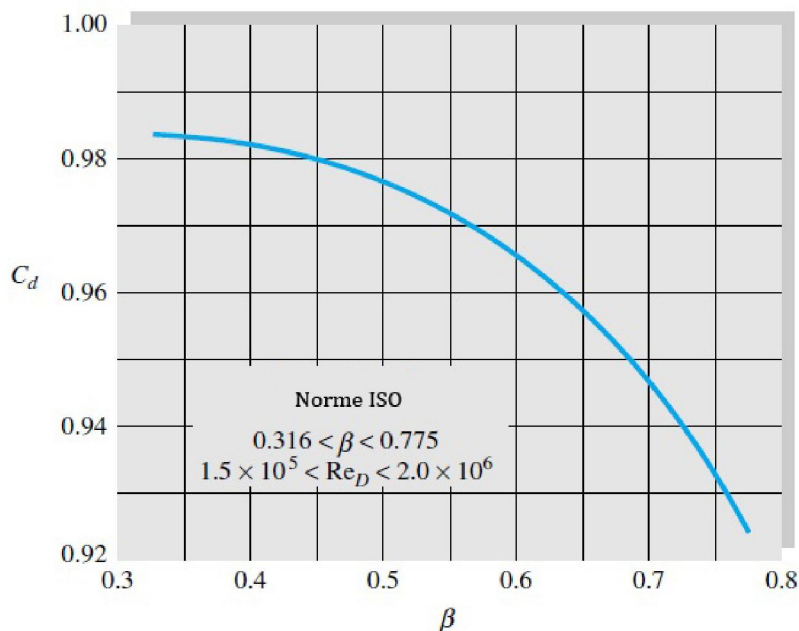


Figure I.20 : Valeurs de coefficient de décharge d'un Venturi (Norme ISO)

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

I.2.4 Perte de charge d'un circuit hydraulique

Soit un circuit hydraulique composé de N_r tronçons de diamètre D_i et de N_s singularités en série, la perte de charge totale est donnée par :

$$\Delta h = \sum_i^{N_r} f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{v_i^2}{2g} + \sum_j^{N_s} K_j \frac{v_j^2}{2g} \quad (1.22)$$

Dans l'exemple du tronçon de circuit ci-dessous (*figure I.21*), la perte de charge totale s'exprimera sous la forme :

$$\Delta h = f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} + K_2 \frac{V_2^2}{2g} + f_3 \frac{L_3}{D_3} \frac{V_3^2}{2g}$$

où f_1 et f_3 sont respectivement les coefficients de pertes de charge régulières pour les sections S_1 et S_3 , et K_2 est le coefficient de perte de charge singulière pour l'élargissement progressif rencontré par le fluide.

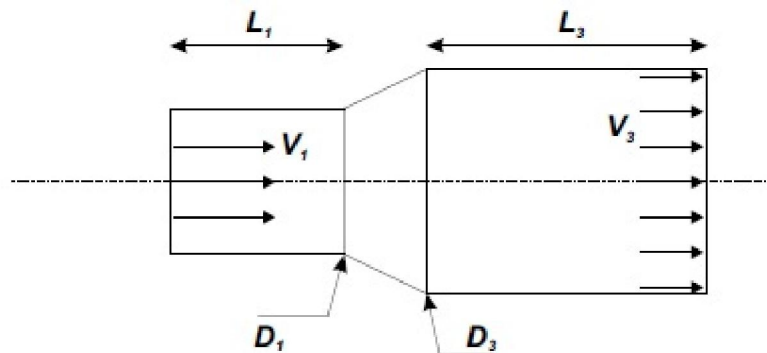


Figure I.21 :Elément d'un circuit hydraulique

Remarque : dans un circuit hydraulique fermé, la somme de toutes les pertes de charge doit être égale à la somme des gains de charge (comme l'apport de charge par des pompes).

I.2.5 Notion de Longueur équivalente

Plusieurs formules ont été proposées pour calculer les pertes de charge linéaires et singulières. L'équation de Bernoulli corrigée qui tient compte de ces deux pertes de charges s'écrit :

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + 0.0827 fL \frac{Q^2}{D^5} + 0.0827 \frac{Q^2}{D^4} \sum K_i \quad (1.23)$$

Peut-on simplifier les calculs des pertes de charge? Considérons, à titre d'exemple, une vanne qui présente une singularité hydraulique et produit une perte de charge singulière. Pour simplifier les calculs, nous désirons remplacer (virtuellement) cette singularité par une conduite de longueur équivalente L_{eq} sur laquelle se produirait une perte de charge par frottement égale à la perte de charge singulière. C'est la longueur équivalente qui viendra majorer la longueur physique réelle pour tenir compte des pertes de charge singulières, tel que le montre schématiquement la figure.

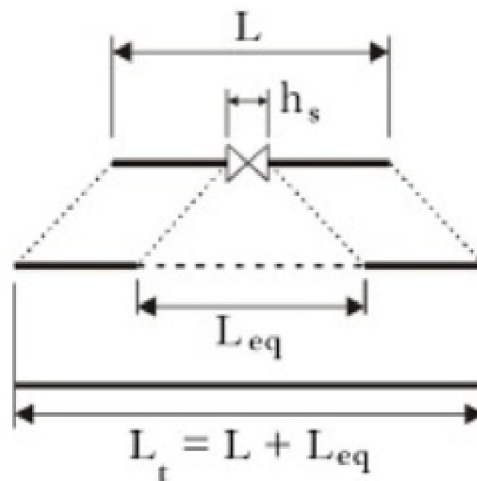


Figure I.22 : Schéma représentatif de la longueur équivalente pour une vanne

Mathématiquement, on écrit : $0.0827 f \frac{L_{eq} \cdot Q^2}{D^5} = 0.0827 K \frac{Q^2}{D^4}$, soit :

$$L_{eq} = \frac{KD}{f} \quad (1.24)$$

A l'aide de cette relation, l'équation (1.23) devient :

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + 0.0827 fL_t \frac{Q^2}{D^5}$$

Où : L_t est la longueur totale, $L_t = L + \sum L_{eq}$

Cette notion de longueur équivalente ne fait pas que simplifier l'écriture des calculs mais permet aussi aux techniciens d'utiliser la même terminologie que celle utilisée par les fournisseurs d'équipements hydrauliques. En effet, ce sont les longueurs équivalentes, correspondant aux

Chapitre I : Présentation de l'installation et considérations théoriques sur les pertes de charge.

différents accessoires hydrauliques, qui sont fournies dans les catalogues et non les valeurs de K. Il faut cependant souligner que d'après la formule (1.24), la longueur équivalente dépend aussi du matériau et du diamètre de la conduite sur laquelle est installée la singularité.

Cette notion de longueur équivalente permet de mesurer l'importance des pertes de charge singulières par rapport aux pertes de charge linéaires moyennant le rapport $\frac{\Sigma L_{eq}}{L_t} \times 100\%$

I.3 Conclusion

Après avoir décrit le banc d'essai sur lequel nous allons travailler tout au long de la réalisation de notre projet, nous avons rappelé ce que sont les pertes de charge, tenté de reconstituer l'évolution historique de l'idée même de la perte de charge, ceci nous a donné l'occasion de rendre hommage à de grands savants qui nous ont laissé tant de choses. Au chapitre suivant, nous nous pencherons sur notre banc d'essai pour en établir l'état de santé et tenté de remédier à ces maux.

Chapitre II

Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons procéder à une analyse méthodique de l'installation en examinant les équipements l'un après l'autre afin d'établir un diagnostic sur l'état actuel du système. Au terme de cette analyse, nous espérons être en mesure de répondre aux questions suivantes : Tel équipement, se trouve-t-il dans un état qui lui permet encore de remplir son rôle sans fausser les mesures lors de la conduite d'essais sur le banc ? Sinon, quelle est la nature de sa défaillance ? Peut-on y remédier en utilisant les seuls moyens disponibles au niveau du laboratoire ? Sinon envisager la possibilité de recourir à de petits achats pour dépanner l'élément défaillant ? Au pire proposer une solution et dire quels sont les moyens nécessaires pour sa réalisation. Dans cette optique, le principe de notre intervention consiste à mettre en place une démarche progressive et organisée qui applique les trois phases suivantes pour chaque élément de l'installation :

- En premier lieu, nous avons fait une collecte des données et des informations à l'aide d'un examen préalable, ensuite les résultats obtenus ont été comparés aux informations de référence, relatives à l'installation réputée en bon état.

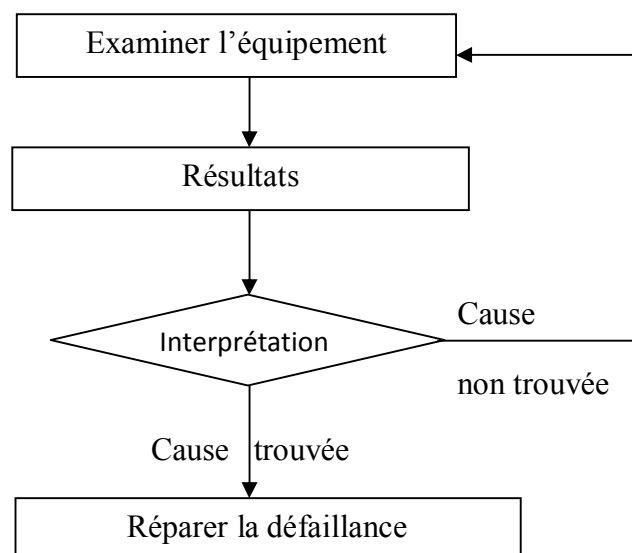


Figure II-1 : Organigramme de la méthodologie suivie

- Dans la phase suivante, les données collectées nous aideront à déterminer les causes des défaillances avérées (voir organigramme ci-dessus).
- Au cours de la troisième phase, nous procéderons aux réparations possibles et nous ferons le compte rendu des actions accomplies.

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

II.1 Le réservoir qui alimente les conduites

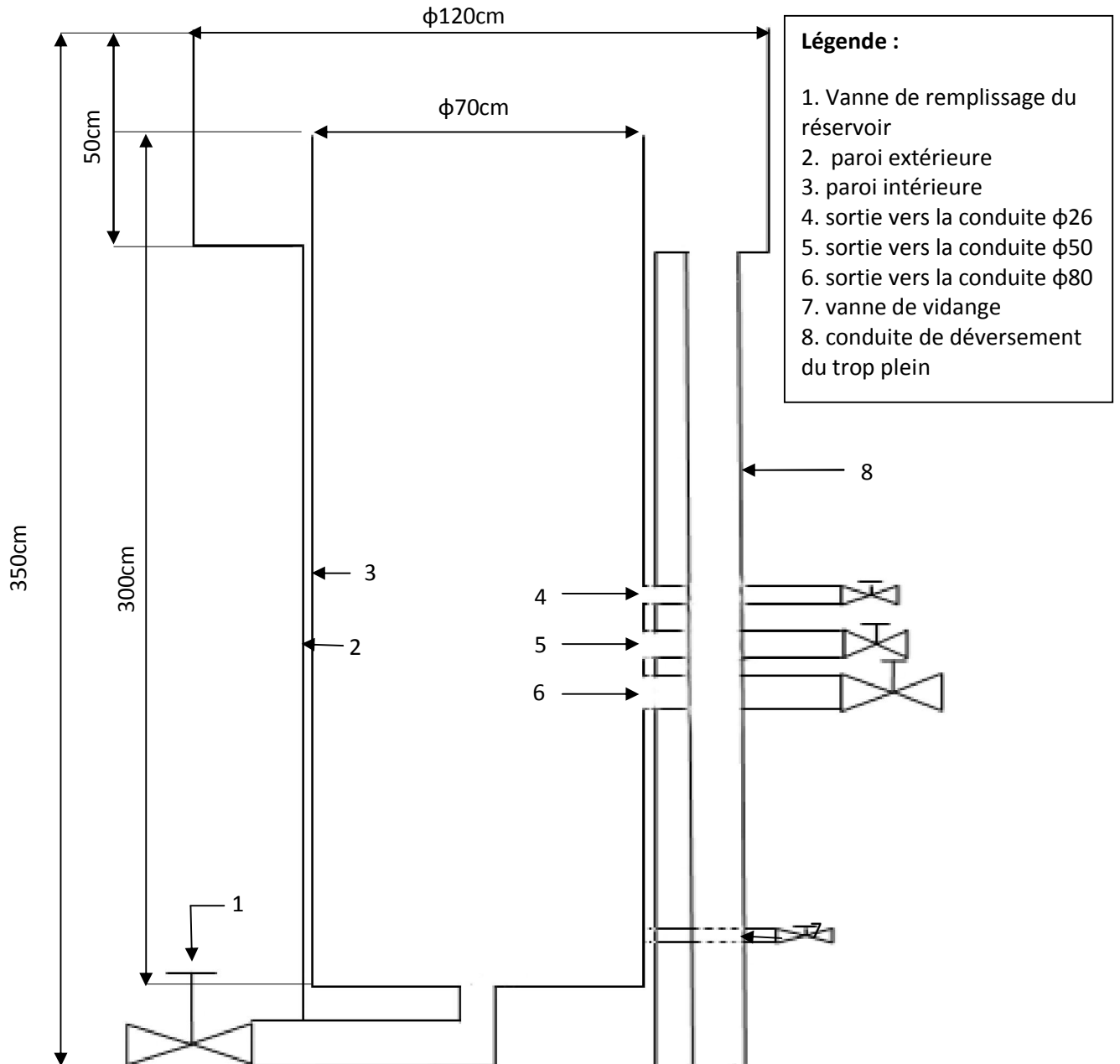


Figure II-2 : Schéma descriptif du réservoir

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

II.1.1 Opération effectuées : Pour vérifier l'état du réservoir, on est intervenus de deux façons :

- On a d'abord procédé à l'examen de l'intérieur du réservoir vide à l'œil nu en utilisant une lampe. Cet examen nous a permis de relever des traces d'oxydation à l'intérieur ainsi que la présence de dépôts (cailloux, boue,...).
- Ensuite, on a procédé au remplissage du réservoir en ouvrant la vanne d'alimentation située en amont. Ce deuxième test nous a permis de vérifier que la vanne de remplissage fonctionne normalement et qu'il n'y a pas de fuites à partir du réservoir.



Figure II-3 : L'eau est boueuse dans le réservoir

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

II.1.2 Analyse des résultats de l'observation :

- Les traces d'oxydation sont dues à la dégradation du revêtement de protection de la paroi intérieur du réservoir.
- La boue présente dans l'eau est due au fait que le bassin d'où est alimenté le réservoir n'est pas étanche et à l'arrivée des eaux pluviales dans le bassin en provenance des infiltrations récurrentes constatées notamment les jours de grosses pluies.

II.1.3 Remise en état :

Afin de débarrasser le réservoir des dépôts et des cailloux, nous avons procédé à l'évacuation de l'eau sale mais cela n'a pas suffi. Les problèmes du réservoir ne sauraient être réglés sans le démonter pour intervenir correctement sur ces surfaces internes ; malheureusement son démontage n'est pas si simple et les moyens dont nous disposons sur place ne sont pas adaptés pour intervenir correctement pour le restaurer et le nettoyer. Pour éviter les salissures de l'eau dans le bassin, notre intervention ne saurait non plus être suffisante.

