



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Hydraulique  
Hydraulique Urbaine

Réf. : HU20

---

Présenté et soutenu par :  
**MADJIDI Brahim**

Le : samedi 23 juin 2018

## **Relations entre les coefficients de Manning-Strickler (Ks), Williams-Hazen (CHW) et la Rugosité absolue de la paroi interne d'une conduite circulaire en charge**

---

### **Jury :**

Mme. ONOUKI Samira	MCA	Université de Biskra	Président
Mme. CHARHABIL Sonia	MCA	Université de Biskra	Examineur
M. BEDJAOUI Ali	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# *Dédicace*

*Je rends un grand hommage à travers ce modeste travail, en signe  
de respect et de reconnaissance envers :*

A toute ma famille et plus précisément à ma mère et mon père

***P**our tous les sacrifices et leur soutien moral et matériel dont ils ont  
fait preuve pour que je réussisse.*

A tous mes frères :

Sœurs :

A toutes mes amis sans exception et tous ceux qui me sont chers

# Remerciements

*Tout d'abord merci à Allah de m'avoir donné la force pour Terminer ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Monsieur : **Dr.BEDJAOUI,Alì** .Pour ma avoir encadré durant ma préparation de ce mémoire, pour ses conseils.*

*Et je remercie également messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de siéger à ma soutenance.*

*Et aussi je tiens à remercier mon père et ma mère, tous mes frères,*

*Toutes mes sœurs et tous mes amis et amies de leurs motivation et de leur encouragement matériel et moral.*

*Je n'oublie pas de remercier aussi l'ensemble du corps administratif du département de **HYDRAULIQUE***

*Et aussi je tiens à remercier tous les enseignants du département d'hydraulique en particulier ceux qui nous ont enseigné depuis le début d'année.*



**MADJIDI-BRAHIM**

---

## Sommaire

	Page
Dédicace .....	i
Remerciements .....	ii
Résumé .....	iii
Principes notation .....	v
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux .....	viii
Introduction générale .....	1
<b>CHAPITRE I : Généralités sur les écoulements en charge</b>	
1.1 Introduction .....	2
1.2 Notions sur les écoulements en charge .....	2
1.2.1 Notion de vitesse .....	3
1.2.2 Débit volume .....	6
1.2.3 Gradient hydraulique .....	7
1.3 Expressions du coefficient de frottement .....	11
1.3.1 Relation de Darcy-Weisbach .....	13
1.3.2 Formule de Manning-Strickler .....	14
1.3.3 Formule de Williams-Hazen .....	16
1.3.4 Formule de Achour –Bedjaoui .....	19
1.3.5 Formule de Swamee et Jain .....	20
1.4 Conclusion .....	21

---

**CHAPITRE II : Relations entre les coefficients de Manning-Strickler (Ks), Williams-Hazen (C<sub>HW</sub>) et la rugosité absolue  $\epsilon$  de la paroi interne d'une conduite circulaire en charge**

2.1	Introduction .....	22
2.2	Expression du coefficient de Williams-Hazen (C <sub>HW</sub> ) en fonction de la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite.....	23
2.3	Exemple d'application.....	25
2.4	Expression de la relation du coefficient de Williams-Hazen (C <sub>HW</sub> ) en fonction du coefficient de Manning-Strickler (Ks).....	28
2.5	Exemple d'application.....	29
2.6	Expression de la relation coefficient Manning-Strickler (Ks) en fonction de de la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite $\epsilon$ .....	31
2.7	Exemple d'application.....	32
2.8	Vérification des différents coefficients Williams-Hazen, Manning-Strickler par voie expérimental .....	34
2.9	Conclusion.....	41
	Conclusion generale .....	42
	Bibliographie.....	44
	Annexes .....	46

**الملخص :**

ان حساب الميل الهيدروليكي بالاعتماد على علاقتي *Williams-Hazen* او *Manning-Strickler* يسمح بالحصول على نتائج مباشرة لان العلاقتين لا تعتمدان على معامل الاحتكاك في حساب الميل الهيدروليكي لكن ما يعاب على استخدام العلاقتين هو اعتمادهما على معاملات يصعب تحديد قيمهما بالرجوع الى الجداول لان كل جدول يعطي قيمة مختلفة لنفس المادة المصنعة للأنياب. ان الهدف الرئيس لهذه الدراسة هو اقتراح علاقات جديدة لحساب كل من معامل *Williams-Hazen* ومعامل *Manning-Strickler* بدلالة الخشونة المطلقة للأنبوب  $\epsilon$ .

ان العلاقات المقترحة والنتيجة عن هذه الدراسة تسمح بحساب الميل الهيدروليكي بدقة كبيرة بعد تصحيح قيم المعاملات مقارنة مع لو تم حسابه من خلال علاقة *Darcy* بالاعتماد على علاقة *Colebrook-white* في حساب معامل الاحتكاك.

**كلمات مفتاحية:**

تدفق-قطر-ميل هيدروليكي-معامل الاحتكاك-*Williams-Hazen* -*Manning-Strickler*-الخشونة المطلقة.

**Résumé :**

Le calcul du gradient hydraulique en se basant que se soit sur la relation de *Williams-Hazen* ou bien de *Manning-Strickler* présente un avantage dû à son aspect explicite où le coefficient de frottement ne présente aucun obstacle pour le calcul de ce gradient  $J$  mais l'inconvénient de l'utilisation de cette relation est lié au choix des valeurs de ces coefficients où plusieurs auteurs préconisent des valeurs différentes pour un même matériau. L'objectif principal de cette étude est de proposer une relation entre les coefficients de *Manning-Strickler* ( $K_s$ ), *Williams-Hazen* ( $C_{WH}$ ) et la rugosité absolue  $\epsilon$  de la paroi interne d'une conduite circulaire en charge.

Les relations proposées donnant les coefficients de *Williams-Hazen*  $C_{WH}$  et de *Manning-Strickler*  $K_s$  offrent une très bonne opportunité pour le calcul du gradient hydraulique avec une très bonne précision en se référant à la relation de *Darcy* où le coefficient de frottement est calculé en application de la relation de *Colebrook-white*.

**Mots clés :**

Débit- Diamètre- Gradient hydraulique- *Williams-Hazen* -*Manning-Strickler*- rugosité absolue

**Abstract:**

The calculation of the hydraulic gradient based either on the relationship of Williams-Hazen or Manning-Strickler presents an advantage due to its explicit aspect where the coefficient of friction presents no obstacle for the calculation of this gradient I but the incontinent of the use of this relationship is linked to the choice of the values of these coefficients where several authors advocate different values for the same material. The main objective of this study is to propose a relationship between the coefficients of Manning-Strickler ( $K_s$ ), Williams-Hazen ( $C_{HW}$ ) and the absolute roughness  $\mathcal{E}$  of the internal wall of a circular pipe.

The proposed relations giving the coefficients of *Williams-Hazen*  $C_{WH}$  and *Manning-Strickler*  $k_s$  offer a very good opportunity for the calculation of the hydraulic gradient with a very good accuracy in referring to the relationship of Darcy where the coefficient of friction is calculated by application of the relationship of Colebrook-white.

**Key words:**

Flow- Diameter - hydraulic Gradient- Williams-Hazen- Manning-Strickler- absolute roughness

## Principes notation

$C_{HW}$	Coefficient de Hazen-Williams .....	(-)
$C_f$	Facteur de conversion d'unité (10.7 SI).....	(-)
$D$	Diamètre de la conduite.....	(m)
$\varepsilon$	Rugosité absolue d'une paroi .....	(m)
$\varepsilon/D$	Rugosité relative.....	(-)
$f$	Coefficient de frottement .....	(-)
$g$	Accélération de la pesanteur .....	(m/s <sup>2</sup> )
$\Delta H$	La perte de charge .....	(m)
$J$	Gradient de la perte de charge linéaire .....	(-)
$K_s$	Coefficient de rugosité de <i>Manning-Strickler</i> .....	(m <sup>1/3</sup> /s)
$L$	Distance entre deux sections de la conduite .....	(m)
$n$	Coefficient de rugosité de <i>Manning</i> .....	(m <sup>-1/3</sup> .s)
$\rho$	La masse volumique du fluide .....	(kg/m <sup>3</sup> )
$Q$	Débit volume.....	(m <sup>3</sup> /s)
$r_0$	Rayon d'une conduite.....	(m)
$\bar{R}$	Nombre de <i>Reynolds</i> de l'écoulement dans le modèle rugueux.....	(-)
$R$	Nombre de <i>Reynolds</i> d'un écoulement.....	(-)
$S$	Aire d'une section de la conduite.....	(m <sup>2</sup> )
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide.....	(Kg/m/s)
$V$	Vitesse moyenne du fluide.....	(m/s)
$\nu$	Viscosité cinématique .....	(m <sup>2</sup> /s)

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> : Profil des vitesses en régime laminaire .....	4
<b>Figure 1.2</b> : Vitesse moyenne temporelle dans une conduite d'écoulement .....	4
<b>Figure 1.3</b> : Profil de vitesse pour différents régimes d'écoulement .....	5
<b>Figure 1.4</b> : Notion de perte de charge .....	8
<b>Figure 1.5</b> : Diagramme de Moody (1944) .....	10
<b>Figure 2.1</b> : Détermination du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour D=69/80 mm en Plexiglas Avec (CHW=140, KS=100, $\varepsilon=0,001$ ).....	36
<b>Figure 2.2</b> : valeurs du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour D=49/50 mm en Acier Galvanisé, Avec (CHW=120, KS=100, $\varepsilon=0,001$ ) .....	37
<b>Figure 2.3</b> : Détermination du gradient hydraulique de J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) D=124/130 mm en PVC, Avec (CHW=150, KS=120, $\varepsilon=0,001$ ).....	37
<b>Figure 2.4</b> : Détermination du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour D=130/140 mm en PVC, Avec (CHW=150, KS=120, $\varepsilon=0,001$ ).....	38
<b>Figure 2.5</b> : Détermination du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25), Avec (CHW et Ks Corrigés) Pour D=69/80 mm en Plexiglas).....	40
<b>Figure 2.6</b> : Détermination du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25), Avec (CHW et Ks Corrigés) Pour D=49/50 mm en Acier Galvanisé.....	40
<b>Figure 2.7</b> : Détermination du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25), Avec (CHW et Ks Corrigés) Pour D=124/130 mm en PVC .....	40
<b>Figure 2.8</b> : Détermination du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25), Avec (CHW et Ks Corrigés) Pour D=130/140 mm en PVC .....	40

---

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1</b> : Rugosité équivalente de sable pour les conduites de différents matériaux D'après Lamont (1981), Moody (1944).....	14
<b>Tableau 1.2</b> : Coefficient de rugosité de Manning pour quelques matériaux de conduites	15
<b>Tableau 1.3</b> : Coefficient de Hazen Williams, Lamont (1981);.....	16
<b>Tableau 1.4</b> : Valeurs du Coefficient de Hazen-Williams Adopté de Brière (1997).....	17
<b>Tableau 1.5</b> : Valeurs de CHW, pour différents matériaux de conduite.....	17
<b>Tableau 1.6</b> : Correspondance entre les valeurs de CHW et KS et $\varepsilon$ pour différents matériaux de conduite .....	18
<b>Tableau 2.1</b> : Conduites testées lors des essais expérimentaux .....	34
<b>Tableau 2.6</b> : Ecart max sur le calcul du gradient hydraulique J.....	38
<b>Tableau 2.11</b> : Correction des coefficients de Manning-Strickler et de Williams-Hazen selon (2.26) et (2.27).....	39
<b>Tableau 2.2</b> : Détermination du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ;William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour D=69/80 mm en Plexiglas Avec (CHW=140, KS=100, $\varepsilon=0,001$ ).....	46
<b>Tableau 2.3</b> : valeurs du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William- Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour D=49/50 mm en Acier Galvanisé, Avec (CHW=120, KS=100, $\varepsilon=0,001$ ).....	47
<b>Tableau 2.4</b> : Détermination du gradient hydraulique de J selon les relations de Darcy (2.20); William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) D=124/130 mm en PVC, Avec (CHW=150, KS=120, $\varepsilon=0,001$ ).....	49
<b>Tableau 2.5</b> : Détermination du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour D=130/140 mm en PVC, Avec(CHW=150, KS=120, $\varepsilon=0,001$ ) .....	50

**Tableau 2.7 :** Détermination du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour D=69/80 mm en Plexiglas Avec (CHW=140, KS=100,  $\varepsilon=0,001$ ).....51

**Tableau 2.8 :** valeurs du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour D=49/50 mm en Acier Galvanisé, Avec (CHW=120, KS=100,  $\varepsilon=0,001$ ).....52

**Tableau 2.9 :** Détermination du gradient hydraulique de J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) D=124/130 mm en PVC, Avec (CHW=150, KS=120,  $\varepsilon=0,001$ ).....54

**Tableau 2.10 :** Détermination du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour D=130/140 mm en PVC, Avec (CHW=150, KS=120,  $\varepsilon=0,001$ ) .....55

**Tableau 2.12 :** Détermination du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour D=69/80 mm en Plexiglas Avec (CHW, KS corrigés).....57

**Tableau 2.13 :** valeurs du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour D=49/50 mm en Acier Galvanisé, Avec (CHW, KS corrigés) .....58

**Tableau 2.14 :** Détermination du gradient hydraulique de J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) D=124/130 mm en PVC, Avec (CHW, KS corrigés).....60

**Tableau 2.15 :** Détermination du gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour D=130/140 mm en PVC, Avec (CHW, KS corrigés) .....61

# **Introduction**

## **Générale**

## Introduction générale

Le calcul de l'écoulement dans les conduites de forme circulaire en charge est fréquemment rencontré dans la pratique de l'ingénieur hydraulicien.