II.2 Les compteurs d'eau totaliseurs

II.2.1 Opérations effectuées :

Pour établir un diagnostic concernant les compteurs, nous avons procédé comme suit :

- L'installation étant alimentée, nous avons ouvert les deux vannes (celle de garde et celle de réglage), ensuite nous avons vérifié la fonctionnalité des trois compteurs. L'état des compteurs était comme suit :
 - Conduite de Ø26 : compteur en panne
 - Conduite de Ø50 : compteur en état de marche
 - Conduite de Ø80 : compteur en panne
- Les compteurs ont été ensuite démontés afin de leur faire subir un examen approfondi. Nous avons ainsi pu constater que :
 - Le compteur de la conduite de diamètre Ø80, avait les ailettes de son hélice bloquées par des cailloux.
 - Le compteur de la conduite de Ø26 avait son filtre encrassé. Ce compteur semble inadapté pour ce type d'installation, il y a fort à parier qu'il s'arrêtera de fonctionner le plus fréquemment.

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations



Figure II-4 : Réparation des compteurs

Les surfaces des parois internes des conduites, juste en amont des compteurs, étaient rouillées comme le montrent les figures suivantes:



Figure II-5 : A la sortie du réservoir : corrosion et absence de filtres

II.2.2 Actions de remédiation

- Le blocage de l'hélice par des cailloux étant dû aux impuretés entraînées par l'eau dans son écoulement combinées à l'inexistence d'un filtre à l'entrée du compteur de la conduite de $\varnothing 80$, nous avons débloqué puis nettoyé les ailettes de l'hélice, en guise de

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

filtre nous avons mis un tamis en plastique et nous avons remonté le compteur après avoir nettoyé autant que faire se peut la rouille de la partie accessible de la conduite.

- Pour le compteur de la conduite de Ø26 , nous avons agi à l'acide ascitique pour déboucher le filtre, puis nous avons procédé comme pour le premier compteur.

II.3 Les vannes de garde et les vannes de réglage de débit

II.3.1 Opérations effectuées

Le système étant alimenté, les vannes de réglage de débit ouvertes, on a commencé à vérifier le bon fonctionnement et l'étanchéité des vannes de garde en :

- Essayant d'ouvrir et de refermer chaque vanne.
- Démontant les vannes non fonctionnelles.

II.3.2 Observations :

Les vannes de réglage de débits sont en bon état. Quant aux vannes de garde, la situation était la suivante :

- Ø50 : la vanne est en bon état
- Ø26 : la vanne ne fonctionne pas
- Ø80 : la vanne s'est révélée non étanche à la fermeture

Au démontage de ces deux dernières vannes, nous avons relevé :

- Des traces d'oxydation et des dépôts sur les clapets de la vanne de la conduite de Ø26.
- L'usure du joint d'étanchéité de la vanne.

II.3.3 Analyse et remédiation :

- Conduite de Ø26 : la vanne ne fonctionne pas car elle n'a pas été utilisée depuis un certain temps; les impuretés qui se trouvaient dans l'eau se sont déposées pour former une couche dure sur les clapets de la vanne en rendant l'ouverture et la fermeture de cette dernière très difficiles. Cette vanne a été remplacée par une vanne neuve qui était disponible au niveau du magasin d'énergétique.
- Conduite de Ø80 : La durée de vie du joint a été largement dépassée, on a donc procédé à son remplacement.

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

II.4 Les conduites

Les conduites sont la partie la plus importante du banc, elles sont au nombre de trois, ayant une longueur utile identique (9m) et des diamètres intérieurs différents (80mm, 50mm, 26mm) ; elles sont en acier galvanisé, ce qui leur confère une bonne résistance à la corrosion sur l'intérieur et l'extérieur des tubes. Chacune d'elle est constituée de tronçons raccordés entre eux à l'aide de brides en acier également galvanisé.

II.4.1 Opérations effectuées

Le système étant alimenté, on procède comme suit :

- On ferme la vanne de réglage tout en ouvrant la vanne de garde pour faire monter la pression à l'intérieur des conduites, et ce afin de permettre la vérification :
 - des fuites, soit dans les raccordements soit dans les conduites elles même
 - du bon fonctionnement des prises de pression
 - du bon serrage des raccordements

- Ensuite, nous avons démonté les différents tronçons (*figure II.6*) afin de nous assurer que :
 - Les orifices des prises de pression au niveau des conduites sont perméables.
 - Les surfaces intérieures des conduites sont en bon état.

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations



Figure II-6 : Démontage des différents tronçons constituant les conduites

II.4.2 Observations :

- Les parois intérieures sont recouvertes de saletés et de boue
- Montage incorrect sur la conduite de petit diamètre (inclinaison)
- Il manque des prises de pressions sur les conduites et même que certaines d'entre elles étaient bouchées
- Certains joints sont remplacés par des morceaux de chambre à air.
- Oxydation des brides de raccordement et des boulons de serrage.
- Fuites au niveau des brides de raccordement des singularités dans la conduite de plus grand diamètre.

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations



Figure II-7 : L'état des conduites au cours de leur démontage

II.4.3 Analyse des résultats obtenus :

- Les dépôts dus à la circulation de l'eau chargée de boue dans la conduite ont réduit le diamètre et accentué la rugosité de cette dernière.
- L'évidence que l'installation n'a pas bénéficié d'une maintenance depuis un bon moment.
- La présence de corrosion due au détachement de la couche protectrice (couche du zinc).

II.4.4 Remise en état :

Pour la remise en état des conduites, on a procédé comme suit :

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

- Nettoyage des conduites ; de l'intérieur a l'aide de l'esprit de sel et de l'acide ascétique ; et de l'extérieur en utilisant un dégrissant et une brosse métallique *figure II.8 (b) et (c)*
- Débouchage des orifices qui se trouvent autour de chaque section de la canalisation *figure II.8 (d)*
- Remplacement des joints usés
- Remplacement des boulons rouillés par des boulons inoxydables
- Ajout d'un filtre en amont de chaque conduite *figure II.8 (a)*
- Remplacement des prises de pression défectueuses.
- Remplacement d'une bride de singularité.



Figure II-8 : Les différentes opérations effectuées pour remédier à l'état des conduites

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

II.5 Les flexibles

La première impression que nous avons eu sur l'état des flexibles est qu'ils étaient mal entretenus et non fiables (les bulles d'air collaient fortement aux impuretés qui les souillaient à l'intérieur, difficile donc de purger avec de tels flexibles), nous avons donc été amenés à réfléchir à un moyen susceptible d'améliorer ce système pour le rendre plus performant.



Figure II-9 : L'état des flexibles avant de procéder à leur remplacement

II.5.1 Opérations effectuées :

Afin de vérifier si des flexibles pouvaient encore remplir leur rôle dans l'installation, nous avons mis en marche l'installation et branché les flexibles sur les prises de pression d'une part, et les tubes piézométriques d'autre part.

II.5.2 Observations :

- la formation de bulles d'air au niveau des flexibles.
- L'absence d'étanchéité au niveau des raccords des flexibles aux prises de pression et aux tubes piézométriques.
- la quantité de flexibles n'est pas suffisante pour couvrir les besoins de l'installation.

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

II.5.3 Analyse des résultats obtenus :

Après avoir vérifié l'état des flexibles, nous avons été convaincus qu'un tel système ne permettra jamais d'effectuer des essais réussis.

II.5.4 Remise en état :

Le système de flexibles a été complètement rénové (voir chapitre III)

II.6 Les tubes piézométriques :

Il était évident que le nombre de tubes piézométriques installés était insuffisant et que certains d'entre eux étaient cassés, il restait donc tout juste à voir si l'on ne pouvait pas récupérer ceux des tubes qui avaient l'air en bon état.

II.6.1 Opérations effectuées :

Le système étant alimenté, on a relié les prises de pression aux tubes piézométriques afin de vérifier s'ils étaient encore utilisables.

II.6.2 Observations :

Existence de fuites au niveau des raccordements des flexible avec les tubes. Ces dernières étaient dues à l'inexistence de joints à l'endroit où les tubes sont raccordés aux flexibles.

II.6.3 Remise en état :

Pour les tubes manquants, malheureusement, nous n'avons pas pu trouver des tubes assez longs, donc nous avons utilisé de petits morceaux cylindriques en plastic (50mm x 10mm) avec une colle spéciale pour assembler les tubes de plus petite longueur qu'on a trouvé.

Pour les branchements, nous avons utilisé des joints toriques dans les trous, ensuite nous avons utilisé de la silicone transparent afin d'éliminer définitivement les fuites.

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

II.7 Les singularités

Le banc compte cinq singularités de différents types, pour vérifier leur état, nous avons procédé comme suit :

II.7.1 Opérations effectuées et remise en état :

II.7.1.1 Mesure des dimensions des singularités :

À l'aide d'un pied à coulisse, d'une règle et d'un rapporteur, nous avons procédé aux prises de mesure des dimensions de chaque singularité :

- *L'élargissement - rétrécissement brusques :*

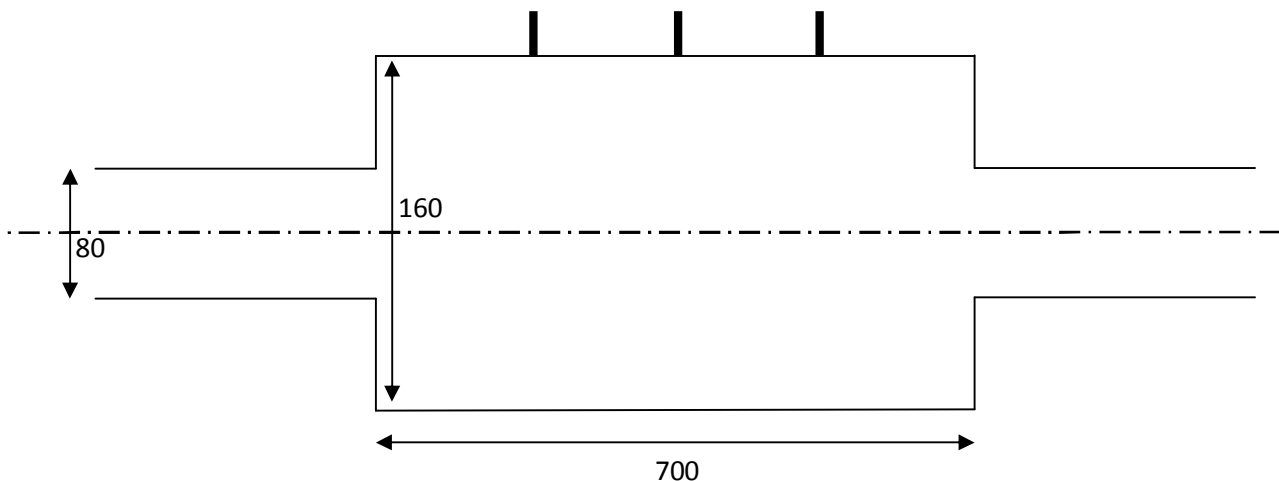


Figure II-10 : Schéma de l'élargissement - rétrécissement brusques

- *Le Diaphragme :*

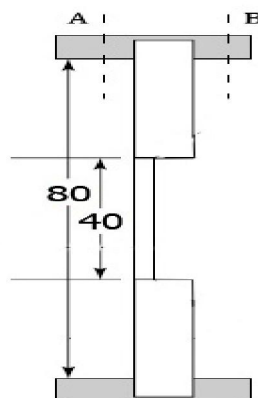


Figure II-11 : Schéma du diaphragme

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

- *Le tube de Venturi*

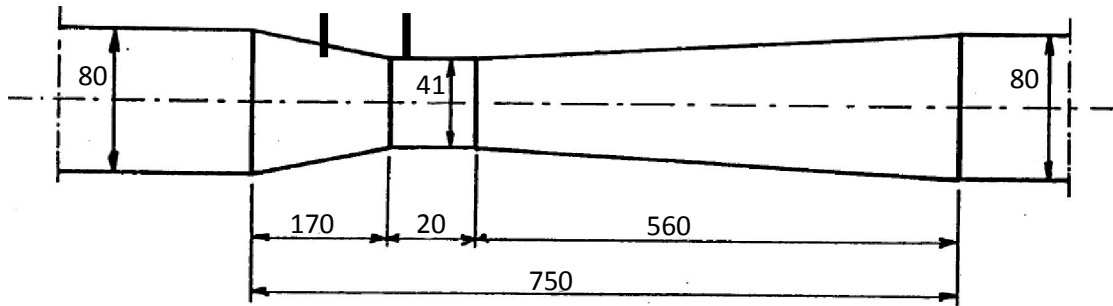


Figure II-12 : Schéma de tube de Venturi

- *Coude arrondi à 180° :*

$$\alpha=90^\circ$$

$$r=160\text{mm}$$

$$D=80\text{mm}$$

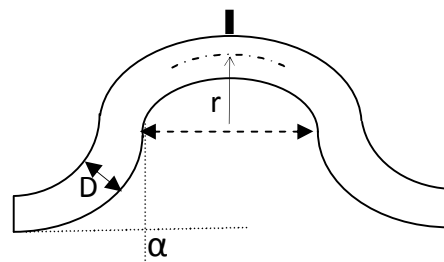


Figure II-13 : Schéma de coude

- *Le robinet-vanne :*

$$D= 80\text{mm}$$

$$h_{\text{max}}= 80\text{mm}$$

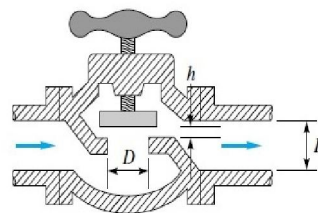


Figure II-14 : Schéma de la vanne

Chapitre II: Analyse des défaillances touchant les équipements et remédiations

II.7.1.2 Le nettoyage :

En utilisant l'acide acétique et la brosse métallique, nous avons procédé au nettoyage de l'ensemble des singularités, en dehors de la vanne; avec laquelle nous avons agi autrement. Avant de procéder à son nettoyage, il a fallu d'abord graisser le robinet afin de le débloquer.

II.8 Conclusion :

En dépit des contraintes de tout genre et des obstacles rencontrés : manque de moyens et conditions difficiles de travail, nous avons pu atteindre notre objectif qui consistait à réparer l'existant par de simples opérations de maintenance des composants. Nous avons pu voir que parfois le nettoyage était déjà en soi une opération qui peut dépanner. Dans le chapitre suivant, nous allons décrire des éléments que nous avons ajouter à l'installation pour lui apporter quelques améliorations dont l'objectif sera de faciliter le déroulement des manipulations sur le banc d'essai.

Chapitre III

Dispositions conçues en vue d'améliorer les conditions d'expérimentation pour le banc d'essais.

Chapitre III : Dispositions conçues en vue d'améliorer les conditions d'expérimentation pour le banc d'essais

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons effectué un examen approfondi de l'installation en procédant par des interventions méthodiques sur ses différents éléments consistant à identifier leurs défaillances puis d'agir pour rétablir son fonctionnement. Il est bien vrai que l'installation est opérationnelle, en ce sens que l'eau la traverse, les débits peuvent être réglés et des mesures peuvent être plus ou moins effectuées. Il n'en demeure pas moins que les mesures ne seront correctes et fiables que si tous les éléments nécessaires sont en place et donnent des indications fiables (nous pensons ici notamment aux compteurs qui cessent souvent de fonctionner à l'occasion de suspensions qui sont entraînées dans l'écoulement). Par ailleurs, purger le système avant de procéder aux prises de mesures est en même temps indispensable et extrêmement difficile à réaliser et à maintenir pendant toute la durée d'une manipulation dans l'état actuel du matériel. Il y a également l'étude des pertes de charge singulières qui nécessitent plusieurs démontages et remontages des différentes singularités. Cette manipulation prend beaucoup de temps, c'est peut-être la raison pour laquelle elle a été abandonnée depuis un bon bout de temps. Dans ce chapitre, nous allons décrire certaines dispositions pratiques grâce auxquelles nous espérons améliorer le banc d'essai et les conditions de travail pour réaliser des mesures plus correctes tout en réduisant les temps de manipulation.

Ces améliorations s'articulent autour des points suivants :

- Rendre plus aisé les opérations de montage – démontage des singularités ;
- Améliorer le système prises de pression – flexibles – tubes piézométriques (en éliminer les fuites et faciliter les purges)
- Mettre en place un dispositif qui rendra possible l'étalonnage des compteurs d'eau totaliseurs quand on le souhaite.
- Faciliter la lecture sur les tubes piézométriques.

III.1 Fabrication d'un support pour le montage et le démontage des singularités

III.1.1 Objectif

Après avoir réalisé les essais de pertes de charge singulières, nous avons pu noter que pour remplacer une singularité par une autre, trois personnes sont nécessaires : deux pour la porter, une pour réaliser les opérations de montage – démontage. Ceci implique :

Chapitre III : Dispositions conçues en vue d'améliorer les conditions d'expérimentation pour le banc d'essais

- Du temps et des efforts, incompatibles avec la composition de certains groupes (seulement 2 étudiants, groupe comportant que des filles pour lesquelles de telles opérations pourraient s'avérer très pénibles) et le temps alloué aux séances de travaux pratiques (qui n'excède pas en général deux heures).
- La tendance au cisaillement des boulons de serrage des brides de raccordement de la singularité à la conduite en cours de montage - démontage.
- La singularité pourrait tomber lors de l'opération sur les pieds des manipulateurs et provoquer ainsi des accidents.

Pour apporter notre contribution à l'amélioration de toutes ces conditions liées au remplacement des singularités lors des manipulations, nous avons fabriqué au niveau des ateliers des métaux du département de Génie Mécanique, un *support porte-singularités*.

III.1.2 Description du dispositif

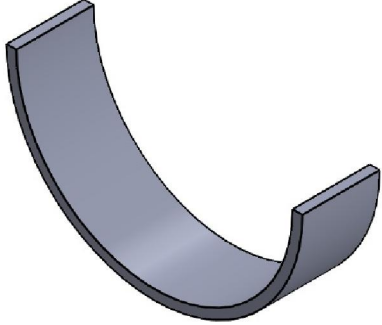

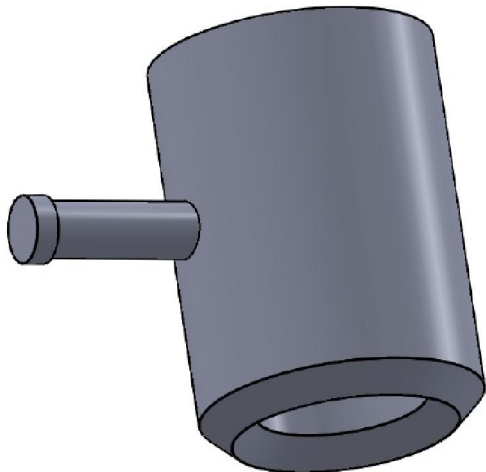
Le dispositif, représenté à la *figure III.1*, ci-dessous est constitué de deux pièces ayant la forme d'un arc de cercle (de rayon de 95mm), chacune étant soudée sur un petit axe cylindrique (de dimension : $\Phi 20 \times 10$ mm), cet axe étant lui-même monté en serrage dans la bague intérieure d'un roulement (SKF :E2.6004-2Z), ce dernier est serré à l'intérieur d'un cylindre creux ($D_e=45$ mm, $D_i=42$ mm, $h=90$ mm) fixé à l'autre bout par filetage à une tige cylindrique ($\Phi 45 \times 700$ mm) destinée à être fixée au sol à l'aide de chevilles métalliques prenant prise sur des pates en acier soudées à la tige. Pour assurer la stabilité de ce dispositif, les deux tiges verticales sont reliées entre elles par une tige horizontale de 780mm de longueur.

III.1.3 Procédure d'usinage

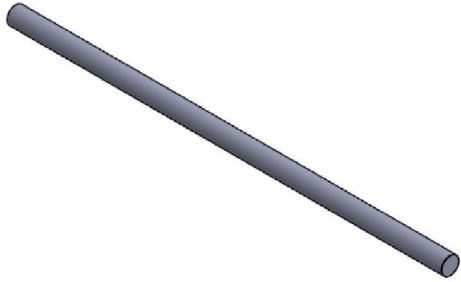

III.1.3.1 Gamme d'usinage

Le support a été fabriqué suivant les opérations énumérées sur le tableau suivant :

Chapitre III : Dispositions conçues en vue d'améliorer les conditions d'expérimentation pour le banc d'essais

Nombre de pièces	Désignation des opérations pour chaque pièce	Appareillages et Machines utilisées	Croquis de la pièce finie
2	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle du brut (côtes et spécifications) - Découpage transversal - Cambrage de la pièce sous la forme d'un arc Ø90. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pied à coulisse - Réglet - Scie mécanique - Laminoir 	
2	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle du brut (Ø25, Lmax = 1400mm) - Découpage radial de 700mm. - Chariotage en finition au Ø25 - Filetage d'un pas de 1mm, sur une longueur de 80mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Pied à coulisse - Réglet - Scie mécanique - Tour conventionnel (Outil à charioter et outil à fileter) 	
2	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle du brut (Ø45, Lmax = 200mm) - Découpage radial de 90mm - Chanfreinage à 45° et à 4mm - Alésage en finition de Ø42 sur une longueur de 12mm (Pour serrer le roulement). - Alésage en finition de Ø24 sur une longueur de 80mm. - Taraudage en finition de Ø25 par un pas de 1mm sur une longueur de 80mm. - Soudage d'un levier à l'extérieur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pied à coulisse - Réglet - Scie mécanique - Tour conventionnel (Outil à chanfreiner, Outil à tarauder et outil à aléser) 	

Chapitre III : Dispositions conçues en vue d'améliorer les conditions d'expérimentation pour le banc d'essais

1	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle du brut ($\varnothing 25$, $L_{max} = 800mm$) - Découpage radial de 780mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Pied à coulisse - Réglet - Scie mécanique 	
4	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle du brut ($\varnothing 45g6$, $L_{max} = 200mm$) - Découpage radial de 80mm - Perçage avec un foret de 12mm - Soudage d'un morceau rectangulaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Pied à coulisse - Réglet - Scie mécanique - Perceuse 	

III.1.3.2 Assemblage et finition

Afin d'assembler les pièces cités ci-dessus on a eu recours au soudage à l'arc électrique, ensuite on les a enduites d'un revêtement antirouille et pour finir on leurs a appliqué une couche de peinture chromée.

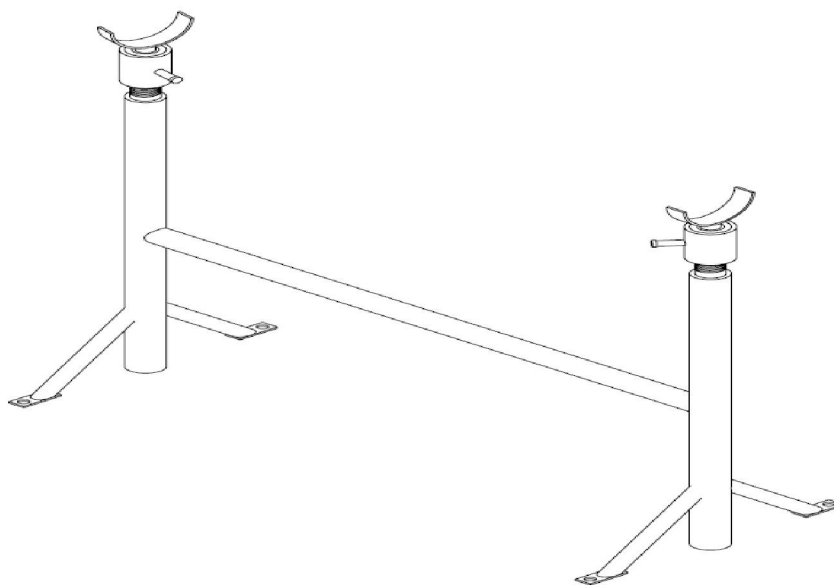


Figure III.1 : Support de singularités

Chapitre III : Dispositions conçues en vue d'améliorer les conditions d'expérimentation pour le banc d'essais

III.1.4 Mode d'emploi

1. Placer les bagues et les joints sur les deux extrémités de la singularité.
2. Poser la singularité sur le support en s'assurant que les prises de pression soient orientées vers le haut.
3. Régler la hauteur en agissant sur les leviers pour faire tourner les deux cylindres filetés du support jusqu'à ce que la singularité soit parfaitement alignée avec la conduite, puis parachever cet alignement en faisant coulisser les bagues prévues à cet effet de sorte que la singularité soit désormais supportée par la conduite elle-même.
4. Ramener en position les brides de raccordement en prenant la précaution de replacer convenablement les joints.
5. Serrer les boulons jusqu'à ce que le dispositif Conduite-singularité soit étanche.

III.2 Fabrication d'un dispositif porte-flexibles

III.2.1 Objectif

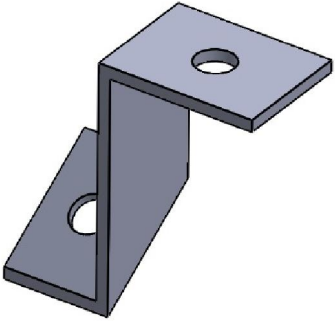
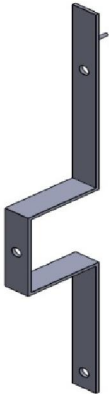
Dans le chapitre précédent, nous avons remarqué que le système comportant les flexibles et les tubes piézométriques était défectueux. Nous avons suggéré de rénover le dispositif pour qu'il soit plus performant.

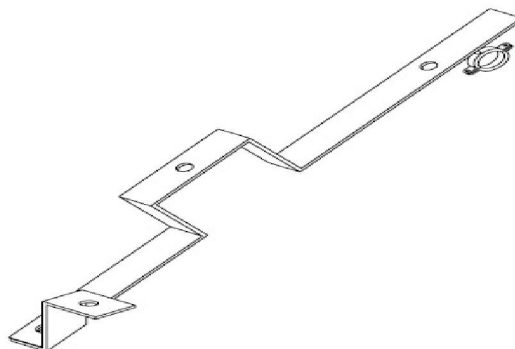
III.2.2 Description de dispositif

Le système est constitué de deux plaques en plastique rigide (de dimensions 900cmx20cmx1cm) et (900cmx25cmx1cm). Ces plaques en plastique sont à leur tour supportées par des plaques en bois plus rigides de dimensions (800cmx15cmx2cm), ces dernières sont fixées aux supports des conduites à l'aide de boulons et de supports en acier spécialement conçus à cet effet (Figure III.2).

Chapitre III : Dispositions conçues en vue d'améliorer les conditions d'expérimentation pour le banc d'essais

III.2.3 La gamme d'usinage

Nombre de pièces	Désignation des opérations pour chaque pièce	Appareillages et Machines utilisées	Croquis de la pièce à la fin de ses divers stades d'usinage
5	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle du brut (Lmax = 200mm) - Découpage transversal - Pliage d'un angle de 90° - Perçage avec un foret de 12mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Pied à coulisse - Réglet - Scie mécanique - Plieuse - Perceuse 	
5	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle du brut (Lmax = 800mm) - Découpage transversal - Pliage d'un angle de 90° - Perçage avec un foret de 12mm 	<ul style="list-style-type: none"> - Pied à coulisse - Réglet - Scie mécanique - Plieuse - Tour conventionnel (Outil à charioter et outil à fileter) 	



Chapitre III : Dispositions conçues en vue d'améliorer les conditions d'expérimentation pour le banc d'essais

Figure III.2 : schéma d'un support



Figure III.3 : Fixation du support sur le banc d'essais

III.2.4 Mise en place des flexibles

La solution choisie est d'utiliser des flexibles de 10mm de diamètre pour relier les prises de pression aux tubes des piézométriques tout en évitant que des bulles d'air soient piégées à l'intérieur de ces flexibles lors des manipulations ; On devait tenir compte de deux choses pour que ce problème n'apparaisse pas :

- Les flexibles doivent être munis de purgeurs.
- Les flexibles doivent tous comporter deux parties qui remontent régulièrement vers le purgeur pour faciliter le dégagement des bulles d'air au cours de la purge.

Ensuite, nous avons tracé l'emplacement de chaque purgeur sur les plaques de façon à maximiser la pente des flexibles en amont et en aval, puis on a relié les purgeurs aux flexibles en utilisant des colliers de 12 mm fixés sur la plaque à l'aide de vis, écrous et rondelles sans oublier les colliers de serrage dans les branchements pour éliminer les fuites (*figure III.4*)

Chapitre III : Dispositions conçues en vue d'améliorer les conditions d'expérimentation pour le banc d'essais



(a)

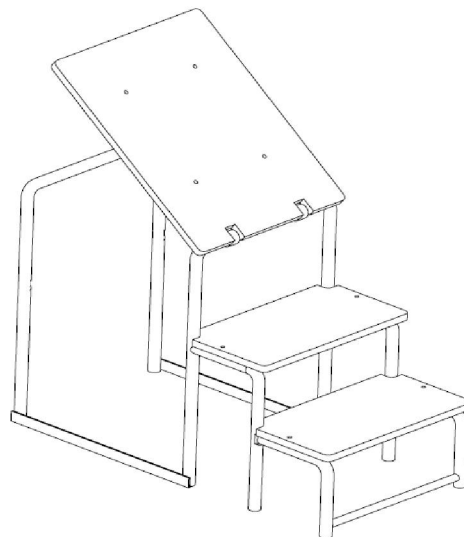


(b)

**Figure III.4 : La mise en place des flexible ; (a) Purgeur branché,
(b) flexible branché au purgeur.**

III.3 Fabrication d'un échafaudage

Dans le but de faciliter la lecture sur les piézomètres, on a fabriqué un petit échafaudage comportant une plateforme articulée autour d'un axe horizontal pour donner accès à la partie inférieure de la plaque porte-tubes lors des branchements/débranchements des flexibles (voir *figure III.5* ci-dessous)



Chapitre III : Dispositions conçues en vue d'améliorer les conditions d'expérimentation pour le banc d'essais

Figure III.5 : Schéma de l'échafaudage

III.4 Utilisation du bassin de déversement en bassin tampon pour l'étalonnage des compteurs

Ayant noté que le bassin de déversement pourrait servir à étalonner les débitmètres, nous nous sommes proposés de l'arranger à cet effet. Nous avons d'abord conçu un bouchon amovible pour la bouche d'évacuation qui se trouve au fond du bassin, nous avons jointé par du ciment de façon à garantir l'étanchéité du système. Pour préciser le volume retenu, nous avons procédé à l'étalonnage du bassin. Malheureusement, la section du bassin n'étant pas régulière suivant la hauteur, la mesure du niveau ne pouvait pas suffire pour obtenir des volumes précis par la mesure. Cette opération ayant été à la fin du présent projet, nous recommandons qu'elle soit reprise dans le cadre d'un mini projet de courte durée.



Figure III.6 : Modifications apportées au bassin de déversement

III.5 Conclusion

Avec les modestes améliorations que nous venons d'exposer et qui, nous l'espérons, seront appréciées par les futurs étudiants qui interviendront sur le banc d'essai, nous sommes parvenus à la phase de la conduite de tous les essais permis par l'installation. Ceci fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV

Etude expérimentale des pertes de charge :
Essais, Calculs ; Résultats et interprétations

Introduction

Ce chapitre sera consacré à l'étude expérimentale des pertes de charge linéaires et singulières sur le banc d'essais sur lequel nous sommes intervenus dans le cadre de ce projet. Les pertes de charge linéaires seront étudiées grâce à l'exploitation de mesures de hauteurs piézométriques obtenues pour différentes valeurs du débit à divers points plus ou moins régulièrement placés sur les trois conduites que compte le banc d'essais.