L'écoulement en charge en conduites de forme circulaire est régi par cinq paramètres qui sont le débit volume  $Q$ , le gradient de la perte de charge  $J$ , le diamètre de la conduite  $D$ , la rugosité absolue  $\varepsilon$  caractérisant l'état de la paroi interne de la conduite considérée et de la viscosité cinématique  $\nu$  du liquide en écoulement.

Dans le domaine de l'écoulement turbulent en conduite sous pression, trois catégories de problèmes sont rencontrés : le calcul du débit volume  $Q$ , le calcul du diamètre  $D$  de la conduite et le calcul du gradient  $J$  de la perte de charge.

Le calcul du gradient hydraulique en se basant que se soit sur la relation de *Williams-Hazen* ou bien de *Manning-Strickler* présente un avantage dû à son aspect explicite où le coefficient de frottement ne présente aucun obstacle pour le calcul de ce gradient  $J$  mais l'inconvénient de l'utilisation de cette relation est lié au choix des valeurs de ces coefficients où plusieurs auteurs préconisent des valeurs différentes pour un même matériau.

L'objectif principal de cette étude est de proposer une relation entre les coefficients de Manning-Strickler ( $K_s$ ), Williams-Hazen ( $C_{HW}$ ) et la rugosité absolue  $\varepsilon$  de la paroi interne d'une conduite circulaire en charge.

Afin de répondre au mieux l'objectif de notre recherche, nous avons subdivisé notre mémoire en deux chapitres.

Un premier chapitre est exclusivement réservé à des notions sur l'écoulement en charge. Un second chapitre qui a été consacré à l'étude de la possibilité d'exprimer les différents coefficients (*Manning-Strickler*, *Williams-Hazen*) en fonction de la rugosité absolue de la conduite qu'on peut évaluer facilement et avec une grande précision avec un rugosimètre et des paramètres de l'écoulement.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les écoulements en charge**

## Chapitre : 1

### Généralités sur les écoulements en charge

#### 1.1 Introduction

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter des notions sur l'écoulement en charge et en particulier l'écoulement uniforme et permanent.

Dans un premier temps, des rappels théoriques sur l'écoulement dans les conduites en charge sont présentés.

Dans un second temps, Nous exposerons les paramètres régissant un écoulement en charge qui sont le débit volume  $Q$  ( $m^3/s$ ), la vitesse moyenne de l'écoulement  $V$  ( $m/s$ ), la dimension linéaire  $D$  ( $m$ ), le coefficient de frottement  $f$  et en fin le gradient unitaire  $J$ .

Des formules donnant ou exprimant les paramètres mentionnés ci-avant seront analysés lors de ce présent chapitre, à savoir (*Darcy-Weisbach, Manning-Strickler, Williams Hazen et Achour – Bedjaoui*).

#### 1.2 Notions sur les écoulements en charge

Les écoulements en charge sont des écoulements confinés à l'intérieur d'un contenant, en général une conduite. La pression à l'intérieur de ces écoulements peut être de beaucoup plus élevée que la pression atmosphérique ou encore s'abaisser à des valeurs aussi faibles que la pression de vapeur saturante. Même si la pression à l'intérieur de ce type d'écoulement peut atteindre la pression atmosphérique, en aucun cas nous considérerons la présence dans cette catégorie d'écoulements en charge.

La distinction entre les différents régimes d'écoulement dépend du nombre adimensionnel  $Re$  appelé de *Reynolds* (1842-1912).

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1.1)$$

- $\rho$  : la masse volumique du fluide.
- $v$  : Vitesse moyenne d'écoulement à travers la section considérée en (m/s).
- $D$  : Diamètre de la conduite ou largeur de la veine fluide en (m).
- $\nu$  : Viscosité cinématique du fluide ( $m^2/s$ ).
- $\mu$  : Viscosité dynamique du fluide (kg/m/s).

L'écoulement dans les conduites en charge est influencé par cinq paramètres le débit volume  $Q$ , le diamètre  $D$ , le gradient hydraulique  $J$ , la rugosité  $\mathcal{E}$  et la Viscosité Cinématique  $\nu$ . La vitesse, le coefficient de frottement  $f$ , le nombre de *Reynolds*  $Re$  et la rugosité relative ( $\mathcal{E}/D$ ) peuvent être déterminés à l'aide de ces paramètres de base. Dans les problèmes des écoulements en charge, quatre des cinq paramètres doivent être donnés et le cinquième peut être calculé à l'aide des relations existantes.

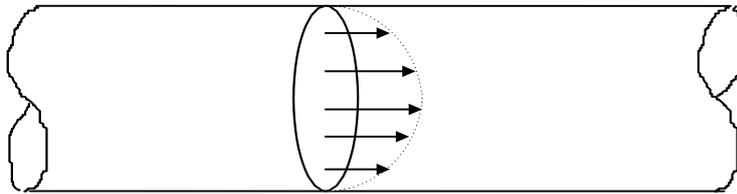
En pratique le nombre de *Reynolds* est utilisé pour distinguer les régimes d'écoulements et pour la détermination du coefficient de frottement  $f$ , qui à son tour est utilisé dans la résolution de trois problèmes qui se posent en hydraulique et cela quel que soit le régime d'écoulement et qui sont :

- Le gradient Hydraulique  $J$ .
- Le débit  $Q$ .
- Le diamètre  $D$

### 1.2.1 Notion de vitesse

Dans le cas des fluides réels, la viscosité dynamique entraîne une variation de la vitesse suivant une section droite de la canalisation. La vitesse de l'eau à proximité de la paroi est quasi-nulle, au centre de la canalisation la vitesse est maximale.

La figure 1-1 représente le profil des vitesses suivant une section droit.

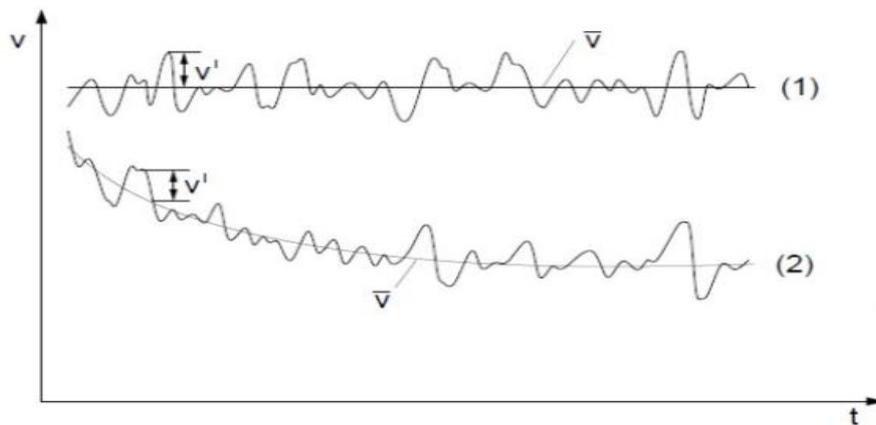


**Figure 1.1** : Profil des vitesses en régime laminaire

Plutôt que de tenir compte de l'ensemble des vitesses, la plupart des auteurs utilisent la notion de vitesse moyenne, on parle aussi de vitesse d'écoulement.

La vitesse moyenne du fluide est égale à la moyenne de l'ensemble des vitesses.

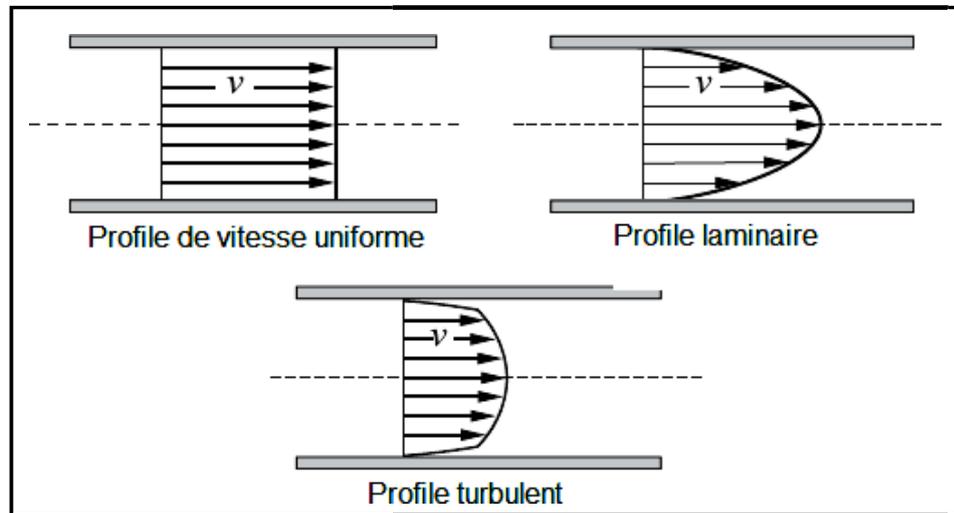
Sur une section droite. La vitesse s'exprime en unité légale (vitesses en  $m.s^{-1}$ ).



**Figure 1.2** : Vitesse moyenne temporelle dans une conduite d'écoulement. (Roland O, 2015).

En raison des efforts de cisaillement le long des parois de la conduite, la vitesse du liquide est nulle au parois de la canalisation, et augmente en s'éloignant des parois pour atteindre son

maximum le long de l'axe de la conduite, la figure 1.3, montre la variation de la vitesse du fluide dans une conduite, également appelée profil de vitesse.



*Figure 1.3 : Profil de vitesse pour différents régimes d'écoulement. (BELAIB, 2008).*

La forme du profil de vitesse varie selon le régime d'écoulement, dans l'écoulement laminaire, les particules liquides se déplacent en couches parallèles ou sous forme de lames, produisant des efforts de cisaillement très fortes entre les couches adjacentes, mathématiquement, le profil de vitesse dans l'écoulement laminaire est schématisé comme une parabole (figure 1.3).

Dans l'écoulement laminaire, la perte de charge dans un segment de la canalisation est une fonction de la viscosité du liquide et pas de la rugosité de la conduite.

L'écoulement turbulent est caractérisé par les remous qui produisent des variations aléatoires des profils de vitesse, bien que le profil de vitesse de l'écoulement turbulent soit plus erratique que celui de l'écoulement laminaire, le profil moyen de vitesse montre moins de variation à travers la conduite. (BELAIB, 2008).

Donc la vitesse d'un fluide s'écoulant dans une conduite n'est pas constant à travers le diamètre, la vitesse d'une particule fluide dépend de la position de celle-ci par rapport aux parois de la conduite, dans la plupart des cas, les modèles hydrauliques prennent en considération la vitesse moyenne à travers la section transversale de la canalisation qui peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$V = \frac{Q}{A} \quad (1.2)$$

Avec :

- V : vitesse moyenne du fluide (m/s)
- Q : Débit dans conduite (m<sup>3</sup>/s)
- A : Surface de la section transversale de la conduite (m<sup>2</sup>).

La surface de la section transversale d'une conduite circulaire, peut être directement Calculée a partir du diamètre D, donc l'équation de la vitesse peut être reformulée comme suit :

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (1.3)$$

Avec : D le diamètre de la conduit (m)

### 1.2.2 Débit volume

Le débit correspond à la quantité de liquide en volume qui traverse une section de la canalisation pendant l'unité de temps. On a l'habitude de noter le débit Q, il s'exprime en unité égale en m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.

Cependant, le débit est donné en m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.

L'équation du débit est donnée par :

$$Q = V \times S \quad (1.4)$$

Avec :

- Q : Débit en m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>
- V : Vitesse en m.s<sup>-1</sup>
- S : section en m<sup>2</sup>

Le débit volumique d'une veine fluide est la limite du rapport ( $dv/dt$ ) quand dt tend vers 0.

$$q_v = \frac{dV}{dt} \quad (1.5)$$

Où :

-  $q_v$  : Volume de fluide par unité de temps qui traverse une section droite quelconque de la conduite.

-  $dV$  : Volume élémentaire, en ( $m^3$ ), ayant traversé une surface  $S$  pendant un intervalle de temps  $dt$ .

-  $dt$ : Intervalle de temps en secondes (s).

D'après la relation  $dV = dm/\rho$  on peut écrire également que :

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} \quad (1.6)$$

$$q_v = S \cdot v \quad (1.7)$$

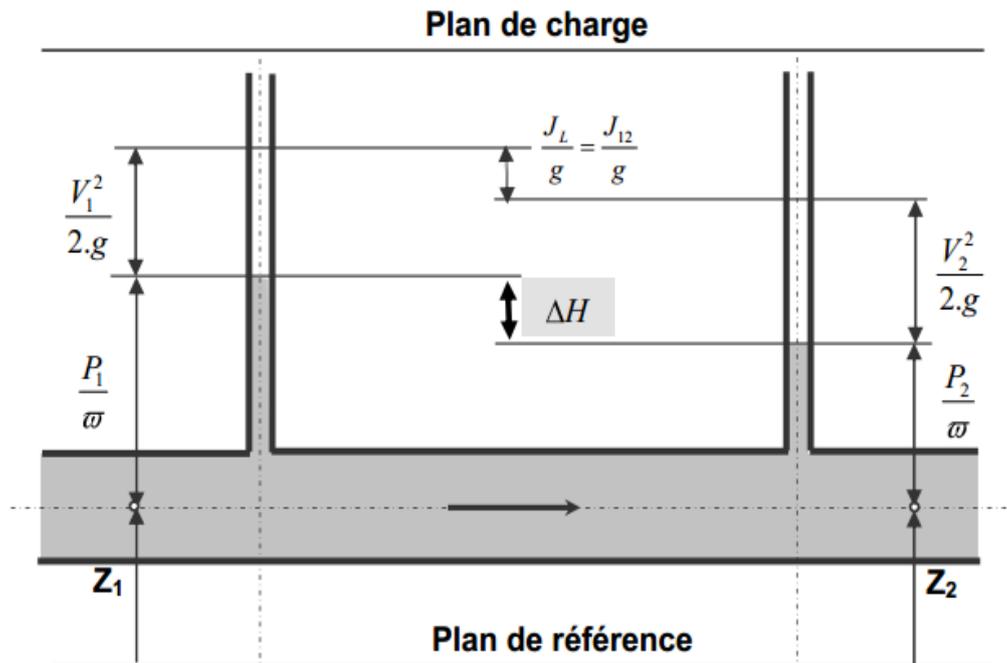
Où:

- $q_v$  : Débit volumique en (kg/s).
- $p$  : Masse volumique en (kg/m<sup>3</sup>).
- $S$  : Section de la veine fluide en (m<sup>2</sup>).
- $V$  : Vitesse moyenne du fluide a travers (S) en (m/s).