Ceci nous permettra d'analyser l'impact de la longueur, du débit et du diamètre sur les pertes de charge linéaires. L'étude des pertes de charge singulières se fera grâce à des mesures de hauteurs piézométriques prises pour différents débits en deux points situés en amont et en aval de chacune des cinq singularités disponibles qui seront montées successivement sur la conduite de diamètre 80 à laquelle elles sont adaptées. Ceci nous permettra d'analyser l'impact du débit et de la nature de la singularité sur les pertes de charge.

IV.1. Etalonnage des compteurs totaliseurs

Cette expérience sera menée en procédant, d'une part, par la mesure du temps nécessaire au compteur monté au départ de la conduite pour totaliser un volume donné ; et d'autre part, par la mesure du temps nécessaire pour le remplissage du volume du bassin tampon situé à la décharge des conduites. Cette procédure sera menée pour diverses valeurs du débit.

Les mesures effectuées pour les trois compteurs sont portées aux tableaux AII.1-3 insérés à l'annexe AII.

- **Remarque**

Cette expérience aurait dû être conduite de façon à couvrir tout le domaine des débits qui seront utilisés par la suite dans l'étude des pertes de charge. Malheureusement, le bassin tampon étant de faible capacité, il nous a été difficile de tranquilliser la surface libre pour effectuer une mesure précise du temps de remplissage dans le cas de débits importants, avec les conduites de $\varnothing 80$ et de $\varnothing 50$. Quant à la conduite de $\varnothing 26$ nous avons dû, les débits permis étant dans ce cas faibles, recourir au remplacement du bassin tampon par une capacité calibrée de 15 l pour avoir des temps de remplissage raisonnables.

Chapitre IV : Etude expérimentale des pertes de charge : Essais, Calculs ; Résultats et interprétations

Sur les figures IV.1 à IV.3 nous avons tracé les courbes de comparaison entre les débits mesurés au compteur et ceux mesurés au bassin pour les trois compteurs montés au départ des conduites de diamètres $\varnothing 80$, $\varnothing 50$ et $\varnothing 26$ respectivement.

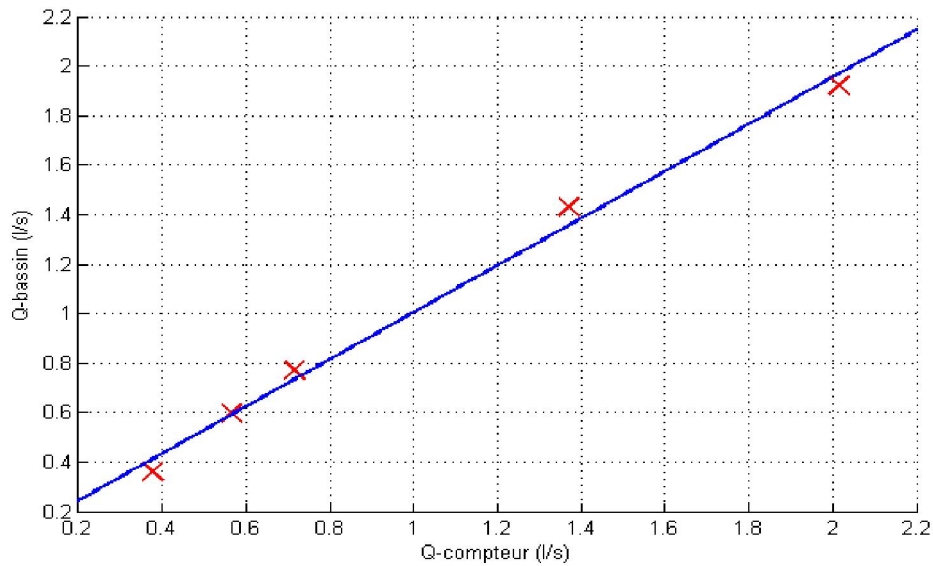


Figure IV.1 : Courbe d'étalonnage du compteur monté au départ de la conduite de diamètre $\varnothing 80$

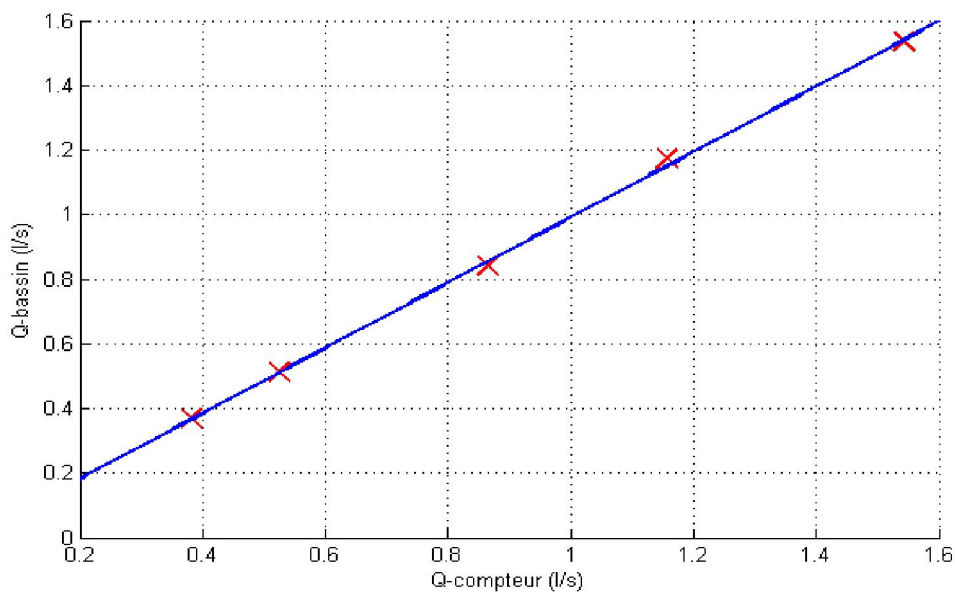


Figure IV.2 : Courbe d'étalonnage du compteur monté au départ de la conduite de diamètre $\varnothing 50$

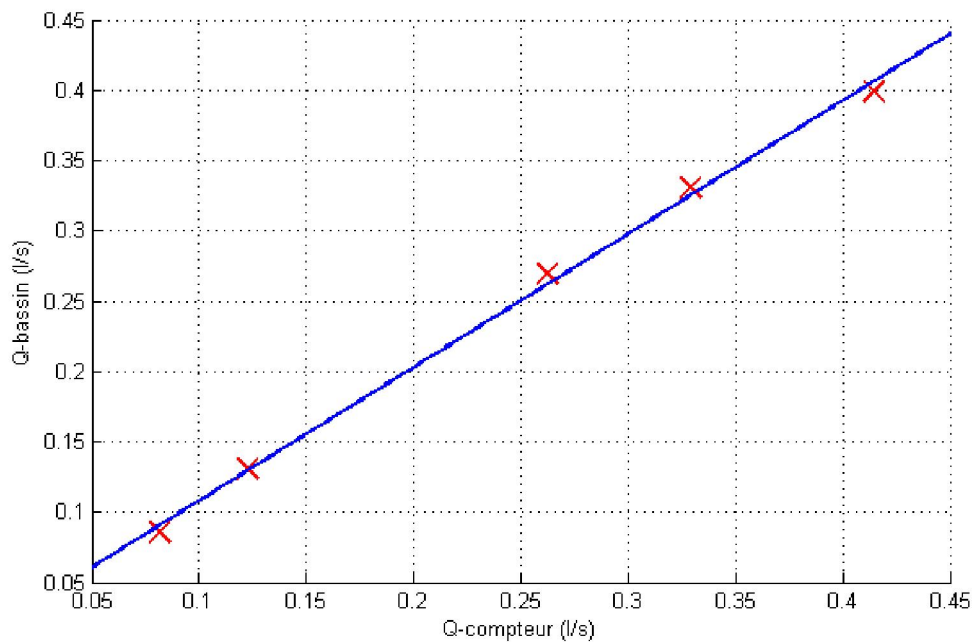


Figure IV.3 : Courbe d'étalonnage du compteur monté au départ de la conduite de diamètre Ø26

L'allure des courbes de comparaison est bien droite ; mais à cause des incertitudes de mesure, ces droites ne passent pas par l'origine comme elles devraient.

Malheureusement, nous ne pouvons ici effectuer un calcul d'incertitudes rigoureux du fait que nous n'avons eu le temps de calibrer, d'une façon précise le volume tampon. Ceci était dû au fait que cette idée d'étalonner les compteurs ne nous est venue à l'esprit que vers la fin. Nous n'avons aucune garantie par exemple que le petit bassin présente bien une section rectangulaire uniforme, or dans nos mesures nous avons supposé cela, ce qui pouvait avoir faussé les résultats et aboutis aux écarts constatés sur les courbes. Le compteur monté sur la conduite de Ø26 a cessé de fonctionner pendant les essais, ce qui nous laisse sceptique sur les mesures effectuées juste avant son arrêt, heureusement que les essais pour l'étude des pertes de charge ont été menés le jour d'avant.

En conclusion, on pourrait dire que cette tentative d'étalonnage des compteurs n'a pas été concluante et nous suggérons que de meilleures conditions soient réunies pour la réussir dans l'avenir.

IV.2. Etude des pertes linéaires

IV.2.1. Effet de la longueur et du débit

Cette expérience sera menée avec la conduite de diamètre 80mm. On procède par la lecture des différentes hauteurs piézométriques pour chaque valeur du débit. On essaiera de faire varier le débit d'une manière aussi régulière que possible pour couvrir tout le domaine que permet l'ouverture complète de la vanne de garde. Notons que le compteur ne devient sensible qu'à partir d'une certaine ouverture de la vanne qui correspond à un débit minimum de 0.37 l/s.

Les mesures sont portées au tableau AII.4.

Afin de tracer la courbe d'évolution du gradient hydraulique de la conduite en fonction du débit, nous allons d'abord tracer la courbe de charge le long de la conduite pour chacun des débits considérés (voir figures IV.4 à IV.11).

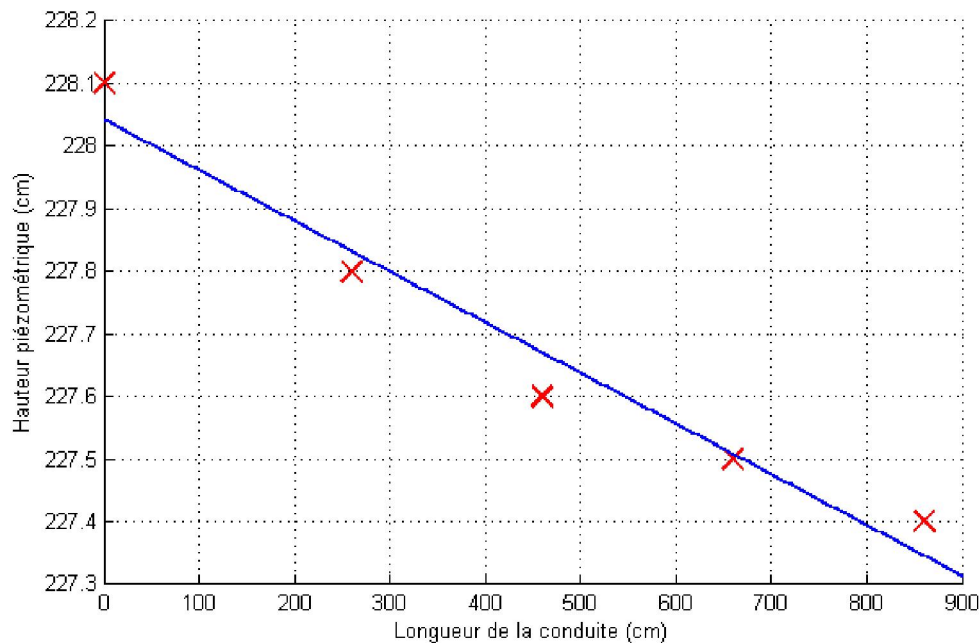


Figure IV.4 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80\text{mm}$ pour un débit $Q = 0.37\text{l/s}$

Chapitre IV : Etude expérimentale des pertes de charge : Essais, Calculs ; Résultats et interprétations

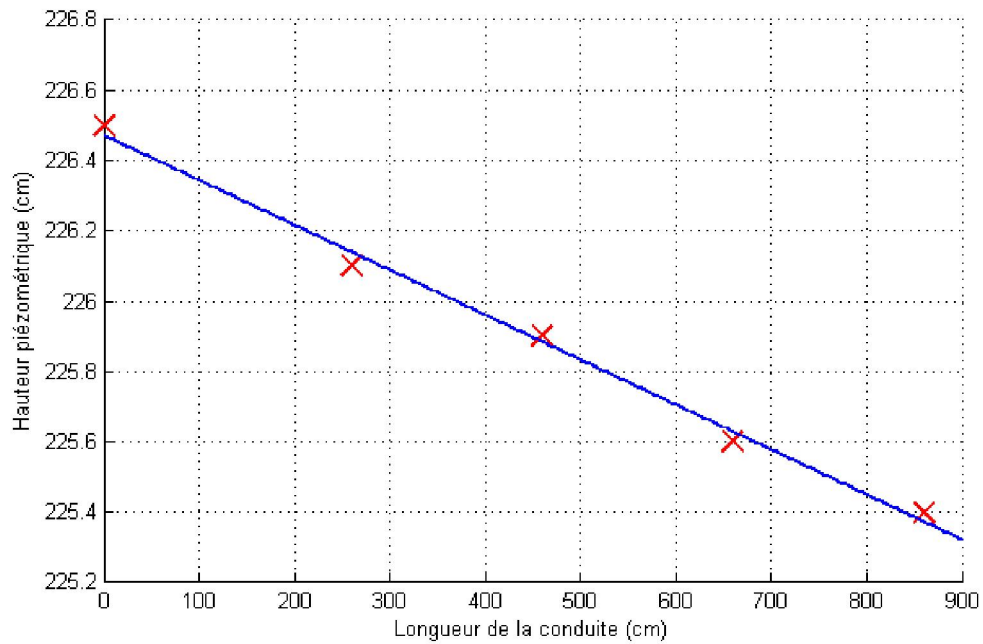


Figure IV.5 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80 \text{ mm}$ pour un débit $Q = 0.58 \text{ l/s}$

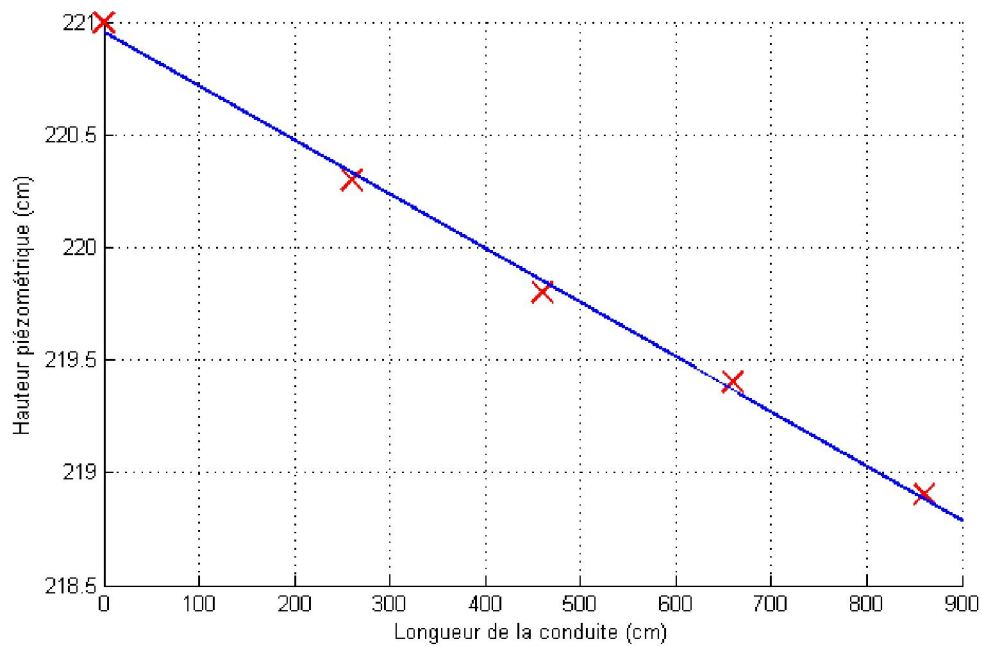


Figure IV.6 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80 \text{ mm}$ pour un débit $Q = 1.01 \text{ l/s}$

Chapitre IV : Etude expérimentale des pertes de charge : Essais, Calculs ; Résultats et interprétations

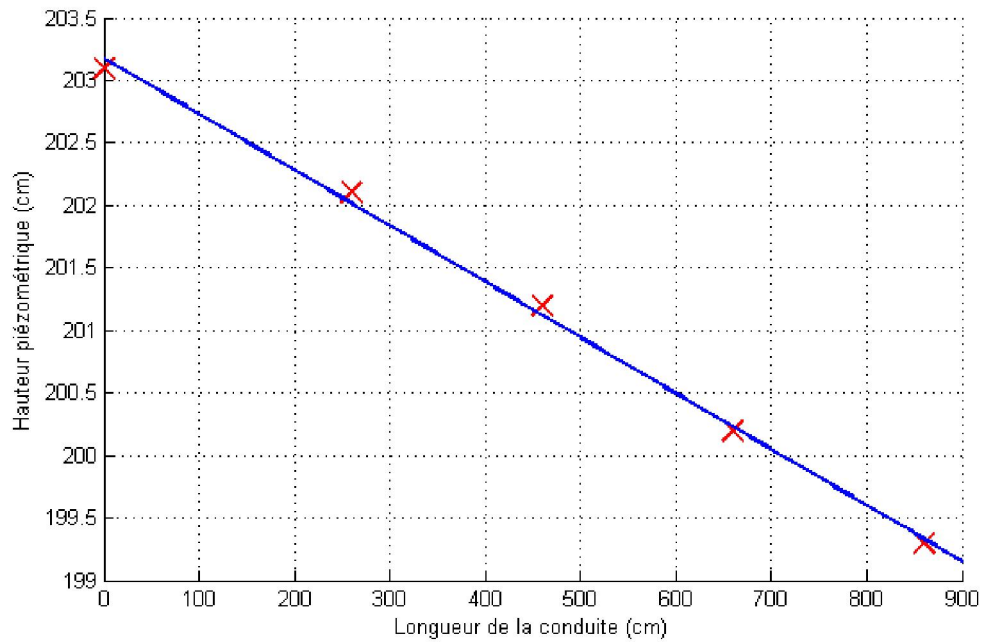


Figure IV.7 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80 \text{ mm}$ pour un débit $Q = 1.70 \text{ l/s}$

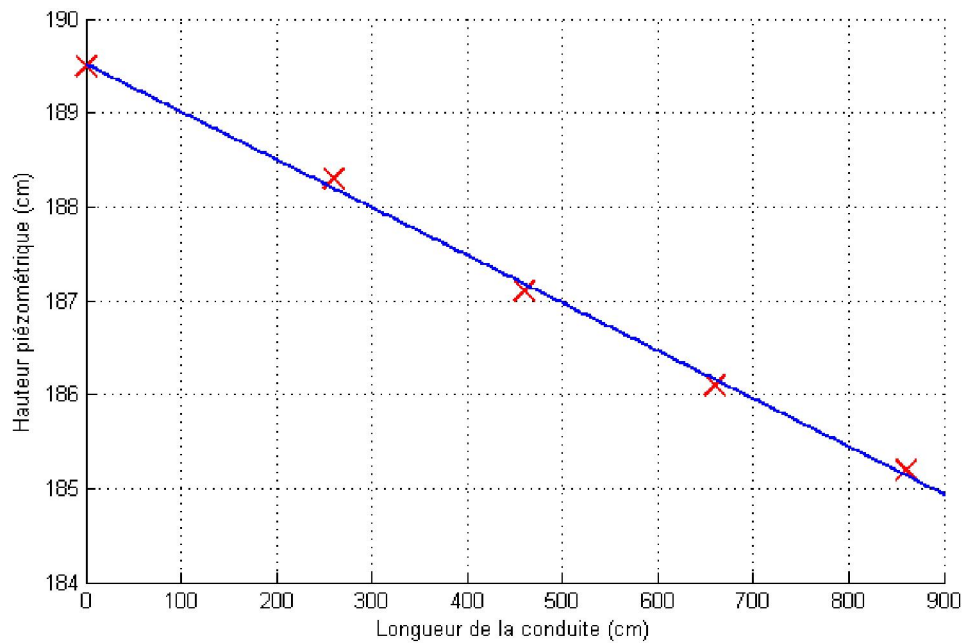


Figure IV.8 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80 \text{ mm}$ pour un débit $Q = 2.09 \text{ l/s}$

Chapitre IV : Etude expérimentale des pertes de charge : Essais, Calculs ; Résultats et interprétations

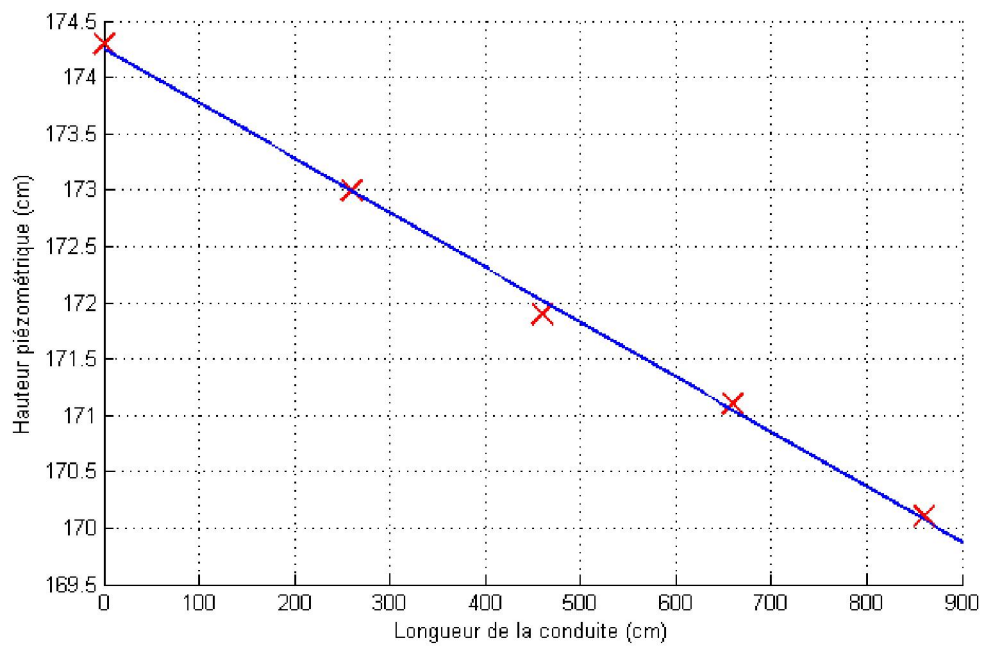


Figure IV.9 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80\text{mm}$ pour un débit $Q = 2.4 \text{ l/s}$

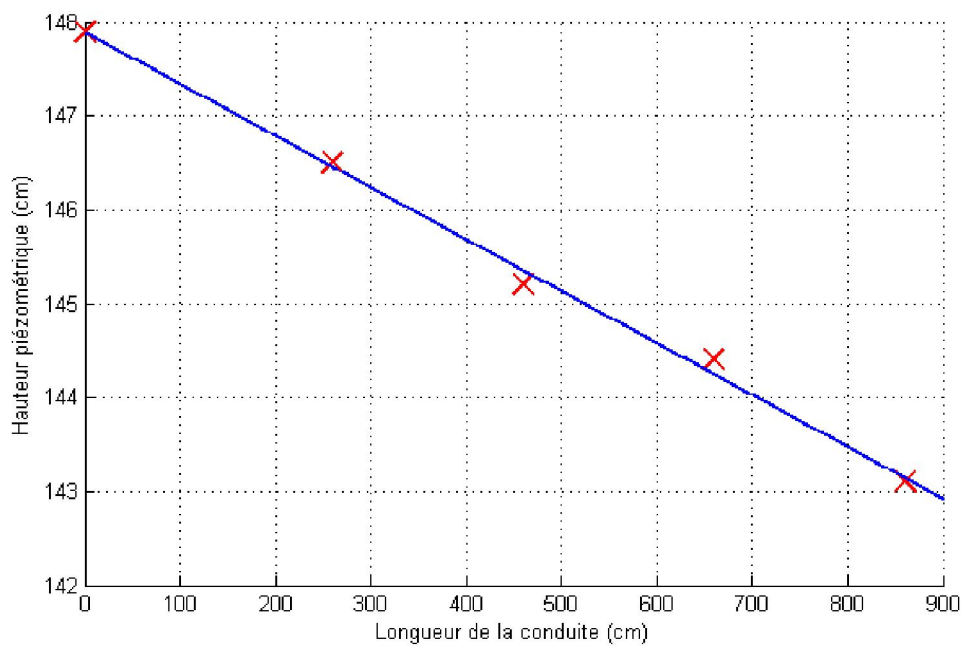


Figure IV.10 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80\text{mm}$ pour un débit $Q = 2.85\text{l/s}$

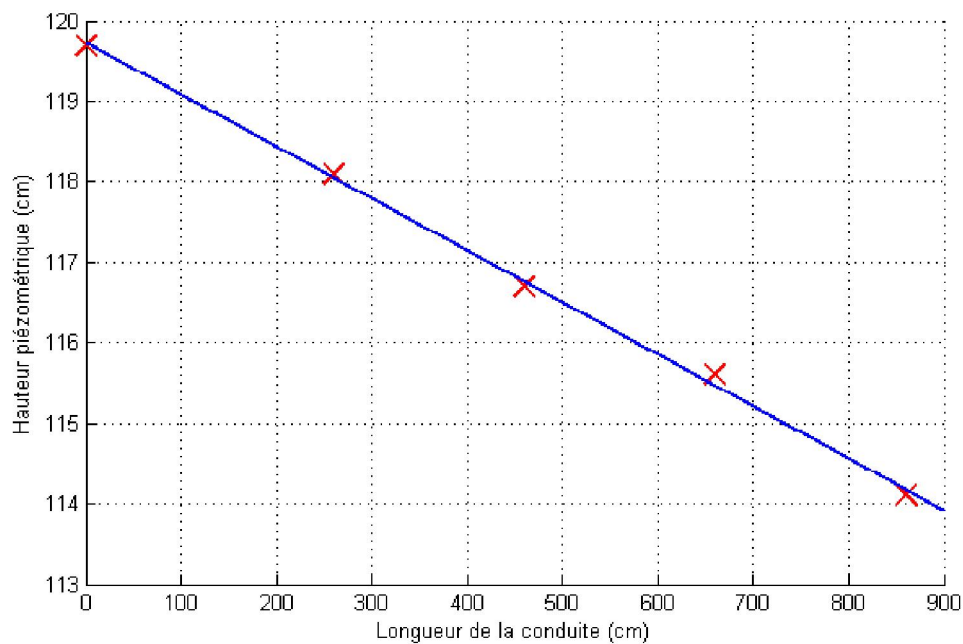


Figure IV.11 : Courbe de charge le long de la conduite de diamètre $\varnothing = 80mm$ pour un débit $Q = 3.4 \text{ l/s}$

A partir de ces courbes, qui sont des droites conformément aux lois des pertes de charge linéaires, on détermine les différentes valeurs du gradient hydraulique (J) qui sont représentées simplement par les valeurs absolues des pentes de ces courbes. Les différentes valeurs du gradient hydraulique ainsi déterminés sont portées au tableau AIII.1 inséré à l'annexe AIII et la courbe du gradient hydraulique en fonction du débit est représentée à la figure IV.12 ci-dessous.

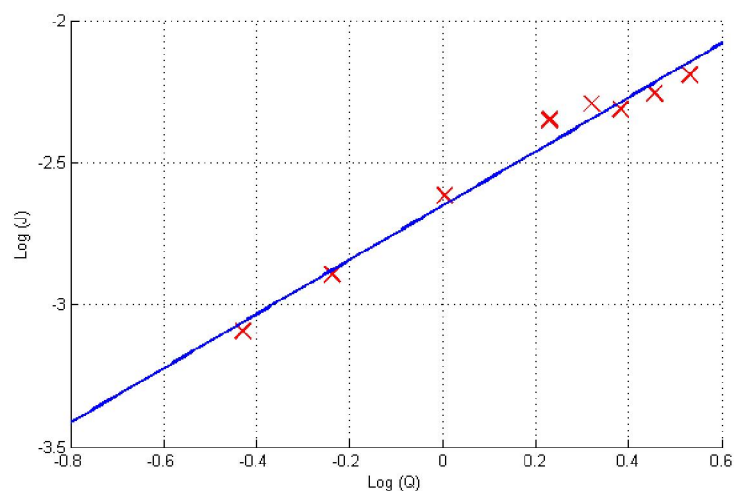


Figure IV.12 : Courbe du gradient hydraulique en fonction du débit

Chapitre IV : Etude expérimentale des pertes de charge : Essais, Calculs ; Résultats et interprétations

En fait, nous avons porté en ordonnée, le logarithme décimal du gradient hydraulique et en abscisse le logarithme décimal du débit. La courbe obtenue de cette façon est une droite dont l'équation est donnée par :

$$\log J = 0.952 \log(Q) - 2.6504$$

Equation qui pourrait se mettre finalement sous la forme :

$$J = 10^{-2.6504} \times Q^{0.952} \rightarrow J = 0.00224 \times Q^{0.952} \quad (4.1)$$

Cette équation, à partir de laquelle nous pouvons obtenir la valeur du gradient hydraulique pour n'importe quelle valeur du débit appartenant au domaine expérimenté, nous permettra par la suite de calculer les longueurs équivalentes des différentes singularités que nous allons étudier au paragraphe *IV.3* du présent chapitre.

Nous savons, d'après les différentes théories des pertes de charge, que par exemple, dans le cas d'un régime laminaire, le coefficient de perte de charge :

$$f \propto Re^{-1} \propto Q^{-1}$$

et comme la perte de charge :

$$J \propto f \cdot Q^2 \propto Q^{-1} \cdot Q^2 \propto Q$$

On en déduit que dans le cas d'un régime laminaire la perte de charge devrait être proportionnelle au débit.