### 1.2.3 Gradient hydraulique

Les pertes de charges linéaires, sont des pertes de charge réparties régulièrement le long des conduites. En chaque point d'un écoulement permanent, les Caractéristiques de l'écoulement sont bien définies et ne dépendent pas du temps. (Riadh, 2009).

La représentation graphique de l'écoulement prend l'allure ci-dessous (figure 1.4)



**Figure 1.4** : Notion de perte de charge (Riadh, 2009).

La vitesse étant constante, la ligne piézométrique et la ligne de charge sont Parallèles. La variation de hauteur piézométrique, évaluée en hauteur de liquide est égale a la perte de charge linéaire entre les deux points de mesure.

Les pertes de charge linéaires sont proportionnelles a la longueur L de la conduite, inversement proportionnelles a son diamètre d, proportionnelle au carré de la vitesse débitante V du fluide.

- V : vitesse moyenne d'écoulement dans la conduite (m/s).
- L : longueur de la conduite (m).
- d : diamètre de la conduite (m).
- f : coefficient de perte de charge linéaire, Il dépend du régime d'écoulement et notamment du nombre de Reynolds Re.

Dans un régime d'écoulement laminaire :  $Re < 2000$

$$f = \frac{64}{Re} \text{ (formule de Blasius )} \quad (1.8)$$

Dans un régime d'écoulement turbulent lisse :  $2000 < Re < 10^5$

$$f = 0,316.Re^{-0,25} \text{ (Formule de Blasius)} \quad (1.9)$$

Dans un régime d'écoulement turbulent rugueux :  $Re > 10^5$

$$f = 0.79 \sqrt{\frac{\varepsilon}{d}} \text{ (Formule de Blench).} \quad (1.10)$$

Avec :

- $\varepsilon$  : rugosité de la surface interne de la conduite (mm).
- $d$  : diamètre intérieur de la conduite (mm).

Parfois, on lit la valeur de  $f$  sur un abaque établie par Moody (figure 1-5).

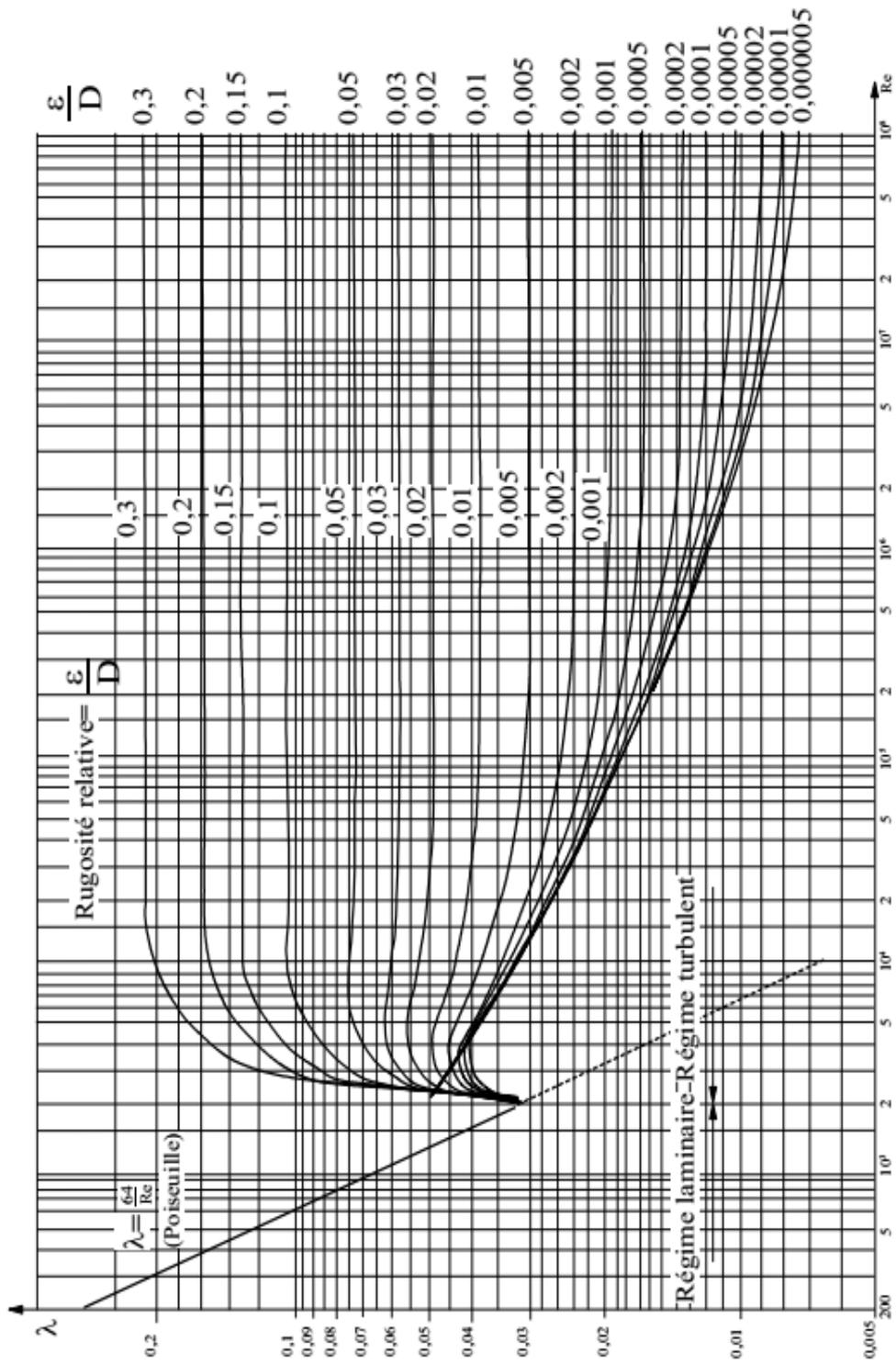


Figure 1.5 : Diagramme de Moody (1944) (Ranald V, 1997).

### 1.3 Expressions du coefficient de frottement

On peut calculer mathématiquement le coefficient de frottement  $f$  pour l'écoulement laminaire, mais on ne dispose d'aucune expression mathématique simple de la relation entre  $f$  et le nombre de *Reynolds* pour le cas de l'écoulement turbulent. De plus, *Nikuradse* et d'autres chercheurs se sont aperçus que la rugosité relative du tuyau (le rapport de la taille des aspérités de surface  $\mathcal{E}$  au diamètre intérieur du tuyau) influait aussi sur la valeur de  $f$ . (RanaldV.Giles, 1997).

(a) Pour l'écoulement laminaire, l'équation ci-dessus peut se mettre sous la forme suivante :

$$\Delta H = j \times l = \frac{64.L.V^2}{Re.D.2g} \quad (1.11)$$

Ainsi, pour l'écoulement laminaire dans tous les tuyaux et pour tous les fluides, la valeur de  $f$  est :

$$f = \frac{64}{Re} \quad (1.12)$$

$Re$  a pratiquement pour valeur maximale 2000 pour l'écoulement laminaire.

Pour l'écoulement turbulent, beaucoup d'ingénieurs en hydraulique ont essayé d'exprimer  $f$  a partir des résultats de leurs propres expériences et de celles des autres.

Pour l'écoulement turbulent dans des tuyaux rugueux et lisses, on peut établir des lois de résistance universelles a partir de

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \quad (1.13)$$

Pour des tuyaux lisses, *Blasius* a proposé pour des nombres de Reynolds compris entre 3 000 et 100 000.

Pour des valeurs de  $Re$  allant jusqu'à environ 3 000 000, l'équation de *Von Karman* modifiée par Prandtl, est :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(R_e \sqrt{f}) \rightarrow \infty \quad (1.14)$$

Pour des tuyaux rugueux

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{r_0}{\varepsilon} + 1.74 \quad (1.15)$$

Pour tous les tuyaux, l'institut d'hydraulique des U.S A. et la plupart des ingénieurs considèrent l'équation de *Colebrook* comme la plus acceptable pour calculer  $f$ . Cette équation est donnée par :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[ -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{4.5}{R_e \sqrt{f}} \right) \right] \quad (1.16)$$

La relation (1.16) s'applique à l'écoulement turbulent, pour peu que le nombre de *Reynolds*  $R$  soit supérieur à 2300 (*Sinniger et Hager*, 1989).

L'écoulement turbulent est non seulement caractérisé par la valeur du nombre de *Reynolds*  $Re$  mais aussi par celle de la rugosité relative  $\varepsilon/D$ .

Selon les valeurs de  $\varepsilon/D$  et de  $Re$ , l'écoulement turbulent peut être en régime pratiquement lisse correspondant à  $\varepsilon/D \rightarrow 0$ , ou en régime rugueux appelé aussi régime de pleine turbulence ou turbulent rugueux. Celui-ci correspond en règle générale aux valeurs élevées du nombre de *Reynolds*  $Re$ .

Dans le cas d'un régime d'écoulement turbulent rugueux, correspondant aux valeurs élevées du nombre de *Reynolds* ( $Re \rightarrow \infty$ ), le terme  $(2.51/R_e \sqrt{f}) \rightarrow 0$ .

En admettant que les valeurs de  $\varepsilon/D$  et de  $Re$  soient données, la relation (1.16) montre que la valeur du coefficient de frottement  $f$  ne peut être explicitement déterminée. La relation (1.16) est en effet implicite vis-à-vis de  $f$  puisque celui-ci est contenu à la fois dans les membres gauche et droit de la relation. La détermination du coefficient de frottement  $f$  nécessite donc un procédé itératif ou graphique dans le cas où la relation (1.16) est utilisée.

### 1.3.1 Relation de Darcy-Weisbach

C'est d'abord *Weisbach* qui fut le premier en 1845 à établir la relation du gradient de la perte de charge dans les conduites circulaires. Indépendamment des travaux de *Weisbach*, *Darcy* effectua en 1854 des travaux sur les écoulements en conduites. Il en est ainsi résulté la formule suivante, portant le nom de *Darcy-Weisbach* : (DARCY, 1845).

$$J = \frac{f}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (1.17)$$

En tenant compte de la relation (1.4), la relation (1.17) s'écrit (A=S):

$$J = \frac{f}{D} \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (1.18)$$

Avec :

- $f$  : coefficient de frottement ou coefficient de résistance à l'écoulement.
- $g$  : l'accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ ).
- $Q$  : Débit volume écoulé par la conduite de diamètre  $D$  ( $m^3/s$ ).

Le facteur de frottement de *Darcy-Weisbach* dépend de la vitesse, de la densité, et de la viscosité du fluide, la taille de la conduite transportant le fluide, et la rugosité interne de la conduite. La vitesse, la densité, la viscosité, et les dimensions de la conduite sont exprimées en termes de nombre de Reynolds. La rugosité interne est exprimée en termes de variable appelée la rugosité relative, qui est la rugosité interne de la conduite ( $\mathcal{E}$ ) divisée par le diamètre de la conduite ( $D$ ). (BELAIB, 2008)

Au début des années 30, le chercheur allemand *Nikuradse* a développé une expérience qui deviendrait fondamentale dans la détermination de la perte de charge (*Nikuradse*, 1932).

Il a collé des grains de sable de diamètre uniforme à l'intérieur de trois conduites de différentes tailles. Ses expériences ont prouvé que la courbe de  $f$  en fonction de  $Re$  est lisse pour les mêmes valeurs de  $\mathcal{E}/D$ .

En s'appuyant sur les expériences des grains de sable de *Nikuradse*, la valeur  $\mathcal{E}$  est appelée rugosité équivalente des grains de sable de la conduite :

Le tableau 1.1 fournit des valeurs de  $\varepsilon$  pour divers matériaux. (BELAIB, 2008).

**Tableau 1.1 :** Rugosité équivalente de sable pour les conduites de différents matériaux

*D'après Lamont (1981), Moody (1944)*

Rugosité équivalente de sable, $\varepsilon$	
Type de conduite (mm)	
Cuivre, laiton	$3,05 \times 10^{-2}$ - 0,9
Fer forgé, acier	$4,6 \times 10^{-2}$ - 2,4
Fonte asphaltée	0,1 – 2,1
Acier galvanisé	0,102 – 4,6
Fonte	0,2 – 5,5
Concrète	0,3 – 3,0
Fonte non enduit	0,226
Fonte enduit	0,102
Acier ondulé enduit	$5,6 \times 10^{-2}$
Ciment	0,4 – 1,2
Fer forge	$5 \times 10^{-2}$
Acier non enduit	$2,8 \times 10^{-2}$
Acier enduit	$5,8 \times 10^{-2}$
Conduite en bois	0,2 – 0,9
PVC	$1,5 \times 10^{-3}$

### 1.3.2 Formule de Manning-Strickler

Une autre expression pour le calcul de la perte de charge, c'est l'équation de *Manning* donnée par :

$$h_l = \frac{c_f \cdot l \cdot (nQ)^2}{D^{5.33}} \quad (1-19)$$

Avec:

- n: coefficient de rugosité de *Manning*.
- c: facteur de conversion des unités (10,29 SI).