Par ailleurs, dans le cas de conduites hydrauliquement lisses, la loi de Blasius (voir équation (1-10), Chapitre I) s'applique, on aura :

$$f \propto Re^{-0.25} \propto Q^{-0.25}$$

ce qui donne :

$$J \propto Q^{-0.25} \cdot Q^2 \propto Q^{1.75}$$

Dans le cas de conduites hydrauliquement rugueuses, cette dépendance est assez complexe. Si l'on prend par exemple la formule de Wood (équation (1.11), Chapitre I) applicable pour une rugosité relative :

$$10^{-5} < \frac{\varepsilon}{D} < 0.04$$

On pourrait situer le facteur $c = 1.62 \left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{0.134}$ qui intervient dans la formule de Wood entre les limites :

$$0.35 < c < 1.05$$

Chapitre IV : Etude expérimentale des pertes de charge : Essais, Calculs ; Résultats et interprétations

Ceci situe la plage de dépendance du coefficient de perte de charge du nombre de Reynolds, donc du débit, entre les limites :

$$f \propto Q^{-0.35} \text{ et } f \propto Q^{-1.05}$$

ce qui nous ramène aux limites :

$$J \propto Q^{-0.35+2} \text{ et } J \propto Q^{-1.05+2}$$

soit

$$J \propto Q^{1.65} \text{ et } J \propto Q^{0.95}$$

Pour se situer dans les limites de rugosité ci-dessus, dans le cas de notre conduite, qui a un diamètre de 80mm, il faudrait qu'elle présente une rugosité absolue comprise dans les limites :

$$8.10^{-4} \text{ mm} < \varepsilon < 3.2\text{mm}$$

Au vu de la figure II.4 montrée au chapitre II, on ne doit pas s'étonner que la rugosité de la conduite puisse présenter à certains endroits des valeurs pouvant être supérieures à 3.2 mm. Avec la valeur 0.952 qui correspond à la puissance du débit dans l'expression (4.1), on devrait avoir $f \propto Q^{-1.048}$ ce qui donne pour le facteur (c) de Wood :

$$c = 1.62 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{0.134} = 1.048$$

d'où on pourrait calculer la rugosité moyenne de notre conduite ; soit :

$$\varepsilon = \left(\frac{1.048}{1.62} \right)^{\frac{1}{0.134}} \times 80 = 3.1\text{mm}$$

Pour mettre en évidence l'influence du débit sur les pertes de charge linéaires, nous avons représenté sur la même figure les pertes de charge le long de la conduite pour différentes valeurs du débit (Voir *figure IV.13* ci-dessous). Sur les courbes, on voit très bien comment la perte croît avec le débit.

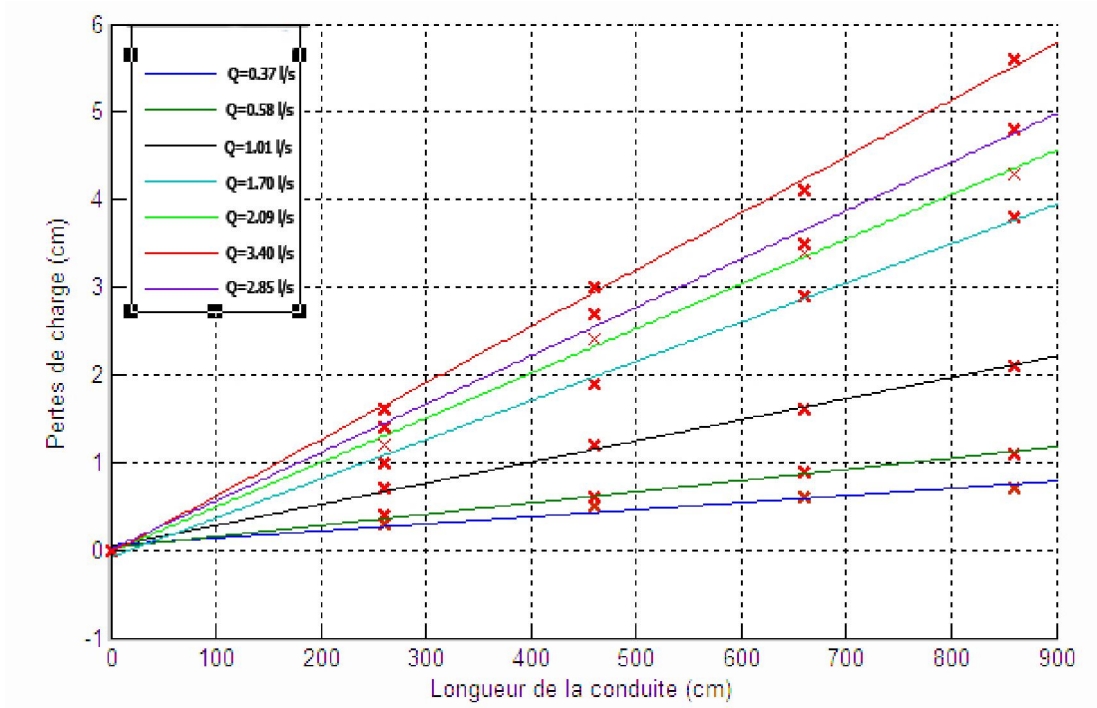


Figure IV.13 : Courbes de la perte de charge le long de la conduite pour différentes valeurs du débit

IV.2.2. Etude de l'effet du diamètre sur les pertes de charge linéaires

Cette expérience a été menée en procédant comme dans l'expérience précédente mais avec la conduite de diamètre $\varnothing 50$ et celle de diamètre $\varnothing 26$. Les mesures sont portées sur les deux tableaux AII.5 et AII.6. Pour une valeur constante du débit, soit 0.37 l/s , on a calculé le gradient hydraulique pour les trois conduites et on a porté les résultats au tableau AII.2.

Nous savons que les pertes de charge sont inversement proportionnelles au diamètre porté à une puissance qui dépend du régime d'écoulement. Pour linéariser cette relation de dépendance, nous choisissons de représenter le logarithme décimal de J en fonction de celui de $(1/D)$. Cette représentation est montrée à la *figure IV.14* ci-dessous. c'est une droite d'équation :

$$\log(J) = 4.3984 \log(1/D) + 5.3245$$

qui peut se mettre sous la forme :

$$J = 211105.71 \left(\frac{1}{D} \right)^{4.3984}$$

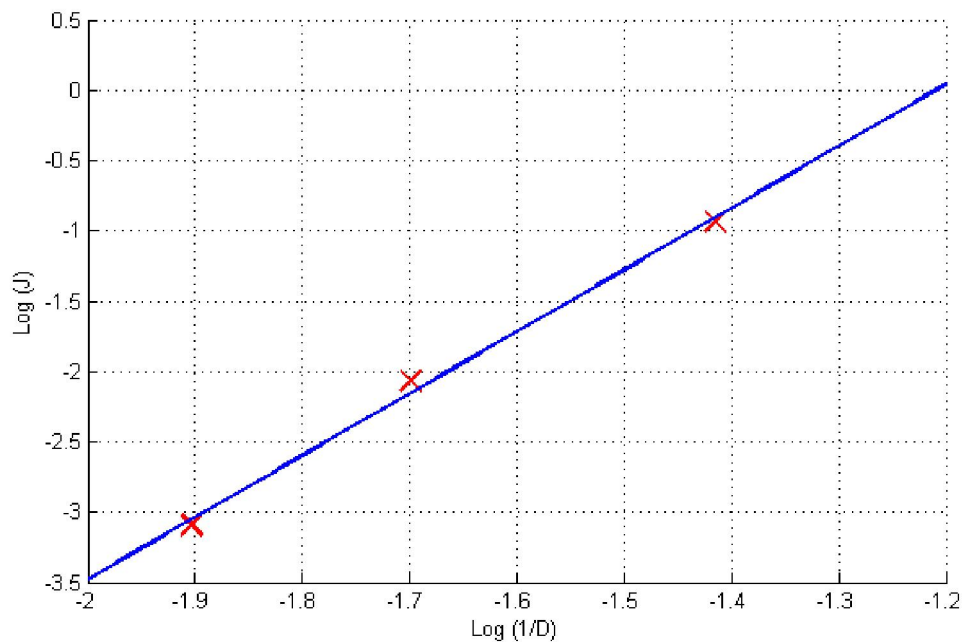


Figure IV.14 : Influence du diamètre sur le gradient hydraulique

Nous savons que pour un coefficient de pertes de charge f constant, ces dernières sont inversement proportionnelles à D^5 . Cependant, le coefficient de pertes de charge dépend du nombre de Reynolds et de la rugosité relative de la conduite, il corrige donc la puissance du diamètre dans l'expression des pertes de charge d'une façon plus ou moins complexe en fonction du régime d'écoulement. Dans notre cas, les trois conduites présentent des états de surface complètement différents, étant donné que celles de $\varnothing 50$ et de $\varnothing 26$ ont été plus rarement utilisées, nous ne pouvons aller plus loin dans l'interprétation de l'expression (4.1) ci-dessus.

IV.3. Etude des pertes de charge singulières

Pour chacune des cinq singularités étudiées, on procède en faisant varier le débit et en notant pour chaque débit mesuré au compteur les valeurs des hauteurs piézométriques correspondant aux prises de pression situées en amont et en aval de la singularité. Les mesures sont portées aux tableaux AII.7-11 pour les différentes singularités.

Les résultats des calculs pour chaque singularité sont portés aux tableaux AIII.4-9.

Notons que dans le cas du tube de Venturi, de l'élargissement brusque et du rétrécissement brusque, la différence de pression correspondant à la différence des hauteurs piézométriques

Chapitre IV : Etude expérimentale des pertes de charge : Essais, Calculs ; Résultats et interprétations

mesurées ne représente pas la perte de charge effective. Cette dernière sera obtenue en retranchant de la différence de hauteurs piézométriques mesurées, la différence de hauteurs théorique calculée par application du théorème de Bernoulli entre les deux prises de pression en amont et en aval de la singularité.

Pour chaque singularité, nous avons calculé également la longueur équivalente en fonction du débit. Pour ce faire, nous avons procédé de la manière suivante :

Pour un débit Q donné, on calcule le gradient hydraulique (J) d'après l'équation (4.1), puis on divise la perte de charge de la singularité par J pour trouver sa longueur équivalente pour le débit choisi.

Sur les figures IV.16, IV.18, IV.20, IV.22, IV.23 et IV.25 nous avons représenté les courbes d'évolution de la perte de charge en fonction du débit pour les différentes singularités.

Notons que toutes ces courbes présentent une allure quasi-parabolique, ce qui est conforme aux lois des pertes de charge singulières.

IV.3.1. Tube de Venturi

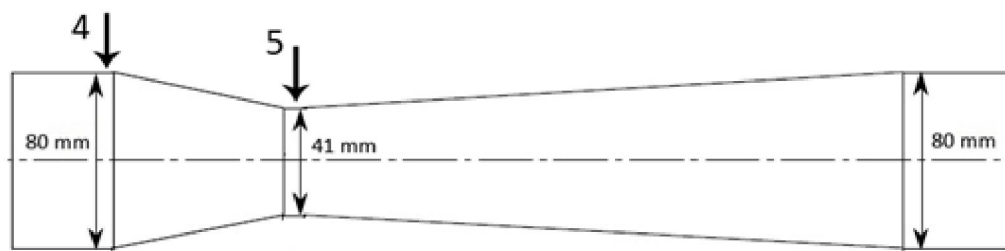


Figure IV.15 : Tube de Venturi

Nous appliquons le théorème de Bernoulli entre les points 4 et 5 pour déterminer la différence de hauteurs théorique à retrancher de la différence de hauteurs mesurée pour obtenir la perte de charge effective :

$$\Delta h_{théorique} = \frac{Q^2(S_5^2 - S_4^2)}{2gS_4^2S_5^2}$$

avec :

$$S_4 = \pi \left(\frac{D_4}{2}\right)^2 = \pi \left(\frac{0.08}{2}\right)^2 = 0.005$$

$$S_5 = \pi \left(\frac{D_5}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0.041}{2} \right)^2 = 0.0013$$

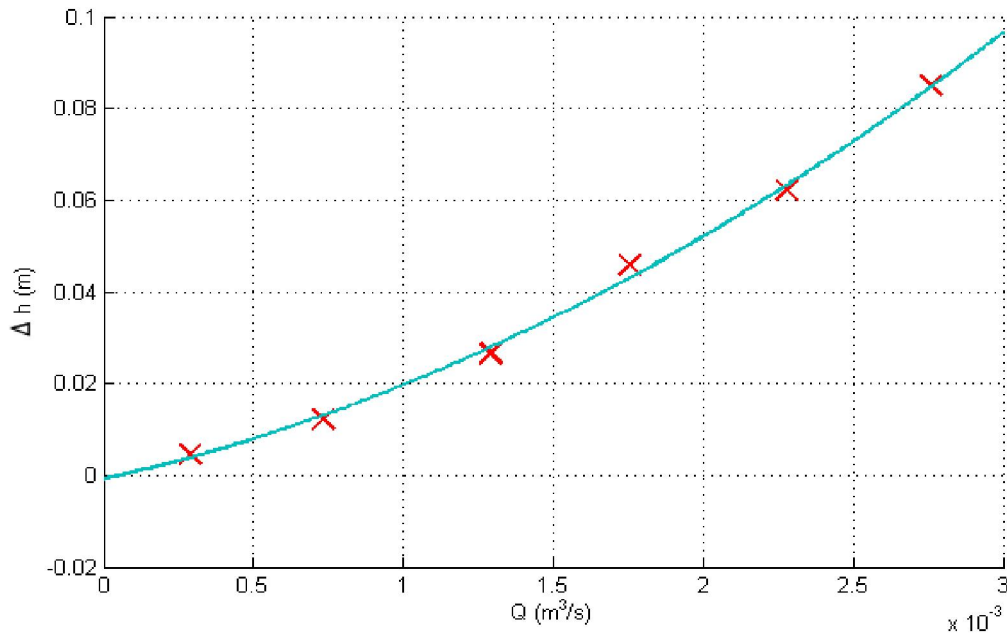


Figure IV.16 : Courbe de la perte de charge en fonction du débit pour le tube de Venturi

IV.3.2. Diaphragme



Figure IV.17 : Diaphragme

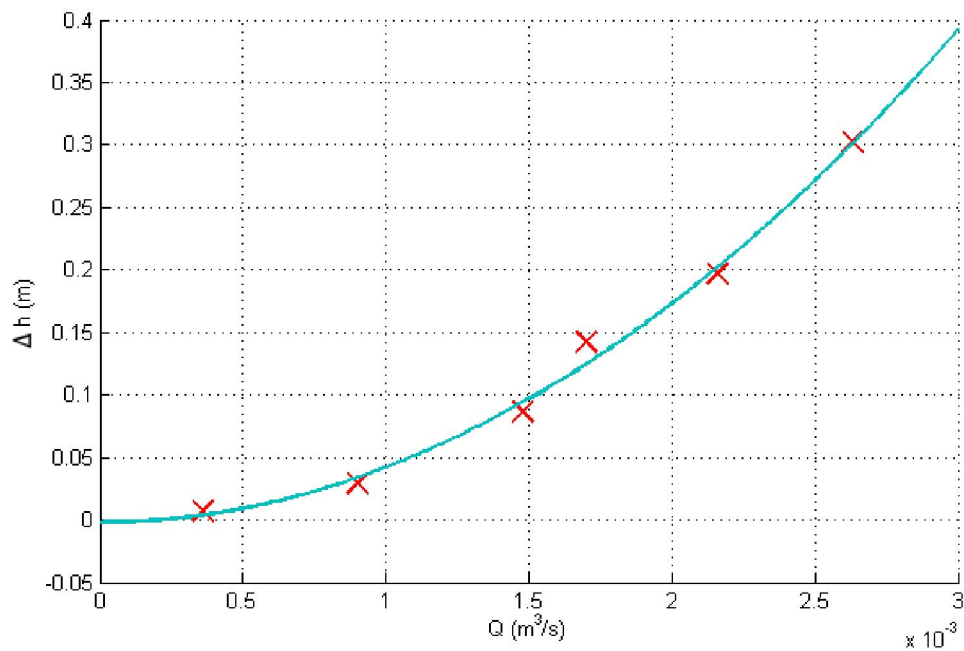


Figure IV.18 : Courbe de la perte de charge en fonction du débit pour le diaphragme

IV.3.3. Robinet-Vanne

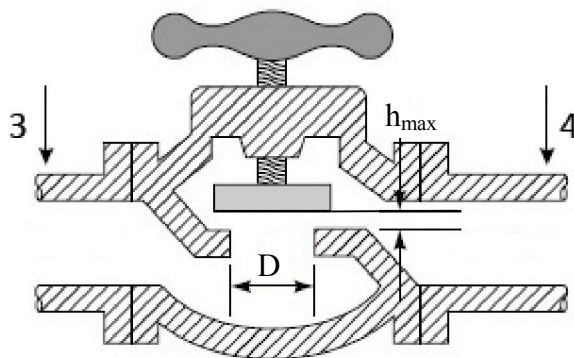


Figure IV.19 : Robinet-vanne

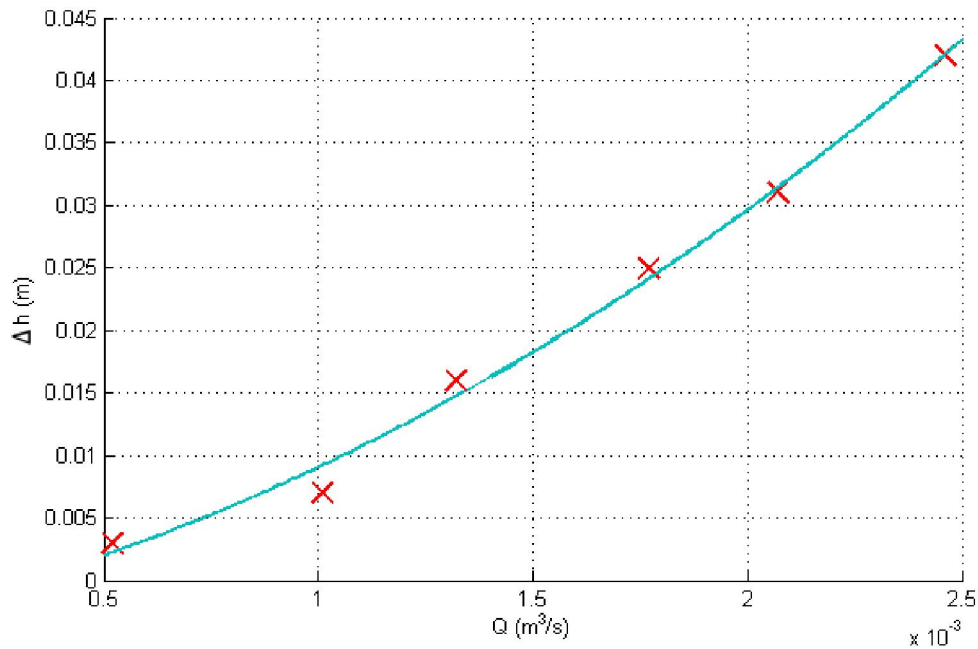


Figure IV.20 : Courbe de la perte de charge en fonction du débit pour le robinet-vanne

IV.3.4. Elargissement et rétrécissement brusques

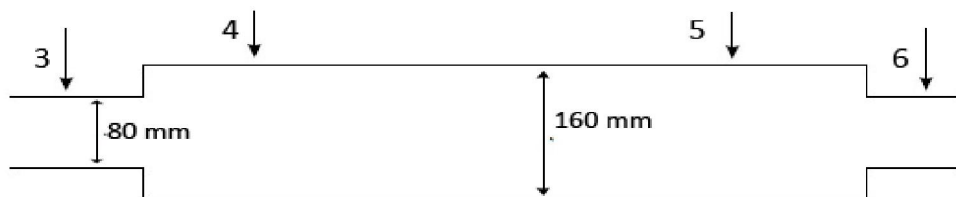


Figure IV.21 : Elargissement et rétrécissement brusques

Nous appliquons le théorème de Bernoulli entre les points 3 et 4 pour l'élargissement brusque et les points 5 et 6 pour le rétrécissement brusque, en vue de déterminer la différence de hauteurs théorique à retrancher de la différence de hauteurs mesurée pour obtenir la perte de charge effective :

$$\Delta h_{th. \text{ elarg.}} = \frac{Q^2(s_3^2 - s_4^2)}{2g s_4^2 s_3^2} \text{ et } \Delta h_{th. \text{ ret.}} = \frac{Q^2(s_5^2 - s_6^2)}{2g s_4^2 s_3^2}$$

avec :

$$S_3 = S_6 = \pi \left(\frac{D_4}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0.08}{2} \right)^2 = 0.005$$

$$S_4 = S_5 = \pi \left(\frac{D_5}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{0.16}{2} \right)^2 = 0.0201$$

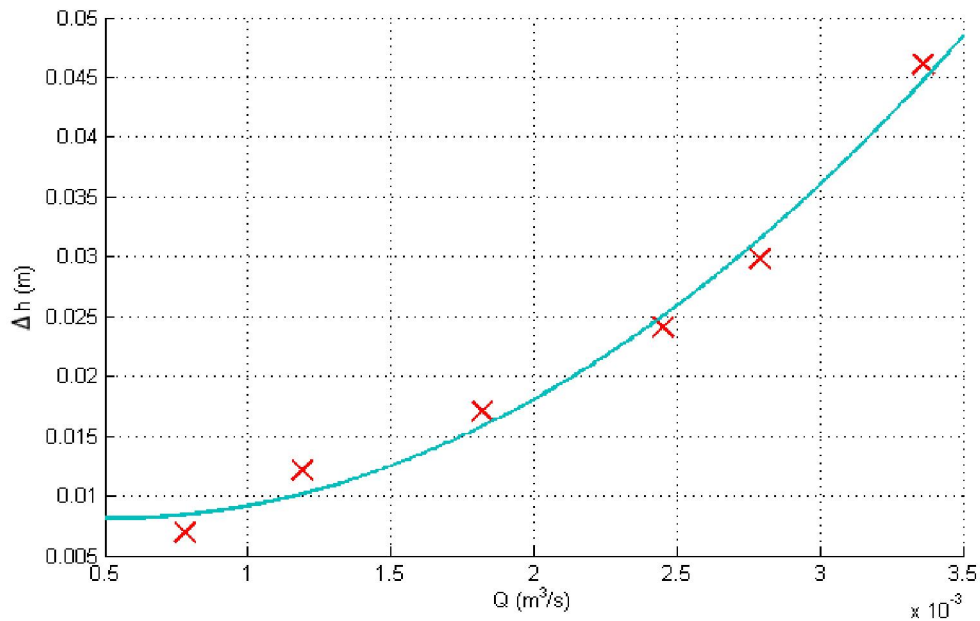


Figure IV.22 : Courbe de la perte de charge en fonction du débit pour l'élargissement brusque

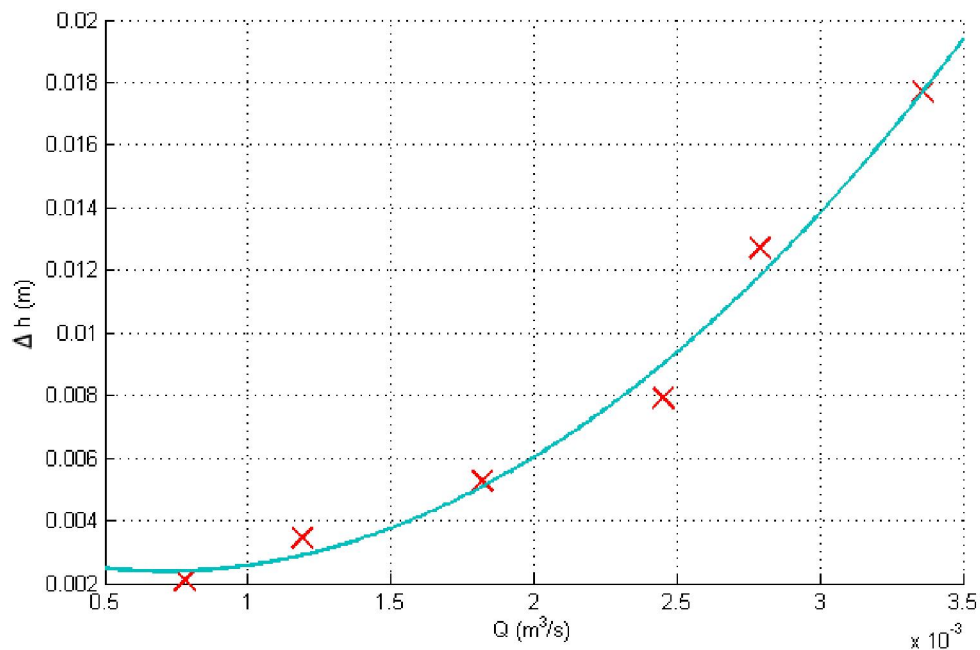


Figure IV.23 : Courbe de la perte de charge en fonction du débit pour le rétrécissement brusque

IV.3.5. Coude arrondi à 180°

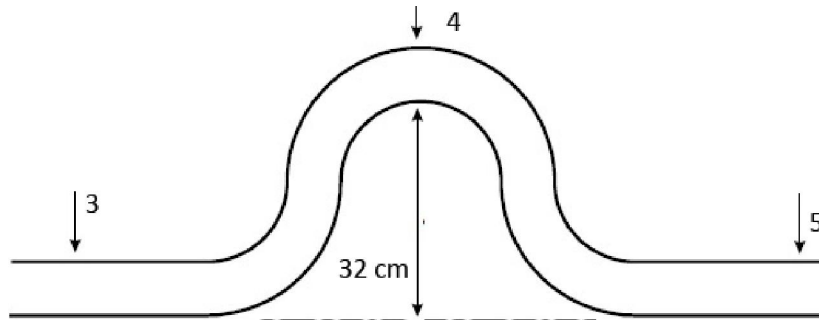


Figure IV.24 : Coude arrondi à 180°

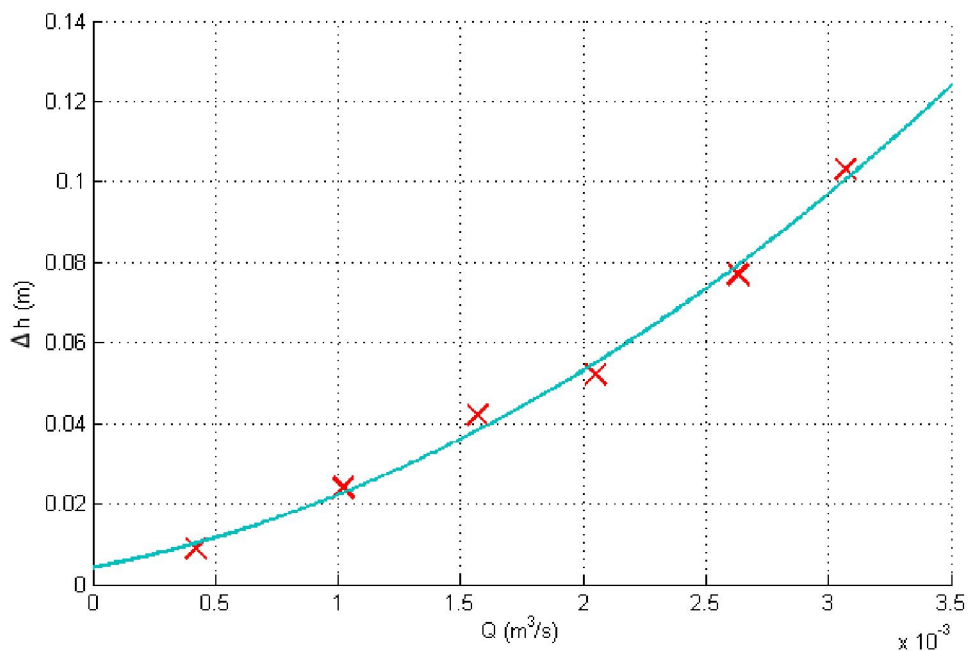


Figure IV.25 : Courbe de la perte de charge en fonction du débit pour le coude arrondi à 180°

A titre de comparaison, nous avons porté au tableau IV.1 les longueurs équivalentes aux différentes singularités pour un débit de 2 l/s .

Chapitre IV : Etude expérimentale des pertes de charge : Essais, Calculs ; Résultats et interprétations

TABLEAU IV.1 : Longueurs équivalentes aux différentes singularités pour un débit de 2 l/s

Singularité	Venturi	diaphragme	vanne	Elargissement brusque	Rétrécissement brusque	coude
$L_{eq}(m)$	12.32	40.86	6.82	4.38	1.38	11.77

Ces résultats montrent que le diaphragme est, de loin, celui qui provoque la perte de charge la plus importante, notamment en comparaison avec le Venturi qui, comme lui pourrait être utilisé comme débitmètre et lui sera donc préféré car occasionnant une plus faible perte de charge. L'élargissement brusque semble provoquer une plus grande perte de charge que le rétrécissement brusque, ce qui est imputable au fait que la veine aura beaucoup plus de mal et aura besoin d'une plus grande distance pour recoller à la paroi à la sortie d'un élargissement brusque qu'à la sortie d'un rétrécissement brusque. La vanne ayant été utilisée toujours en position d'ouverture complète et laissant l'écoulement se produire globalement dans sa direction principale, en le gênant tout de même par la présence de ses organes internes, occasionne une perte de charge inférieure à celle du Venturi qui oblige le fluide à accélérer en lui présentant une section au col de diamètre réduit de moitié, et à celle du coude qui oblige l'écoulement à tourner d'un angle de 180°.

IV.4. Conclusion :

Nous venons de présenter ce que le banc d'essai rénové pouvait offrir comme possibilités en matière d'étude du phénomène des pertes de charge qui accompagne tout écoulement et qui ne doit donc pas être omis dans les programmes de travaux pratiques. Nous espérons que cette contribution pourra bénéficier à tous les étudiants de l'Ecole, et pourquoi pas à des étudiants venant d'autres établissements.

Chapitre IV : Etude expérimentale des pertes de charge : Essais, Calculs ; Résultats et interprétations

Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail, nous sommes intervenus sur le banc d'essai dédié à l'étude des pertes de charge. Nous avons d'abord procédé par une démarche consistant à examiner les différents éléments de l'installation et à tenter de les dépanner avec les seuls moyens disponibles sur place ou en faisant de menus achats, étant donné qu'il est impossible d'effectuer des opérations de maintenance sans utiliser de consommable, sans remplacer un joint défectueux, etc... Nous avons ainsi pu nettoyer, dérouiller, débloquer certains mécanismes, déboucher certains orifices, notamment les prises de pression, étanchéifier pour réduire les fuites au minimum (car il est impossible de les supprimer sur la vanne de garde de la conduite de Φ 80 sans remplacer cette vanne par exemple, et un tel remplacement n'était pas envisageable dans notre cas), nous avons également procédé ainsi sur les différentes singularités, puis nous avons essayé d'améliorer le système de raccordement de ces singularités à la conduite en remettant une bague qui manquait, ce qui était la cause de fuites importantes, et en remplaçant les tiges de serrage complètement rouillées par des tiges neuves en inox. Au terme de ces premières interventions, le système était plus ou moins opérationnel, mais pour passer aux essais, il restait à mettre en place le système comprenant les prises de pression, les tubes piézométriques et les flexibles qui les raccordaient, munis de purgeurs pour faciliter la purge du système avant de commencer les manipulations. Lors d'une deuxième étape, nous avons mis en place trois dispositifs : le "support singularités", le « porte flexibles" et l'échafaudage. Ces trois dispositifs ont été réalisés pour une grande part dans les ateliers de Génie Mécanique, nous avons bien entendu acheté quelques matériels, comme les plaques en plastiques, les flexibles, les purges, les colliers de serrage,...

Une fois que le système a opéré de manière satisfaisante, nous avons procédé aux essais qui ont permis une étude assez détaillée des pertes de charge, qui dépasse de loin le cadre démonstratif

Conclusion générale

des lois fondamentales des pertes de charge, nous avons pu effectuer des analyses quantitatives et comparatives.