Selon l'expression précédente, la perte de charge, en utilisant l'équation de Manning, dépend de la longueur et du diamètre de la conduite, du débit, et du coefficient de la rugosité, Dans ce cas-ci,

une valeur plus élevée de n représente une rugosité interne plus élevée de la conduite. (BELAIB, 2008).

Le tableau 1-2 fournit des valeurs des rugosité pour les matériaux utilisés généralement dans les conduites (BELAIB, 2008).

L'équation (1-19) peut s'écrire aussi sous une autre forme pour exprimer le gradient unitaire ou bien le gradient hydraulique J :

$$J = \frac{10.29.Q^2}{Ks^2 D^{5.33}} \quad (1-20)$$

Avec :

- Q : Débit volume écoulé par la conduite (m<sup>3</sup>/s).
- D : Diamètre de la conduite (m).
- Ks: coefficient de rugosité de *Manning-Strickler*.

$$Ks=1/n \quad (1-21)$$

**Tableau 1.2:** Coefficient de rugosité de Manning pour quelques matériaux de conduites (BELAIB, 2008).

Type de conduite	Coefficient de Manning	Type de conduite	Coefficient de Manning
Amiante ciment	0,011	Acier galvanisé	0,016
Laiton	0,011	Plastique	0,009
Brique	0,015	Acier asphalté	0,010
Fonte	0,012	Acier	0,011
Cuivre	0,011	Bois	0,012
Métal ondulé	0,022		

### 1.3.3 Formule de Williams-Hazen

Une autre expression des pertes de charge fréquemment utilisée, en particulier en *Amérique du Nord*, est la formule de *Hazen-Williams* donnée par :

$$h_L = \frac{C_f \cdot l}{C_{HW}^{1.852} D^{4.87}} D^{1.852} \quad (1-22)$$

Avec :

- $h_L$ : perte de charge due au frottement (m).
- $L$ : Longueur de la conduite (m).
- $C_{HW}$ : coefficient de Hazen-Williams.
- $D$ : diamètre de la conduite (m).
- $Q$  : débit véhiculé par cette conduite (m<sup>3</sup>/s).
- $C_f$ : facteur de conversion d'unité (10.7 SI).

Au lieu d'utiliser un coefficient de frottement comme les autres relations, la formule de *Hazen-Williams* beaucoup utilisée aux USA , elle emploie un facteur de capacité de transport de la conduite ( $C_{HW}$ ), des valeurs de  $C_{HW}$  plus élevées représentent des conduites plus lisses (avec des capacités de charge plus élevées) et les valeurs de  $C_{HW}$  inférieures décrivent des conduites plus rugueuses. (BELAIB, 2008).

Les tableaux 1-3, 1-4 et 1-5 présentent des valeurs de  $C_{HW}$ , pour différents matériaux de conduite.

**Tableau 1.3 :** Coefficient de Hazen Williams, Lamont (1981); (Soutter, 2007).

Type de conduite	$C_{HW}$	Type de conduite	$C_{HW}$
Amiante ciment	<b>140</b>	Béton de pression	140
Fonte neuve	<b>130</b>	Cuivre	130 -140
Fonte vieille (sans enduit)	40 - 120	Boyau à incendie	135
Fonte avec enduit de ciment	130 - 150	PVC	150
Fonte avec bitumineux	140 - 150		

**Tableau 1.4 : Valeurs du Coefficient de Hazen-Williams Adopté de Brière (1997).**

Type de conduite	$C_{HW}$
Amiante ciment	<b>140</b>
Fonte neuve	<b>130-140</b>
Acier, soudé, neuf	120-140
Fonte âgée (10 ans)	110
Fonte âgée (20 ans)	100
Fonte âgée (30 ans)	85
Fonte âgée (40 ans)	75
Fonte âgée (50 ans)	70

**Tableau 1.5 : Valeurs de  $C_{HW}$ , pour différents matériaux de conduite. (Equoition de Hazen-Williams, 2013).**

Type de conduite	Valeurs de ( $C_{HW}$ )
Acier	120
Béton, brique	100
Bois	120
Cuivre	150
Etain	130
Fonte	<b>100</b>
Matière plastique, PVC	150
Plomb	130
Verre	140

**Tableau 1.6 :** Correspondance entre les valeurs de  $C_{HW}$  et  $K_S$  et  $\mathcal{E}$  pour différents matériaux de conduite. (Roland O, 2015).

Matériau	Manning-Strickler	Colebrook et Calmon-Lechapt	Hazen-Williams
	$K_S$	$\mathcal{E}$ (mm)	$C_{HW}$
Chlorure de polyvinyle (PVC) et plastique	120	0	150
Amiante ciment (n'est plus utilisé car (cancérogène))	115	0.025	<b>145</b>
Mortier de ciment centrifugé	110	0.05	140
Métal neuf	105	0.1	130
Béton centrifugé	100	0.25	125
Fonte et acier avec revêtement de ciment	90	0.5	110
Fonte et acier non revêtus (neuf)	80	1	<b>100</b>
Fonte et acier non revêtus (ancien)	75	2	90

Ces tables contiennent des valeurs différentes, ce qui rend difficile le choix de la valeur adéquate du coefficient de *Williams-Hazen* pour établir des calculs voir tableau 1.6.

**Exemple :** dans les tableaux ci-avant les valeurs de  $C_{HW}$  sont :

- Pour l'amiante sont 140 (Tab.1-3 et 1-4) et 145 (Tab 1-6)
- Pour la fonte 130 (Tab.1-3) et de 130 à 140 (Tab 1-4) et 100 (Tab 1-5 et 1-6)

Quelle valeur doit-on prendre pour la fonte ou l'amiante?

Comment le passage a été fait pour trouver la correspondance entre ces trois coefficients ?

### 1.3.4 Formule de Achour –Bedjaoui

Dans le but de faciliter le calcul du coefficient de frottement dans tout le domaine de l'écoulement turbulent en conduite sous pression, *Achour et al. (2002)* proposent de remplacer la formule (1.16) de *Colebrook-white* par la relation approchée suivante :

$$f = \left[ -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{4.5}{R} \log \frac{R}{6.67} \right) \right]^{-2} \quad (1.23)$$

Pour la large gamme de valeurs  $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,05$  de la rugosité relative, les auteurs préconisent l'usage de la formule (1.23) pour les valeurs du nombre de *Reynolds*  $Re$  tel que  $Re \geq 10^4$ .

L'écart maximal observé entre les valeurs de  $f$  calculées selon les relations de *Colebrook-white* et de *Achour* ne dépasse guère 2%.

*Achour et Bedjaoui (2006)* proposent une autre relation très importante pour le calcul du coefficient de frottement qui n'est qu'une solution exacte de la relation de *Colebrook-white* cette relation est donnée sous la forme :

$$f = \left[ -2 \cdot \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{10.04}{\bar{R}} \right) \right]^{-2} \quad (1.24)$$

Cette relation a été testée pour une gamme importante de  $Re \geq 2300$  et  $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,05$ .

Le paramètre  $\bar{R}$  est un nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement dans un modèle rugueux de référence une solution approchée a été établie par *Achour et Bedjaoui (2006)* dont la forme est :

$$\bar{R} = 2R \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.5}{R^{0.9}} \right) \right]^{-1} \quad (1.25)$$

Dans cette gamme de  $R \geq 2300$  et  $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,05$ , l'écart relatif maximal ( $\Delta f/f$ ) max entre les valeurs calculées de  $f$  en application des relations de *Achour-Bedjaoui* et de *Colebrook-white* est de l'ordre de 0,4% et qui est obtenu pour  $Re=2300$  et pour la plus forte rugosité  $\varepsilon/D \leq 0,05$ . (ACHOUR, B .BEDJAOUI, A, 2006.a).

En remplaçant le coefficient de frottement  $f$  de la relation (1-24) dans la relation la relation utilisant la relation de *Darcy-Weisbach* (1.18), *Achour-Bedjaoui* proposent la relation (1.26) pour le calcul du gradient hydraulique, il vient :

$$J = \frac{2Q^2}{\pi^2 g D^5} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{10.04}{\bar{R}} \right) \right]^{-1} \quad (1.26)$$

La relation (1.26) est conseillée pour le calcul du gradient de la perte de charge en régime turbulent rugueux et pour  $Re > 2300$  et  $0 < \varepsilon/D < 0,5$

### 1.3.5 Formule de Swamee et Jain

Etablie en 1976, la formule de Swamee et Jain est destinée au calcul explicite du coefficient de frottement  $f$  de l'écoulement turbulent dans les conduites circulaires sous pression. Cette formule se veut être une solution approchée à la relation implicite (1.16) de *Colebrook-white*. Aucune méthode analytique n'a été proposée par les auteurs pour établir leur relation. Celle-ci a été déterminée après plusieurs tentatives basées sur un calcul laborieux. Selon *Swamee et Jain* (1976), la relation (1.16) de *Colebrook-white* peut être remplacée par la relation approchée suivante :

$$f = \left[ -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{R^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad (1.27)$$

Comme l'indique la relation (1.27), le coefficient de frottement peut être directement calculé à partir des valeurs connues du nombre de *Reynolds*  $R$  et de la rugosité relative  $\varepsilon/D$ .

Cependant, *Swamee et Jain* indiquent que la relation (1.27) doit être appliqué dans les gammes de valeurs  $5.10^3 < R < 10^8$  et  $10^{-6} < \varepsilon/D < 10^{-2}$ . La relation (1.27) est donc restrictive vis-à-vis notamment de la gamme de valeurs admise de la rugosité relative. Celle du nombre de *Reynolds*  $R$  semble suffisante tant elle couvre une large gamme pratique.

## 1.4 Conclusion

Le présent chapitre a eu pour objectif de passer en revue les principales notions sur l'écoulement en charge et d'exposer les principales relations déterminant le gradient hydraulique  $J$  en fonction des paramètres de l'écoulement.

La majorité des relations citées dans ce chapitre sont à caractère empirique où en signalant que certaines d'entre elles ont un aspect itératif notamment la relation la plus universelle celle de *Colebrook-white* exigée lors de l'évaluation du gradient hydraulique  $J$ .

Une meilleure solution est celle de remplacer la relation de *Colebrook-white* par la relation de *Achour-Bedjaoui* 2006 qui est une solution exacte de la relation (1.26).

Le calcul du gradient hydraulique en se basant sur la relation de *Williams-Hazen* présente un avantage dû à son aspect explicite où le coefficient de frottement ne présente aucun obstacle pour le calcul de ce gradient  $J$  mais l'inconvénient de l'utilisation de cette relation est lié au choix du coefficient de  $C_{HW}$  où plusieurs auteurs préconisent des valeurs différentes pour un même matériau.

La relation de *Achour-Bedjaoui* reste une très bonne solution pour l'évaluation du gradient hydraulique car elle est explicite et utilise la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite  $\epsilon$  et elle a été testée pour plusieurs rugosités relatives réelles.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de la possibilité d'exprimer les différents coefficients (*Manning-Strickler*, *Williams-Hazen*) en fonction de la rugosité absolue de la conduite qu'on peut évaluer facilement et avec une grande précision avec un rugosimètre.

# **Chapitre II**

**Relations entre les coefficients de Manning-Strickler ( $K_s$ ), Williams-Hazen ( $C_{HW}$ ) et la rugosité absolue  $\varepsilon$  de la paroi interne d'une conduite circulaire en charge**

## **Chapitre 2**

### **Relations entre les coefficients de Manning-Strickler ( $K_s$ ), Williams-Hazen ( $C_{HW}$ ) et la rugosité absolue $\varepsilon$ de la paroi interne d'une conduite circulaire en charge**

#### **2.1 Introduction**

L'objectif principal du présent chapitre est de présenter les relations possibles entre les coefficients de *Manning-Strickler* ( $K_s$ ), *Williams-Hazen* ( $C_{HW}$ ) et la rugosité absolue  $\varepsilon$  de la paroi interne d'une conduite circulaire en charge.

Notre attention portera essentiellement sur la détermination du gradient hydraulique  $J$  en application des relations exposées au premier chapitre et qui sont la relation de *Darcy*, *Manning-Strickler* et celle de *Williams Hazen*.

Dans un premier temps, une relation donnant le coefficient de *Williams Hazen* ( $C_{HW}$ ) en fonction de la rugosité absolue  $\varepsilon$  sera exposée ultérieurement.

Dans un second temps, une autre expression donnant le coefficient de *Williams-Hazen* ( $C_{HW}$ ) en fonction du coefficient de *Manning-Strickler* ( $K_s$ ) sera déduite et exposée.

Nous terminons par une troisième relation qui liera le coefficient *Manning-Strickler* ( $K_s$ ) à coefficient la rugosité absolue  $\varepsilon$  de la paroi interne de la conduite.

## ***2.2 Expression du coefficient de Williams-Hazen ( $C_{HW}$ ) en fonction de la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite***

L'objectif de proposer une relation donnant le coefficient de Williams-Hazen ( $C_{HW}$ ) en fonction de la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite est de faciliter le calcul de la perte de charge unitaire lors de l'utilisation de la relation de Williams –Hazen (1-1) , car il n'est pas raisonnable de prendre une valeur constante pour ce coefficient en un premier lieu et en un deuxième lieu la difficulté dans le choix de la valeur attribuée à ce coefficient qui peut varier pour un même matériau d'une valeur à une autre ( voir tableau 1-.....).

La relation de *Williams-Hazen* donne le gradient hydraulique en fonction des paramètres régissant un écoulement et qui sont le débit volume  $Q$  ( $m^3/s$ ), le diamètre  $D$  (m) de la conduite, et un coefficient appelé coefficient de Williams-Hazen ( $C_{HW}$ ), s'exprime par :

$$J = \frac{C_f \cdot l}{C_{HW}^{1,852} D^{4,87}} Q^{1,852} \quad (2.1)$$

Avec :

$J$  : Gradient hydraulique.

$Q$  : Débit volume ( $m^3/s$ ).

$D$  : Diamètre (m) de la conduite.

$C_{HW}$  : Coefficient appelé coefficient de Williams-Hazen.

Selon *Achour –Bedjaoui (2006)* le gradient hydraulique peut être représenté par la relation (2.2) qui associe le gradient hydraulique aux paramètres de l'écoulement et qui le débit volume  $Q$  ( $m^3/s$ ), le diamètre  $D$  (m) de la conduite et la rugosité absolue  $\varepsilon$  de la paroi interne de la conduite ainsi qu'un paramètre représentant le nombre de *Reynolds* de la conduite de référence cette relation s'exprime par :

$$J = \frac{2Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10,04}{R} \right) \right]^{-2} \quad (2.2)$$

Avec :

$J$  : Gradient hydraulique.

$Q$  : Débit volume ( $m^3/s$ ).

**Chapitre II : Relations entre les coefficients de Manning-Strickler (Ks), Williams-Hazen (C<sub>HW</sub>) et la rugosité absolue ε de la paroi interne d'une conduite circulaire en charge**

---

$D$  : Diamètre (m) de la conduite.

$\mathcal{E}$  : La rugosité absolue de la paroi interne de la conduite(m).

$\bar{R}$  : Nombre de *Reynolds* de la conduite de référence donné par :

$$\bar{R} = 2R \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5,5}{R^{0,9}} \right) \right]^{-1} \quad (2.3)$$

Où  $R$  désigne le nombre de Reynolds défini par :

$$R_e = \frac{4Q}{\pi \cdot D \cdot v} \quad (2.4)$$

Faisons l'égalité des deux relations (2.1) et (2.2) il en suit que :

$$\left( \frac{3,592}{C_{WH}} \right)^{1.852} \frac{Q^{1.852}}{D^{4.87}} = \frac{2Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right]^{-2}$$

Ce qui donne :

$$\left( \frac{3,592}{C_{WH}} \right)^{1.852} = \frac{2Q^2 \cdot D^{4.87}}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5 \cdot Q^{1.852}} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right]^{-2}$$

$$\left( \frac{3,592}{C_{WH}} \right)^{1.852} = \frac{2Q^{0.148} \cdot D^{-0.13}}{\pi^2 \cdot g} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right]^{-2}$$

$$C_{WH}^{1.852} = \frac{3,592^{1.852} \cdot \pi^2 \cdot g}{2} \cdot Q^{-0.148} \cdot D^{0.13} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right]^2$$

$$C_{WH} = \left[ \left( \frac{3,592^{1.852} \cdot \pi^2 \cdot g}{2} \right) \cdot Q^{-0.148} \cdot D^{0.13} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right]^2 \right]^{1/1.852}$$

Après simplification le coefficient de *Williams –Hazen* peut se représenter par la relation suivante :

$$C_{WH} = 29,16 \cdot Q^{-0,08} \cdot D^{0,07} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right]^{1,08} \quad (2.5)$$

La relation (2.5) donne le coefficient de *Williams –Hazen* C<sub>HW</sub> en fonction de la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite ε , le débit véhiculé par la conduite Q , le diamètre géométrique de la conduite D et le nombre de Reynolds de la conduite de référence  $\bar{R}$  .

La relation (2.5) sera utilisée pour évaluer en un premier temps le coefficient de *Williams –Hazen* loin des valeurs théoriques proposées par les tables et tableaux et en un deuxième lieu pour l'évaluation exacte du gradient hydraulique par le biais de la relation (2.1).

### 2.3 Exemple d'application

*Soit à calculer le gradient hydraulique  $J$  et la perte de charge totale dans une conduite circulaire en charge de diamètre interne  $D=1m$  et de longueur  $L=10000 m$ , caractérisée par une rugosité absolue de la paroi interne de la conduite est  $\varepsilon=0,1mm$  écoulant un débit volume  $Q=0,509 m^3/s$  d'un liquide de viscosité cinématique  $\nu=10^{-6} m^2/s$  sous un gradient de la perte de charge linéaire  $J$  ?*

#### **Solution :**

1- L'expression du gradient est donnée par la relation de *Williams–Hazen* (2.1) :

$$J = \left( \frac{3,592}{C_{WH}} \right)^{1,852} \frac{Q^{1,852}}{D^{4,87}} \quad (2.6)$$

Pour une conduite en **fonte** la valeur préconisée pour le coefficient de *Williams Hazen* est de **130** (Voir Tableau 1-4 et Tableau 1.4). *Lamont (1981)*, donc pour les données de l'exemple il vient que :

$$J = \left( \frac{3,592}{130} \right)^{1,852} \frac{0,509^{1,852}}{1^{4,87}} = 0.00037169$$

Une vérification de la valeur obtenue du gradient hydraulique peut se faire en application de la relation de *Achour-Bedjaoui* (2.2), C'est à dire, pour les valeurs de  $Q$ ,  $D$  et  $\varepsilon$  citées dans l'exemple d'application il l vient que :

**Chapitre II : Relations entre les coefficients de Manning-Strickler (Ks), Williams-Hazen (C<sub>HW</sub>) et la rugosité absolue ε de la paroi interne d'une conduite circulaire en charge**

---

Pour  $R_e = \frac{4 \times 0,509}{3,14 \times 1 \times 10^{-6}} = 648407,64$ , le nombre de Reynolds de la conduite de référence (2.3)

sera :

$$\bar{R} = 2R \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,5}{R^{0,9}} \right) \right]^{-1} = 306683,562$$

D'où le gradient hydraulique J conformément à la relation (2.2) sera :

$$J = \frac{2Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right]^{-2} = 0,0003$$

Nous observons un écart de  $(0,0003 - 0,00037169) / 0,00037169 = 19,29\%$  sur le calcul du gradient hydraulique en utilisant les deux relations (2.1) et (2.2) et nous pensons que cela est due au mauvais choix de la valeur du coefficient de *Williams-Hazen* en se référant aux tables et tableaux.

Donc la question qu'on pose est la suivante :

***Quelle est la valeur du coefficient de Williams-Hazen équivalente à la rugosité de la paroi interne de cette conduite en fonte de 0.1 mm ?***

Avant de répondre à cette question, proposons-nous d'évaluer ce coefficient de Williams - Hazen en fonction de la rugosité absolue de la paroi interne de cette conduite en application de la relation (2.5), c'est-à-dire :

Pour  $\bar{R} = 306683,562$ ,  $Q = 0,509 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $D = 1 \text{ m}$ ,  $\varepsilon = 0,1 \text{ mm}$  il vient que :

$$C_{WH} = 29,16 \times 0,509^{-0,08} \cdot 1^{0,07} \left[ -\log \left( \frac{0,0001}{3,7 \times 1} + \frac{10,04}{306683,562} \right) \right]^{1,08} = 145,87 = 146$$

Cette valeur est différente de celle préconisée par les tables qui est de 130.

***Quelle sera la valeur du gradient hydraulique après évaluation du coefficient de Williams Hazen (nouvelle valeur) obtenue par l'utilisation de la relation (2.5) ?***

Le gradient hydraulique est calculé conformément à la relation de *Williams -Hazen* (2.1), ce qui nous donne :

$$J = \left(\frac{3,592}{146}\right)^{1,852} \frac{0,509^{1,852}}{1^{4,87}} = 0.0003$$

C'est la même valeur obtenue en application de la relation de *Achour-Bedjaoui*, c'est-à-dire  $J=0,0003$ , d'où l'importance de l'utilisation de la relation proposée (2.5).

Une autre vérification est possible est celle obtenue en utilisant la relation de *Darcy-Weisbach*, donnant le gradient hydraulique  $J$  et utilisant la relation de *Colebrook-white* pour l'évaluation du coefficient de frottement malgré qu'on lui reproche son aspect itératif.

Pour les mêmes données de l'exemple (2-3) est qui sont :  $Q = 0.509 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $D = 1 \text{ m}$ ,  $R = 648407,64$ ,  $\varepsilon = 0.1 \text{ mm}$  il vient que :

$$f = \left[ -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{R\sqrt{f}} \right) \right]^{-2} = 0,01399987 = 0.014$$

$$\text{Et : } J = \frac{8fQ^2}{\pi^2 g D^5} = 0,0003$$

Vérification faite.

Pour le calcul de la perte de charge totale sur les 10000 mètres et en négligeant les pertes de charge singulières il en suit que :

- Pour le cas où  $C_{HW} = 146$  obtenu en application de la relation (2.5)

$$\Delta Ht = JL = \frac{8fQ^2}{\pi^2 g D^5} L = 0,0003 * 10000 = 3,0 \text{ m.c.e}$$

- Pour le cas où  $C_{HW} = 130$  relevé des tables, cette perte de charge devient :  $\Delta Ht = JL = \frac{8fQ^2}{\pi^2 g D^5} L = 0,00047 * 10000 = 4,7 \text{ m.c.e}$

Donc , nous avons une différence de 1,7 m sur le calcul de la perte de charge totale qui est importante pour la conception des ouvrages de stockages par exemple lors du calcul de la cote radier d'un réservoir.

Selon les résultats obtenus il est fortement conseillé d'utiliser la relation (2.5) pour évaluer le coefficient de *Williams-Hazen* en fonction du diamètre de la conduite et le débit véhiculé par cette dernière ainsi que la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite.

## **2.4 Expression de la relation du coefficient de Williams-Hazen ( $C_{HW}$ ) en fonction du coefficient de Manning-Strickler ( $K_s$ )**

Dans ce présent cas il s'agit de proposer une autre relation exprimant le coefficient de Williams-Hazen ( $C_{HW}$ ) en fonction du coefficient de Manning-Strickler ( $K_s$ ), car il n'est pas raisonnable de prendre une valeur constante pour ce coefficient tout en rappelant que le coefficient de Manning-Strickler n'est pas constant pour un même matériau si le diamètre change (cas des réseaux de distribution) car ce coefficient est fonction du rayon hydraulique qui change avec la hauteur de remplissage.

Rappelons également que La relation de *Williams-Hazen* (2.1) donne le gradient hydraulique en fonction des paramètres régissant un écoulement et qui sont le débit volume  $Q$  ( $m^3/s$ ), le diamètre  $D$  (m) de la conduite, et un coefficient appelé coefficient de Williams-Hazen ( $C_{HW}$ ), s'exprime par :

$$J = \frac{C_f \cdot l}{C_{HW}^{1,852} D^{4,87}} Q^{1,852} \quad (2.7)$$

Avec :

$J$  : Gradient hydraulique.

$Q$  : Débit volume ( $m^3/s$ ).

$D$  : Diamètre (m) de la conduite.

$C_{HW}$  : Coefficient appelé coefficient de *Williams-Hazen*.

Selon *Manning-Strickler* le gradient hydraulique s'exprime par :

$$J = \frac{10,29 \cdot Q^2}{K_s^2 D^{5,33}} \quad (2.8a)$$

Egalisons les relations (2.8a) et (2.7), il en suit que :

$$\left(\frac{3,592}{C_{WH}}\right)^{1,852} \frac{Q^{1,852}}{D^{4,87}} = \frac{10,29 \cdot Q^2}{K_S^2 \cdot D^{5,33}}$$

$$\left(\frac{3,592}{C_{WH}}\right)^{1,852} = \frac{10,29 \cdot Q^{0,148}}{K_S^2 \cdot D^{0,46}}$$

$$\left(\frac{3,592}{C_{WH}}\right) = \left(\frac{3,592^{1,852} \cdot K_S^2 \cdot D^{0,46}}{10,29 \cdot Q^{0,148}}\right)^{1/1,852}$$

D'où le coefficient de Williams-Hazen sera exprimé par :

$$C_{WH} = 1,02 \cdot K_S^{1,08} \cdot D^{0,23} \cdot Q^{-0,08} \quad (2.8b)$$

Ainsi, la relation (2.8b) permet de calculer le coefficient de *Williams-Hazen*  $C_{WH}$  en fonction du coefficient de *Manning Strickler* ( $K_s$ ) ou inversement.

## 2.5 Exemple d'application

Reprenons l'énoncé de l'application précédente et pour les données :  $D=1m$  ,  $L=10000 m$  ,  $\varepsilon=0,1mm$  ,  $Q=0,509 m^3/s$  ,  $v=10^{-6} m^2/s$ .

Calculez :

- Le gradient de la perte de charge unitaire ?
- La perte de charge Totale sur 10000 m de longueur ?

### Solution

L'expression du gradient est donnée par la relation de *Williams-Hazen* (2.1) :

$$J = \left(\frac{3,592}{C_{WH}}\right)^{1,852} \frac{Q^{1,852}}{D^{4,87}}$$

Ce qui donne pour un coefficient de Williams-Hazen de l'ordre de 146 (cas de la fonte neuve) un gradient de 0,0003.