Que reste-t-il à faire sur le banc ? Tout. Avec un investissement raisonnable, on pourrait par exemple acquérir une conduite de mêmes caractéristiques que la conduite de $\Phi 80$, mais dans un état neuf. On pourrait alors étudier l'effet du vieillissement et de la rugosité sur les pertes de charge en comparant les résultats obtenus avec les deux conduites. Les compteurs et les prises de pression sont les éléments les plus sensibles de l'installation. Avec une eau toujours aussi chargée, ces éléments vont nécessiter un entretien fréquent, il faudra constamment les ouvrir les compteurs pour les débarrasser des impuretés qui s'y accumulent et les empêchent de tourner normalement. Le réservoir doit subir une opération de rénovation adéquate pour qu'il cesse de laisser filer dans les conduites des morceaux de rouille qui se détachent de ses parois et le bassin principal doit être étanchéifié et protégé en recouvrant entièrement les canaux qui ramènent l'eau vers lui. Ils faut également nettoyer régulièrement les autres installations qui utilisent l'eau du bassin afin que les impuretés que ces installations contiennent ne soient pas transférées vers les autres, dont notre banc d'essai. Il faut également trouver des tubes piézométriques de longueur suffisante pour éviter de raccorder deux tubes de petite longueur afin de réaliser un piézomètre, car ce raccordement finit toujours par être le siège d'une fuite. Sans oublier la réalisation d'un bassin de déversement plus grand et plus adapté pour l'étalonnage des compteurs. D'ailleurs on pourrait même songer à étalonner des éléments déprimogènes pour la mesure de débit, en les insérant comme des singularités dans la conduite.

Nous espérons que ce travail motivera d'autres étudiants qui s'intéresseront à la remise en marche ou bien à la réalisation d'autres bancs d'essai dans nos différents laboratoires.

Annexe II :

Mesures Obtenues Lors des
Essais

Tableaux AII.1-3 : correspondances entre les débits mesurés par les compteurs d'eau et ceux mesurés au bassin.

Tableau AII.1 : Conduite de diamètre $\varnothing = 80 \text{ mm}$

Essai N°	$V_{compt}(l)$	$t(s)$	$Q_{compt}(l/s)$	$V_{bassin}(l)$	$t(s)$	$Q_{bassin}(l/s)$
1	100	265	0.377	180	501	0.359
2	100	177	0.565	180	302	0.596
3	100	140	0.714	180	234	0.769
4	100	73	1.370	180	126	1.429
5	100	49.6	2.015	180	93.6	1.923

Tableau AII.2 : Conduite de diamètre $\varnothing = 50 \text{ mm}$

Essai N°	$V_{compt}(l)$	$t(s)$	$Q_{compt}(l/s)$	$V_{bassin}(l)$	$t(s)$	$Q_{bassin}(l/s)$
1	30	78.8	0.381	150	406	0.369
2	30	57.1	0.525	150	293	0.512
3	30	34.7	0.865	150	178	0.843
4	50	43.2	1.157	150	128	1.172
5	50	32.4	1.543	150	97.7	1.535

Tableau AII.3 : Conduite de diamètre $\varnothing = 26 \text{ mm}$

Essai N°	$V_{compt}(l)$	$t(s)$	$Q_{compt}(l/s)$	$V_{bassin}(l)$	$t(s)$	$Q_{bassin}(l/s)$
1	3	36.8	0.082	15	174.2	0.086
2	5	40.7	0.123	15	114.6	0.131
3	10	38.1	0.262	15	55.7	0.269
4	10	30.4	0.329	15	45.3	0.331
5	15	36.2	0.414	15	37.6	0.399

Tableaux AII.4-6 : Mesures effectuées pour l'étude des pertes de charge linéaires dans les trois conduites.

Tableau AII.4 : Conduite de diamètre $\phi = 80$ mm

<i>Essai</i> <i>N°</i>	<i>Volume</i>	<i>Temps</i>	<i>Débit</i>	<i>Hauteurs piézométriques (cm CE)</i>				
	<i>V (l)</i>	<i>t (s)</i>	<i>Q (l/s)</i>	<i>h₁</i>	<i>h₂</i>	<i>h₃</i>	<i>h₄</i>	<i>h₅</i>
1	20	53.86	0.37	228.1	227.8	227.6	227.5	227.4
2	20	34.6	0.58	226.5	226.1	225.9	225.6	225.4
3	40	39.55	1.01	221	220.3	219.8	219.4	218.9
4	100	58.9	1.70	203.1	202.1	201.2	200.2	199.3
5	100	47.79	2.09	189.5	188.3	187.1	186.1	185.2
6	100	41.4	2.42	174.3	173	171.9	171.1	170.1
7	100	35.05	2.85	147.9	146.5	145.2	144.4	143.1
8	100	29.43	3.40	119.7	118.1	116.7	115.6	114.1

Tableau AII.5 : Conduite de diamètre $\phi = 50$ mm

<i>Essai</i> <i>N°</i>	<i>Volume</i>	<i>Temps</i>	<i>Débit</i>	<i>Hauteurs piézométriques (cm CE)</i>				
	<i>V (l)</i>	<i>t (s)</i>	<i>Q (l/s)</i>	<i>h₁</i>	<i>h₂</i>	<i>h₃</i>	<i>h₄</i>	<i>h₅</i>
1	15	53.23	0.28	218.3	217.7	217.3	217	216.7
2	15	38.38	0.39	209	206.1	204.5	203	200.1
3	15	29.65	0.51	198.8	198.1	197.5	197	196.4
4	15	26.05	0.58	187.8	186.6	185.9	185.3	184.3
5	30	42.43	0.71	163	161.9	160.5	159.2	158.4
6	30	25.54	1.17	130	127.6	125.9	123.6	122.1
7	30	19.89	1.51	114.7	111.8	109.1	107.2	105.6
8	50	26.55	1.88	92.6	89.6	87.5	85	83.3

Tableau AII.6 : Conduite de diamètre $\phi = 26$ mm

<i>Essai</i> <i>N°</i>	<i>Volume</i>	<i>Temps</i>	<i>Débit</i>	<i>Hauteurs piézométriques (cm CE)</i>				
	<i>V (l)</i>	<i>t (s)</i>	<i>Q (l/s)</i>	<i>h₁</i>	<i>h₂</i>	<i>h₃</i>	<i>h₄</i>	<i>h₅</i>
1	3	41.04	0.07	225.1	219.4	214.8	210.6	207
2	5	48.46	0.10	220.5	208.6	198.5	188	179.8
3	5	29.88	0.17	210.7	195.3	183.1	169.2	156.9
4	5	24.26	0.21	204.3	186.1	170.2	153.8	137.2
5	5	20.38	0.25	193.5	169.6	146.9	123.4	102.4
6	10	33.09	0.30	184.3	159.6	136.3	112.7	89.9
7	10	30.55	0.33	169.9	144.4	120	97.2	73.5
8	100	29.43	3.40	119.7	118.1	116.7	115.6	114.1

Tableaux AII.7-11 : Mesures effectuées pour l'étude des pertes de charge singulières avec différentes singularités montées sur la conduite de diamètre $\varnothing = 80 \text{ mm}$.

Tableau AII.7 : Tube de Venturi

<i>Essai</i> <i>N°</i>	<i>V (l)</i>	<i>t (s)</i>	<i>Q (l/s)</i>	<i>h₄ (cm)</i>	<i>h₅ (cm)</i>
1	10	34.56	0.289	225.4	224.7
2	20	27.27	0.733	214.9	212.1
3	30	23.25	1.290	191.6	183.5
4	50	28.48	1.756	160.5	147.5
5	100	43.87	2.279	124.1	104.7
6	100	36.22	2.761	90.6	61.3

Tableau AII.8 : Diaphragme

<i>Essai</i> <i>N°</i>	<i>V (l)</i>	<i>t (s)</i>	<i>Q (l/s)</i>	<i>h₄ (cm)</i>	<i>h₅ (cm)</i>
1	10	15.75	0.63	216	215.3
2	10	11.11	0.90	208.2	205.3
3	30	20.25	1.48	186.6	178
4	50	29.43	1.70	176.4	162.2
5	100	46.26	2.16	143.3	123.6
6	100	38.02	2.63	108.4	78.2

Tableau AII.9 : Robinet-vanne

<i>Essai N°</i>	<i>V (l)</i>	<i>t (s)</i>	<i>Q (l/s)</i>	<i>h₃ (cm)</i>	<i>h₄ (cm)</i>
1	10	19.12	0.52	226.5	226
2	20	19.71	1.01	190.3	189.6
3	30	22.81	1.32	166.7	165.1
4	50	28.17	1.77	120.4	117.9
5	50	24.12	2.07	92.4	89.3
6	100	40.6	2.46	68	64.2

Tableau AII.10 : Elargissement et rétrécissement brusques

<i>Essai N°</i>	<i>V (l)</i>	<i>t (s)</i>	<i>Q (l/s)</i>	<i>Elargissement</i>		<i>Rétrécissement</i>	
				<i>h₃ (cm)</i>	<i>h₄ (cm)</i>	<i>h₅ (cm)</i>	<i>h₆ (cm)</i>
1	20	25.56	0.78	215.4	214.8	214.8	214.5
2	20	16.78	1.19	200.4	199.4	199.3	198.7
3	50	27.40	1.82	162.2	161	160.9	159.9
4	100	40.86	2.45	122.5	121	121	119.3
5	100	35.84	2.79	92.9	91.1	90.9	88.5
6	100	29.76	3.36	63.2	60.3	60	56.5

Tableau AII.11 : Coude arrondi

<i>Essai N°</i>	<i>V (l)</i>	<i>t (s)</i>	<i>Q (l/s)</i>	<i>h₃ (cm)</i>	<i>h₄ (cm)</i>	<i>h₅ (cm)</i>
1	10	23.67	0.42	220.9	220.5	220
2	20	19.66	1.02	208.1	206.1	205.7
3	20	12.73	1.57	185.6	181.9	181.4
4	50	24.34	2.05	156.4	151.9	151.2
5	50	18.99	2.63	122.2	115.7	114.5
6	100	32.58	3.07	116.3	113.6	106

Annexe III :

Résultats Des Calculs

Tableau A.III.1 : Résultats des calculs du gradient hydraulique en fonction du débit pour la conduite de diamètre $\varnothing = 80 \text{ mm}$.

Essai N°	1	2	3	4	5	6	7	8
$J(.10^2)$	0.081	0.128	0.241	0.447	0.509	0.486	0.552	0.646
$\log J$	-3.092	-2.894	-2.618	-2.350	-2.293	-2.313	-2.258	-2.190
$Q_v(l/s)$	0.37	0.58	1.01	1.70	2.09	2.42	2.85	3.40
$\log Q_v$	-0.430	-0.238	0.005	0.2299	0.321	0.383	0.455	0.531

Tableau A.III.2 : Calcul du gradient hydraulique dans les trois conduites pour un débit constant de 0.37 l/s

Diamètre de la conduite (mm)		80	50	26
Hauteurs piézométriques (cm CE)	h_1	228.1	210.69	152
	h_2	227.8	208.21	123.4
	h_3	227.6	206.83	98.6
	h_4	227.5	205.55	75.7
	h_5	227.4	203.12	50.8
J		0.000809	0.00851	0.117
$\log(J)$		-3.0915	-2.0701	-0.9318
$1/D \text{ (mm}^{-1}\text{)}$		0.0125	0.0200	0.0385
$\log(1/D)$		-1.9031	-1.6990	-1.4150

Tableaux A.III.4-9 : Calcul des pertes de charge et des longueurs équivalentes pour les différentes singularités à différentes valeurs du débit.

Tableau A.III.4 : Tube de Venturi

Essai N°	$\Delta h_{th}(m)$	$\Delta h_{mes}(m)$	$\Delta h_e = \Delta h_{mes} - \Delta h_{th}$	$J (cm CE/cm)$	$L_{eq} (m)$
1	0.0023	0.007	0.0047	0.0007	6.9
2	0.0147	0.028	0.0123	0.0017	7.4
3	0.0454	0.081	0.0266	0.0029	9.3
4	0.0841	0.132	0.0459	0.0038	12.0
5	0.1417	0.209	0.0623	0.0049	12.7
6	0.2079	0.293	0.0851	0.0059	14.4

Tableau A.III.5 : Diaphragme

Essai N°	$\Delta h_{4-5} (m)$	$J (cm CE/cm)$	$L_{eq} (m)$
1	0.007	0.0014	4.9
2	0.029	0.0020	14.3
3	0.086	0.0033	26.4
4	0.142	0.0037	38.3
5	0.197	0.0047	42.2
6	0.302	0.0056	53.7

Tableau A.III.6 : Robinet-vanne

Essai N°	$\Delta h_{3-4}(m)$	$J (cm CE/cm)$	$L_{eq} (m)$
1	0.003	0.0012	2.5
2	0.007	0.0023	3.1
3	0.016	0.0029	5.5
4	0.025	0.0039	6.5
5	0.031	0.0045	6.9
6	0.038	0.0053	7.2

Tableau A.III.7 : Elargissement brusque

Essai N°	$\Delta h_{th}(m)$	$\Delta h_{mes}(m)$	$\Delta h_e = \Delta h_{mes} - \Delta h_{th}$	$J (cm CE/cm)$	$L_{eq} (m)$
1	-0.0009	0.006	0.0069	0.0018	3.9
2	-0.0021	0.010	0.0121	0.0026	4.6
3	-0.0050	0.012	0.0170	0.0040	4.3
4	-0.0091	0.015	0.0241	0.0053	4.6
5	-0.0118	0.018	0.0298	0.0059	5.0
6	-0.0171	0.029	0.0461	0.0071	6.5

Tableau A.III.8 : Rétrécissement brusque

Essai N°	$\Delta h_{th}(m)$	$\Delta h_{mes}(m)$	$\Delta h_e = \Delta h_{mes} - \Delta h_{th}$	$J (cm CE/cm)$	$L_{eq} (m)$
1	0.0009	0.003	0.00208	0.0018	1.2
2	0.0021	0.006	0.00345	0.0026	1.3
3	0.0050	0.010	0.00528	0.0040	1.3
4	0.0091	0.017	0.00790	0.0053	1.5
5	0.0118	0.024	0.01270	0.0059	2.1
6	0.0171	0.035	0.01768	0.0071	2.5

Tableau A.III.9 : Coude

Essai N°	$\Delta h_{3-5}(m)$	$J (cm CE/cm)$	$L_{eq} (m)$
1	0.009	0.0010	9.2
2	0.024	0.0023	10.5
3	0.042	0.0034	12.2
4	0.052	0.0044	11.7
5	0.077	0.0056	13.7
6	0.103	0.0065	15.8

Références Bibliographiques

Livres :

- [1] **BRUCE R. MUNSON, DONALD F. YOUNG, THEODORE H. OKIISHI and WADE W. HUEBSCH.** « *Fundamentals of Fluid Mechanics* » 6th edition . John Wiley & Sons, 2009.
- [2] **C.P. KOTHANDARAMAN, R. RUDRAMOORTHY.** « *Fluid Mechanics and Machinery* », 2nd edition. New Age International Publishers 2007
- [3] **PHILIP J. PRITCHARD, JOHN C. LEYLEGIAN.** « *Fox and McDonal's Introduction to fluid Mechanics* », 8th edition. John Wiley & Sons 2011
- [4] **FRANK M. WHITE.** « *Fluid Mechanics* », 4th edition. McGraw Hill 2002
- [5] **S. BENNIS.** « *Hydraulique et hydrologie* », 2ème édition. Presses de l'Université du Québec 2007
- [6] **I.E IDEL'CIK.** « *Memento des pertes de charge* », traduit du russe par **M. MEURY**, Eyrolles Paris 1969