Pour le même matériau de la conduite (fonte) le coefficient de Manning-Strickler varie de 80 à 85 (selon Régis Bourrier.1977), donc le gradient hydraulique selon la relation de *Manning-Strickler* est :

$$Q = K_s \cdot R^{2/3} \cdot J^{0,5} \cdot S \quad (2.9)$$

**Chapitre II : Relations entre les coefficients de Manning-Strickler ( $K_s$ ), Williams-Hazen ( $C_{WH}$ ) et la rugosité absolue  $\varepsilon$  de la paroi interne d'une conduite circulaire en charge**

---

Le gradient hydraulique sera :

$$J = \frac{Q^2}{K_s^2 \cdot R^{4/3} \cdot S^2} \quad (2.10)$$

En substituant  $S = \pi D^2/4$  et  $R=D/4$  dans la relation (2.10) il vient que :

$$J = \frac{Q^2}{K_s^2 \cdot R^{2/3} \cdot S} = \frac{16Q^2}{K_s^2 \cdot \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} \cdot \pi^2 D^4} = \frac{10,29 \cdot Q^2}{K_s^2 \cdot D^{5,33}}$$

Donc l'expression donnant le gradient hydraulique en faisant intervenir le coefficient de *Manning-Strickler* est :

$$J = \frac{10,29 \cdot Q^2}{K_s^2 \cdot D^{5,33}} \quad (2.11)$$

Pour les données  $Q=0.509$  m<sup>3</sup>/s,  $D = 1$  m ,  $\nu = 0.000001$  m<sup>2</sup>/s et  $K_s = 80$  m<sup>1/3</sup>·s<sup>-1</sup>, le gradient hydraulique sera :

$$J = 0,00041655$$

Nous observons que cette valeur est différente à celle obtenue en application de la relation de *Williams-Hazen* ( $J=0,0003$ ) avec un écart de 28 % ce qui influe sur le calcul de la perte de charge totale.

Pour corriger cette anomalie calculons le coefficient de *Manning-Strickler* en fonction du coefficient de *Williams-Hazen* obtenu selon la relation (2.8), ce qui nous donne :

$$C_{WH} = 1,02 \cdot K_s^{1,08} \cdot D^{0,23} \cdot Q^{-0,08} \rightarrow K_s = \left( \frac{C_{WH}}{1,02 \cdot D^{0,23} \cdot Q^{-0,08}} \right)^{1/1,08} \quad (2.9)$$

$$D'où : K_s = 94 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$$

Alors avec la nouvelle valeur de  $K_s=94$ , calculons le gradient de la perte de charge  $J$  en application de la relation de *Manning-Strickler* Pour les données  $Q=0.509$  m<sup>3</sup>/s,  $D = 1$  m,  $\nu = 0.000001$  m<sup>2</sup>/s

$$J = \frac{10,29 \cdot Q^2}{K_s^2 \cdot D^{5,33}} = 0,0003005$$

Valeur très proche de celle obtenue précédemment

Pour le calcul de la perte de charge totale on obtient :

- Pour le cas où  $K_s = 80$  (relevé des tables), cette perte de charge devient :  
 $\Delta H_t = J L = 4,16 \text{ m.c.e}$
- Pour le cas où  $K_s = 94$  obtenu en application de la relation (2.9) :  
 $\Delta H_t = J L = 3,0 \text{ m.c.e}$

Donc, nous avons une différence de 1,16 m sur le calcul de la perte de charge totale qui est importante.

## 2.6 Expression de la relation coefficient Manning-Strickler ( $K_s$ ) en fonction de de la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite $\varepsilon$

Dans ce présent cas il s'agit de proposer une relation donnant le coefficient de *Manning-Strickler* ( $K_s$ ) en fonction en fonction de la rugosité absolue de la paroi interne de la Conduite  $\varepsilon$ , car cela semble plus judicieux d'évaluer ce coefficient en fonction de la rugosité absolue de la conduite puisque cette dernière se mesure directement par un rugosimètre.

Rappelons également que La relation de *Manning-Strickler* (2-11) donnant le débit en fonction volume gradient hydraulique  $J$ , le diamètre  $D$  (m) de la conduite, et un coefficient appelé coefficient de *Manning-Strickler* ( $K_s$ ), et s'exprimant par :

$$Q = K_s \cdot R^{2/3} \cdot J^{0.5} \cdot S \quad (2.12)$$

De la relation (2.12), le gradient hydraulique s'exprime par :

$$J = \frac{10.29 \cdot Q^2}{K_s^2 D^{5.33}} \quad (2.13)$$

D'autre part et selon *Achour –Bedjaoui* le gradient hydraulique est :

$$J = \frac{2Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10,04}{R} \right) \right]^{-2} \quad (2.14)$$

Avec :

$$\bar{R} = 2R \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.5}{R^{0.9}} \right) \right]^{-1} \quad (2.15)$$

$R$  désigne le nombre de *Reynolds* défini par :

$$R_e = \frac{4Q}{\pi \cdot D \cdot v} \quad (2.16)$$

En égalisant les deux relations (2.13) et (2.14) il vint que :

$$\frac{10.29 \cdot Q^2}{K_s^2 D^{5.33}} = \frac{2Q^2}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10.04}{\bar{R}} \right) \right]^{-2}$$

$$\rightarrow K_s = \sqrt{\frac{10.29 \cdot \pi^2 \cdot g}{D^{5.33}} \left( -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10.04}{\bar{R}} \right) \right)^2}$$

En fin on obtient :

$$K_s = \frac{31.55}{D^{0.165}} \left( -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10.04}{\bar{R}} \right) \right) \quad (2.17)$$

Comme elle peut s'écrire sous cette forme :

$$K_s = 22.3078 \cdot D^{-0.165} \left( -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10.04}{\bar{R}} \right) \right) \quad (2.18)$$

Ainsi La relation (2.18) représente la relation qui donne le coefficient de *Manning-Strickler* en fonction de la rugosité absolue de la conduite en régime turbulent.

## 2.7 Exemples d'application

*Reprenons l'énoncé de l'application précédente et pour les données :  $D=1m$ ,  $L=10000 m$ , Conduite en fonte ( $\varepsilon=0,1mm$  et  $K_s= 80 m^{1/3} \cdot s^{-1}$ ),  $Q=0,509 m^3/s$ ,  $v=10^{-6} m^2/s$ .*

Calculez :

- *Le gradient de la perte de charge unitaire ?*
- *La perte de charge Totale sur 10000 m de longueur ?*

**Solution :**

Selon la relation de *Manning-Strickler* (2.13), l'expression du gradient est donnée par :

$$J = \frac{10.29.Q^2}{K_S^2 D^{5,33}}$$

Pour les données mentionnées ci-avant, le gradient hydraulique est :  $J = 0,00041655$

D'autre part ce même gradient est de 0.0003 en application des relations de *Darcy* ou bien celle de *Achour-Bedjaoui* (voir l'application 2-5) ce qui présente une erreur de 38.85% sur le calcul de J.

Pour résoudre ce problème il est préférable d'évaluer le coefficient de *Manning-Strickler* en fonction de la relation (2.18) et de refaire le calcul du gradient hydraulique J avec la nouvelle valeur de  $K_s$ .

En application de la relation (2.18) le coefficient de *Manning-Strickler* est :

$$K_S = 22,3078 . D^{-0.165} \left( -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10,04}{R} \right) \right) = 93.51 \text{ qui diffère de celle des tables } 80.$$

D'où la nouvelle valeur du gradient hydraulique est :

Selon Manning -Strickler:  $J = \frac{10.29.Q^2}{K_S^2 D^{5,33}} = 0,00030488$  ce qui présente un écart de 1.63 % et non pas 38.85%.

Pour le calcul de la perte de charge totale on obtient :

- Pour le cas où  $K_s = 80$  (relevée des tables), cette perte de charge devient :  
 $\Delta Ht = JL = 4,16 \text{ m.c.e}$
- Pour le cas où  $K_s = 93.51$  obtenu en application de la relation (2.9) :  $\Delta Ht = JL = 3,04 \text{ m.c.e}$

Donc, nous avons une différence de 1,12 m sur le calcul de la perte de charge totale qui est importante.

## **2.8 Vérification des différents coefficients Williams-Hazen, Manning-Strickler par des données expérimental**

### ***a) Evaluation des gradients sans correction des Coefficients de Williams-Hazen et de Manning-Strickler***

Le présent paragraphe consiste à vérifier les relations proposées par voie expérimentale (en fonction des données expérimentales pour quatre conduites en Plexiglas, Aluminium, Acier galvanisé et en PVC).

Pour chaque Conduite on dispose des données suivantes :

- Le diamètre  $D$  de la Conduite.
- Le débit (variable) véhiculé par cette Conduite.
- Le gradient Hydraulique (experimental).
- Le travail consiste en.

Il s'agit bien des valeurs reportées dans les tableaux 2.1.

**Tableau 2.1 : Conduites testées lors des essais expérimentaux.**

$N^{\circ}$	Diamètre $D$ (mm)	Nature de la Conduite	Débit $Q$ (l/s)	Rugosité absolue $\varepsilon$ (mm)	Coef. Manning-Strickler $K_s$	Coef. Willimas-Hazen $C_{HW}$	Régime observé
01	69/ 80	Plexiglas	$3.73 \leq Q \leq 22.63$	0.1	100	140	Pratique ment lisse
02	49/50	Acier Galvanisé	$1.72 \leq Q \leq 7,77$	0.1	100	120	turbulent rugueux
03	124/130	PVC	$19.55 \leq Q \leq 40.69$	0.1	150	120	Turbulent rugueux
04	130/140	PVC	$13.78 \leq Q \leq 43.95$	0.1	150	120	Transition

**Chapitre II : Relations entre les coefficients de Manning-Strickler ( $K_s$ ), Williams-Hazen ( $C_{HW}$ ) et la rugosité absolue  $\varepsilon$  de la paroi interne d'une conduite circulaire en charge**

---

Le travail consiste à déterminer le gradient hydraulique sera calculé pour chaque diamètre et pour les valeurs connues du diamètre  $D$ , du débit volume  $Q$ , la rugosité de la conduite et la viscosité cinématique du liquide (eau), le coefficient de frottement  $f$  et cela par quatre relations celles de *Darcy*, La relation de *Williams-Hazen*, La relation de *Manning-Strickler* et de *Achour-Bedjaoui*.

Rappelons que les relations utilisées pour la comparaison des gradients sont :

**1- Relation de Darcy**

$$J = \frac{8 f Q^2}{g \pi^2 D^2} \quad (2.20)$$

Le coefficient de frottement sera calculé par la relation de Colebrook-white.

$$f = \left[ -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{R \sqrt{f}} \right) \right]^{-2}$$

**2- La relation de Williams-Hazen**

$$J = 10,675 \left( \frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1.852} \frac{1}{D^{4.87}} \quad (2.21)$$

**3- La relation de Achour-Bedjaoui**

$$J = \frac{Q^2}{2\pi^2 D^5} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right]^{-2} \quad (2.22)$$

Pour le coefficient de frottement et le nombre de Reynolds on utilise les relations (2.23) et (2.24)

$$f = \left[ -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right]^{-2} \quad (2.23)$$

$$\bar{R} = 2R \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.5}{R^{0.9}} \right) \right]^{-1} \quad (2.24)$$

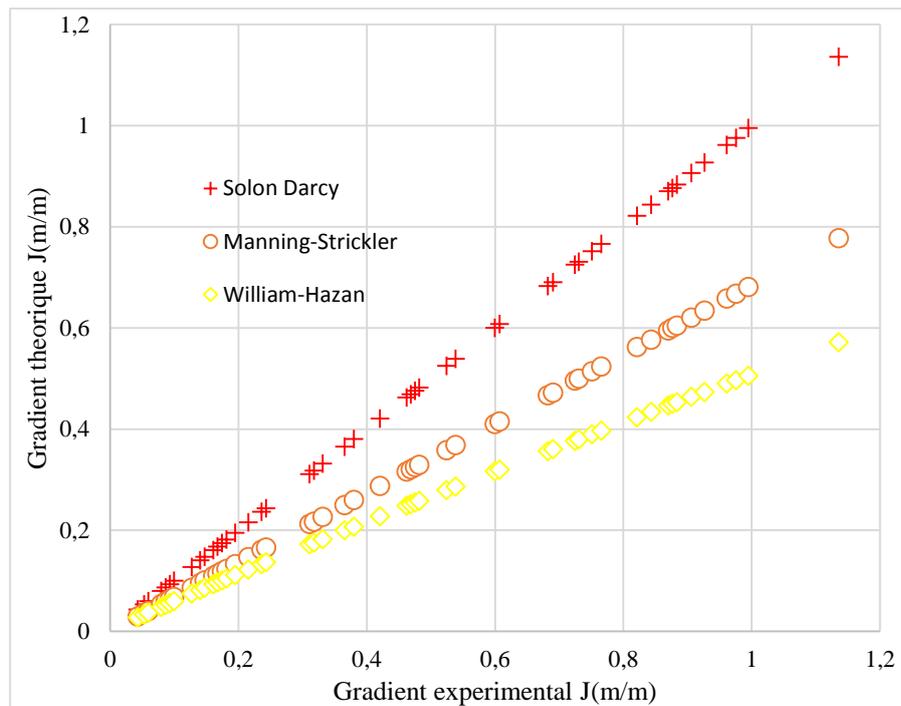
**4- La relation de Manning-Strickler**

$$J = \frac{10.29.Q^2}{K_s^2 D^{5.33}} \quad (2.25)$$

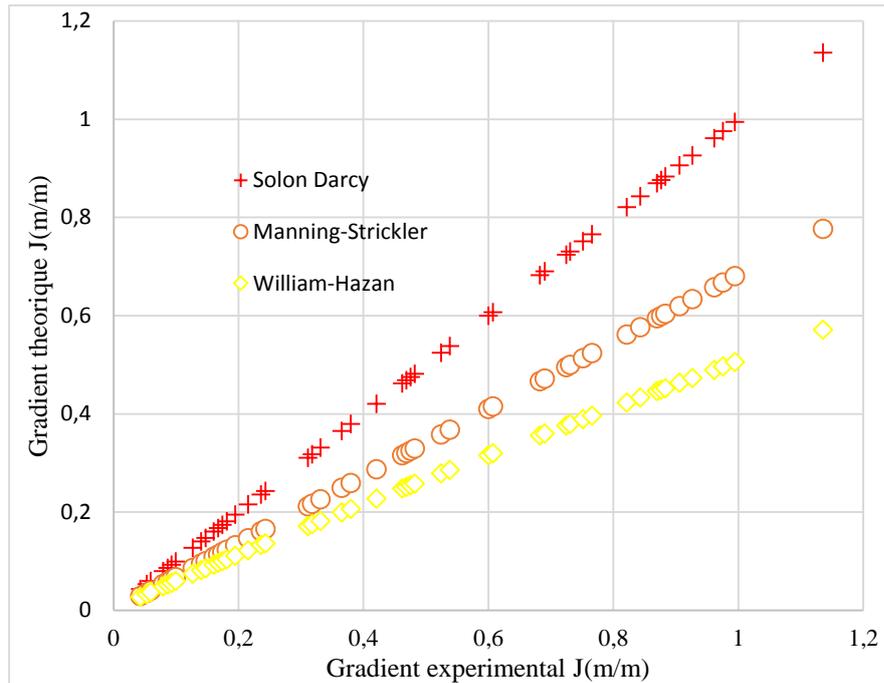
Les résultats de calcul sont portés dans les tableaux 2.2, 2.3, 2.4 et 2.5

La représentation graphique de ces valeurs reportées dans les tableaux ci-avant montre un écart important sur le calcul du gradient hydraulique en se référant aux valeurs expérimentales et aux valeurs obtenues en application de la relation de Darcy comme le montre les figures 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4.

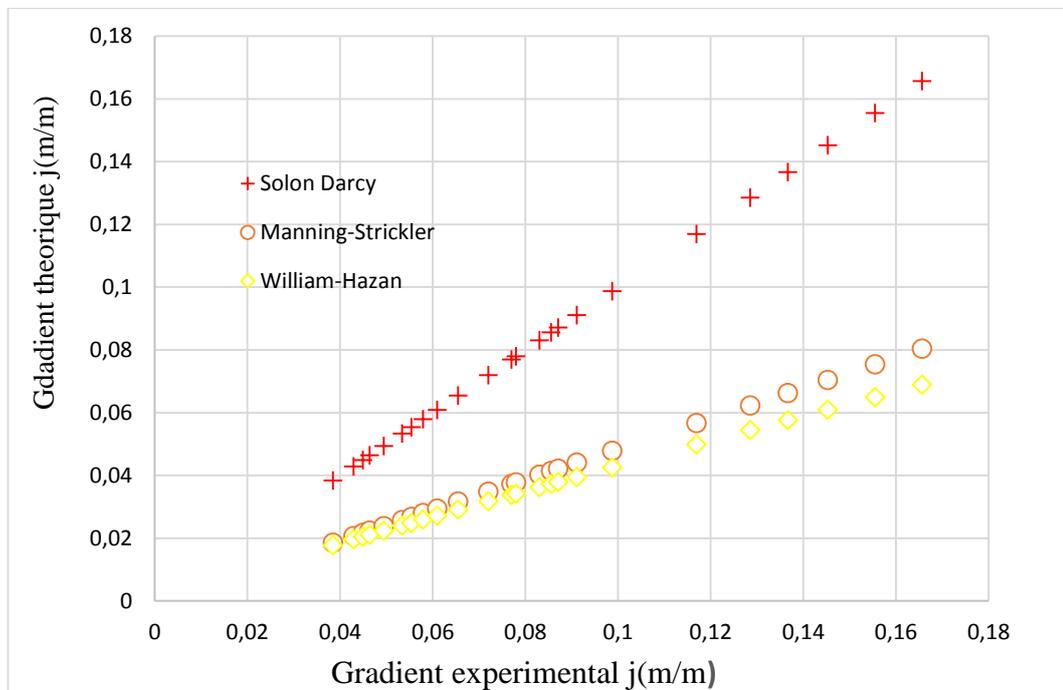
Cet écart est dû principalement à un mauvais choix des coefficients de *Williams-Hazen*, de *Manning-Strickler* en fonction de la rugosité absolue de la conduite (voir tableau 2.6).



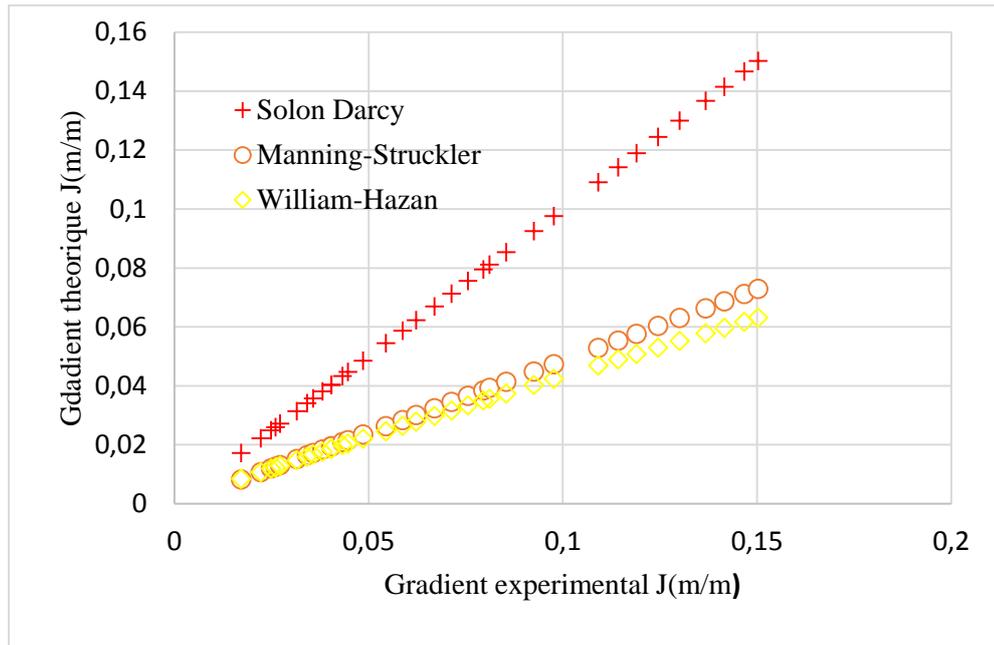
**Figure 2.1 : Détermination du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazen (2.21) et Manning-Strickler (2.25)  
Pour  $D=69/80$  mm en Plexiglas Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_s=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ ).**



**Figure 2.2 :** valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25)  
 Pour  $D=49/50$  mm en Acier Galvanisé, Avec ( $C_{HW}=120$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ ).



**Figure 2.3 :** Détermination du gradient hydraulique de  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25)  
 $D=124/130$  mm en PVC, Avec ( $C_{HW}=150$ ,  $K_S=120$ ,  $\varepsilon=0,001$ ).



**Figure 2.4 :** Détermination du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour  $D=130/140$  mm en PVC, Avec ( $C_{HW}=150$ ,  $K_s=120$ ,  $\varepsilon=0,001$ ).

Les écarts maximaux (13.39 à 51.94) % sur le calcul de  $J$  en se référant à la relation de Darcy (comme référence) sont portés dans le tableau 2.7, 2.8, 2.9 et 2.10.

**Tableau 2.6 :** Ecarts max sur le calcul du gradient hydraulique  $J$ .

N°	Diamètre $D$ (mm)	Nature de la Conduite	Relations	Ecarts Maximum %
01	69/ 80	Plexiglas	Darcy-Manning-Strickler	30.91
			Darcy – Williams-Hazen	61.31
02	49/50	Acier Galvanisé	Darcy-Manning-Strickler	32.50
			Darcy – Williams-Hazen	49.67
03	124/130	PVC	Darcy-Manning-Strickler	51.72
			Darcy – Williams-Hazen	58.41
04	130/140	PVC	Darcy-Manning-Strickler	<b>51.94</b>
			Darcy – Williams-Hazen	57.98

**b) Evaluation des gradients après correction des Coefficients de Williams-Hazen et de Manning-Strickler**

La correction des valeurs des gradients hydrauliques est faite en se référant aux relations proposées (2.5) et (2.8) qui concernent les coefficients de *Manning-Strickler* et de *Williams-Hazen* et qui sont :

$$C_{WH} = 29,16. Q^{-0,08} . D^{0,07} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right]^{1,08} \quad (2.26)$$

$$K_S = 22,3078. D^{-0,165} \left( -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right) \quad (2.27)$$

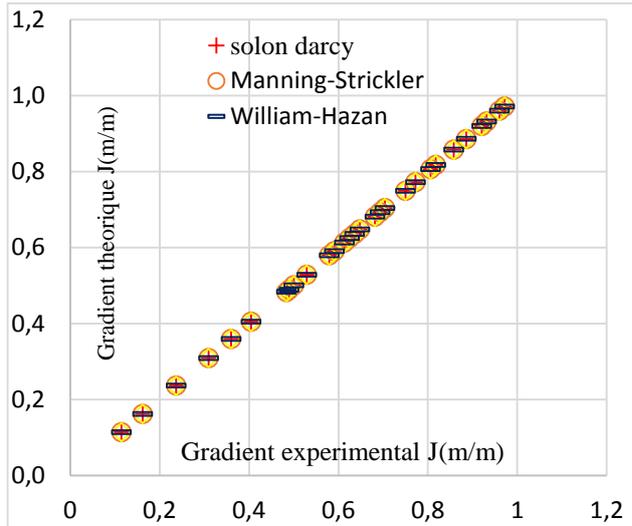
Le tableau 2.11 représente les nouvelles valeurs des coefficients de *Manning-Strickler* et de *Williams-Hazen* après correction en fonction de la rugosité des conduites testées.

**Tableau 2.11** : Correction des coefficients de Manning-Strickler et de Williams-Hazen selon (2.26) et (2.27).

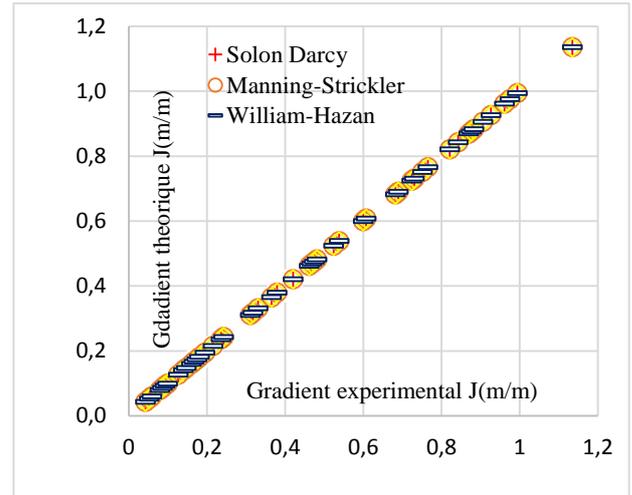
N°	Diamètre D (mm)	Nature de la Conduite	Rugosité absolue $\varepsilon$ (mm)	Coef. Avant correction		Coef Après correction	
				Manning- Strickler $K_s$	Willimas- Hazen $C_{HW}$	Manning- Strickler $K_s$	Willimas- Hazen $C_{HW}$
01	69/ 80	Plexiglas	0.1	100	140	83	85-92
02	49/50	Acier Galvanisé	0.1	100	120	83	83-94
03	124/130	PVC	0.1	150	120	83.5	93-99
04	130/140	PVC	0.1	150	120	83.5	94-102

Les gradients corrigés sont portés dans les tableaux 2.12, 2.13, 2.14 et 2.15 et ces valeurs sont représentées graphiquement par les figures 2.5, 2.6, 2.7 et 2.8 pour l'ensemble des conduites testées.

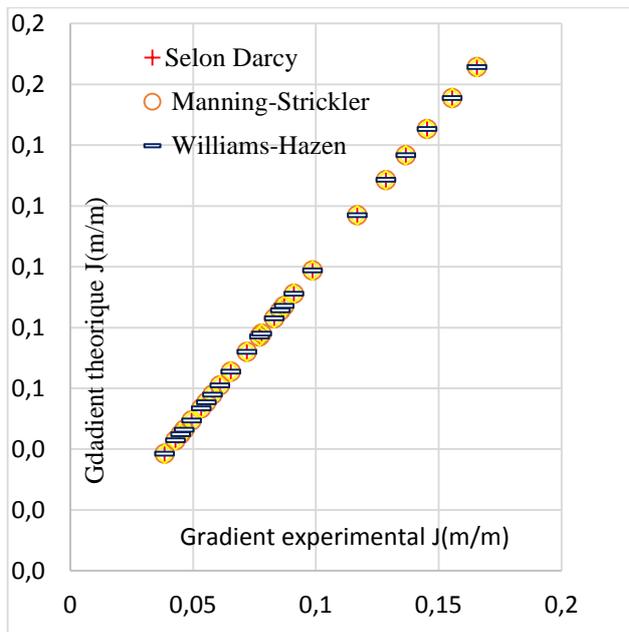
**Chapitre II : Relations entre les coefficients de Manning-Strickler ( $K_s$ ), Williams-Hazen ( $C_{HW}$ ) et la rugosité absolue  $\epsilon$  de la paroi interne d'une conduite circulaire en charge**



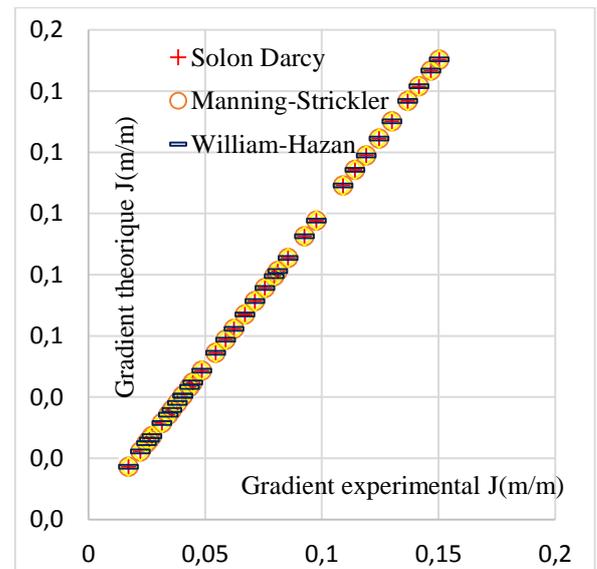
**Figure 2.5 :** Détermination du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25), Avec ( $C_{HW}$  et  $K_s$  Corrigés) Pour  $D=69/80$  mm en Plexiglas.



**Figure 2.6 :** Détermination du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25), Avec ( $C_{HW}$  et  $K_s$  Corrigés) Pour  $D=49/50$  mm en Acier Galvanisé.



**Figure 2.7 :** Détermination du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25), Avec ( $C_{HW}$  et  $K_s$  Corrigés) Pour  $D=124/130$  mm en PVC.



**Figure 2.8 :** Determination du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25), Avec ( $C_{HW}$  et  $K_s$  Corrigés) Pour  $D=130/140$  mm en PVC.

Les droites obtenues sont des droites confondues ou pratiquement superposées après correction des coefficients de *Williams-Hazen*  $C_{HW}$  et de *Manning-Strickler*  $K_s$ , ce la prouve l'importance des

relations utilisées pour cette correction comme on observe que les écarts sont réduits sont les valeurs des gradients quelque soit la relation utilisée, de plus les valeurs proposées (Théoriques) pour les coefficients différent des valeurs trouvées.

Nous recommandons d'utiliser les relations (2.26) et (2.27) pour corriger ces coefficients en fonction de diamètre, débit et du coefficient de la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite.

## **2-9 Conclusion**

Le présent chapitre a été consacré à la proposition d'une correction des coefficients de *Manning-Strickler* et de *Williams-Hazen* et qui sont utilisés pour le calcul du gradient hydraulique.

Les relations proposées (2.5), (2.8) et (2.18) donnent ces coefficients en fonction de la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite qui est facilement estimée que les coefficients étudiés.

Une vérification de la fiabilité des relations proposées a été faite en calculant le gradient hydraulique avant et après la correction sur des conduites testées au laboratoire et nous avons trouvé qu'avant la correction des écarts sur les valeurs des gradients hydrauliques dépassant les 61 % par rapport à la relation de *Darcy* où le coefficient de frottement a été calculé selon la relation de *Colebrook-white*, ces écarts sont réduits à zéro après la correction des coefficients.

Les relations proposées expriment les coefficients de *Manning-Strickler* ( $K_s$ ) et de *Williams-Hazen* ( $C_{HW}$ ) en fonction du diamètre géométrique de la conduite, le débit véhiculé et la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite sous la forme :

$$C_{WH} = 29,16 \cdot Q^{-0,08} \cdot D^{0,07} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{10,04}{R} \right) \right]^{1,08}$$

$$C_{WH} = 1,02 \cdot K_s^{1,08} \cdot D^{0,23} \cdot Q^{-0,08}$$

$$K_s = 22,3078 \cdot D^{-0,165} \left( -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{10,04}{R} \right) \right)$$

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

Cette étude s'intéresse à la résolution d'un problème relatif au calcul du gradient de la perte de charge  $J$ , qui sera utilisé pour l'évaluation de la perte de charge linéaire dans les installations hydrauliques (réseaux, conduite de refoulement, conduite de distribution principale ou de transfert).

Il existe plusieurs relations pour le calcul du gradient unitaire selon la bibliographie on en cite la relation la plus universelle et ancienne celle de *Darcy-Weisbach (1889)* généralement associée à la relation de *Colebrook-white (1939)* où on reproche à cette dernière son aspect implicite et itératif.

Une autre relation intéressante et qui ne fait pas intervenir le coefficient de frottement pour le calcul du gradient hydraulique est celle de *Manning-Strickler (1880)* mais uniquement en fonction du diamètre géométrique  $D$  (m), du débit volume  $Q$  ( $m^3/s$ ) et d'un coefficient souvent constant appelé coefficient de *Manning-Strickler*  $K_s$  ( $m \cdot s^{-1/3}$ ) pour l'expression de coefficient de frottement. D'autres chercheurs ont essayé de donner des relations explicites et simples pour l'évaluation du gradient hydraulique faisant appel à d'autres coefficients comme la relation de *Williams-Hazen* où on trouve un nouveau coefficient adimensionnel appelé coefficient de *Williams-Hazen* généralement constant et fonction de la nature de la conduite.

Vu la difficulté rencontrée lors du choix des coefficients de *Manning-Strickler* ou de *Williams-Hazen*, *Achour-Bedjaoui (2006)* ont présenté une autre relation explicite inspirée de la relation de *Darcy* mais faisant intervenir la rugosité absolue  $\varepsilon$  de la paroi interne de la conduite et donnant un résultat directe et proche de celui obtenu par application de la relation de *Colebrook-white*.

L'objectif principal de cette étude est de proposer des relations pour une évaluation directe des coefficients de *Manning-Strickler* ( $K_s$ ), de *Williams-Hazen* ( $C_{HW}$ ) en fonction des caractéristiques géométriques et hydrauliques de la conduite et en fonction de la rugosité absolue  $\varepsilon$  de la paroi interne d'une conduite en charge.

Des exemples d'applications ont été illustrés dans ce mémoire pour mieux justifier les relations proposées.

Lors du calcul du gradient hydraulique il a été noté que les écarts obtenus sur les valeurs des gradients ont atteint les 61 % pour l'ensemble des conduites testées, ce qui est dû au mauvais choix des valeurs des coefficients de *Manning-Strickler* et de *Williams-Hazen* pris directement premièrement des tables proposés par des auteurs et deuxièmement ces coefficients sont considérés comme constants alors que dans notre étude il s'est avéré que ces coefficients varient en fonction du diamètre et du débit et de la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite. Les relations proposées  $C_{WH} = 29,16 \cdot Q^{-0,08} \cdot D^{0,07} \left[ -\log \left( \frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{10,04}{R} \right) \right]^{1,08}$  ;  $C_{WH} = 1,02 \cdot K_S^{1,08} \cdot D^{0,23} \cdot Q^{-0,08}$  et  $K_S = 22,3078 \cdot D^{-0,165} \left( -\log \left( \frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{10,04}{R} \right) \right)$  offrent une très bonne opportunité pour le calcul du gradient hydraulique avec un écart nul en se référant à la relation de *Darcy* où le coefficient de frottement est calculé en application de la relation de *Colebrook-white*.

**Bibliographie**

**ACHOUR, B. BEDJAOU, A. (2006.a).** calcul du coefficient de frottement en conduite circulaire sous pression. Biskra,algerie: Note Technique,Larhyss/Journal,N°5, 197-200.

**ACHOUR, B., BEDJAOU, A. (2006.b).** Discussion of « Explicit Solutions for Normal Depth problem » by Prabhata K. Swamee, Pushpa N. Rathie, J. Hydraulic Research, Vol.44, 5, 715-717.

**ACHOUR, B. (2007).** Calcul des conduits et canaux par MMR. LARHYSS.edition capitale

**BEDJAOU, A., ACHOUR B.** Nouvelle approche pour le dimensionnement des conduites circulaires sous pression, Courrier du Savoir, n°10, 23-29, 2010.

**BELAIB, A. (2008).** Modélisation Hydraulique d'un système de transfert d'un système de transfert d'eau potable: Univesité Hassiba benbouali de Chlef.

**DARCY, H. (1845).** Sur des recherches expérimentales relatives au mouvement des eaux dans les tuyaux. vol.38: Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences.

**LENCASTRE, A. (1996).** *Hydraulique Générale*, Ed. Eyrolles, Paris.

**Riadh Ben, H. (2009).** Notions de mécanique des fluides: cours et exercices corrigés. l'Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace ENSAE- SUP'AERO de Toulouse.l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.

**Ranald V, G. B. (1997).** Série schaum Mécanique des fluides et Hydraulique. paris: Ediscience international.

**Régis Bourrier. (1977).** "Les réseaux d'assainissement" Edition Lavoisier Tec et Doc – Paris 1997

**SINNIGER, R.O., HAGER, W.H. (1989).** Constructions hydrauliques, Traité de Génie Civil, Ed. Presses Polytechniques Romandes, Vol.15, Suisse.

**Soutter, M. A. (2007).** Ingénierie des eaux et du sol: Processus et aménagements. PPUR presses polytechniques.

***Sites consultés***

[https://www.cours-examens.org/images/An\\_2017\\_1/Etudes\\_superieures/Hydraulique/HYD1.pdf](https://www.cours-examens.org/images/An_2017_1/Etudes_superieures/Hydraulique/HYD1.pdf).

[https://fr.slideshare.net/rolandyonaba/hydraulique-en-charge?qid=77a831a0-973c-4a89-84b6-1925bec5b09c&v=&b=&from\\_search=1](https://fr.slideshare.net/rolandyonaba/hydraulique-en-charge?qid=77a831a0-973c-4a89-84b6-1925bec5b09c&v=&b=&from_search=1) , Page consultée à 17 h le 25 mai 2018 .

[http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%89quation\\_de\\_Hazen-williams&oldid=93457697](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%89quation_de_Hazen-williams&oldid=93457697)  
Page consultée à 17:55, le, 25 mai 2018 .

A N N E X E S

**Tableau 2.2** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour  $D=69/80$  mm en Plexiglas Avec ( $CHW=140$ ,  $KS=100$ ,  $\mathcal{E}=0,001$ ).

$\mathcal{E}$ (m)	$D$	$Q_{exp}$	$J_{exp}$	$J$		
	(m)	m <sup>3</sup> /s	m/m	Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen
0,00100243	0,069	0,00705554	0,11455294	0,11455294	0,07914247	0,05298295
0,00100205	0,069	0,00840018	0,16216018	0,16216018	0,11218294	0,0731882
0,0010017	0,069	0,01015563	0,23672987	0,23672987	0,16396958	0,10401109
0,00100149	0,069	0,01161468	0,30941111	0,30941111	0,21446885	0,13336814
0,00100138	0,069	0,01252855	0,35988269	0,35988269	0,24954626	0,15345136
0,0010013	0,069	0,01328981	0,40483608	0,40483608	0,28079364	0,17116519
0,00100119	0,069	0,0145292	0,48368152	0,48368152	0,33560877	0,20189729
0,00100119	0,069	0,01461384	0,48932113	0,48932113	0,33952997	0,20408072
0,00100117	0,069	0,01478169	0,50060351	0,50060351	0,34737457	0,20844324
0,00100114	0,069	0,01519348	0,52882582	0,52882582	0,36699841	0,21932487
0,00100109	0,069	0,01590869	0,57968296	0,57968296	0,40236353	0,23882824
0,00100108	0,069	0,01606344	0,59099395	0,59099395	0,4102294	0,24314853
0,00100106	0,069	0,01636869	0,6136259	0,6136259	0,42596848	0,25177487
0,00100105	0,069	0,01651926	0,62494664	0,62494664	0,43384152	0,25608106
0,00100104	0,069	0,01666852	0,63627049	0,63627049	0,44171689	0,26038274
0,00100103	0,069	0,0168165	0,64759743	0,64759743	0,44959451	0,26467998
0,00100101	0,069	0,01725306	0,68159635	0,68159635	0,47324064	0,2775459
0,001001	0,069	0,01739622	0,69293503	0,69293503	0,48112697	0,28182618
0,00100099	0,069	0,01753826	0,70427662	0,70427662	0,48901539	0,2861024
0,00100096	0,069	0,01809559	0,74967074	0,74967074	0,52058927	0,30316804
0,00100095	0,069	0,01836812	0,7723836	0,7723836	0,53638799	0,31167821
0,00100093	0,069	0,01876973	0,80647223	0,80647223	0,56009996	0,32441635
0,00100092	0,069	0,01890176	0,81784006	0,81784006	0,56800762	0,32865542
0,0010009	0,069	0,01935701	0,85764644	0,85764644	0,59569818	0,34346554
0,00100089	0,069	0,01967595	0,88609699	0,88609699	0,61548995	0,35401972
0,00100087	0,069	0,02005219	0,92025617	0,92025617	0,63925365	0,36665891
0,00100086	0,069	0,02017609	0,931647	0,931647	0,64717805	0,37086586
0,00100085	0,069	0,02048268	0,96013319	0,96013319	0,66699588	0,38137031
0,00100085	0,069	0,02060408	0,97153152	0,97153152	0,6749257	0,38556701

A N N E X E S

**Tableau 2.3** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour  $D=49/50$  mm en Acier Galvanisé, Avec ( $CHW=120$ ,  $KS=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ ).

$\varepsilon$	$D$	$Q_{exp}$	$J_{exp}$	$J$		
(m)	(m)	m <sup>3</sup> /s	m/m	Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen
0,00100299	0,049	0,00172	0,04319695	0,04319695	0,02916	0,02733902
0,00100271	0,049	0,00191	0,05317857	0,05317857	0,03595	0,03319389
0,00100257	0,049	0,00202	0,05943103	0,05943103	0,04021	0,03682095
0,00100224	0,049	0,00234	0,07959492	0,07959492	0,05396	0,04834728
0,00100215	0,049	0,00244	0,08649893	0,08649893	0,05867	0,05224326
0,00100208	0,049	0,00253	0,09295795	0,09295795	0,06308	0,05586805
0,00100201	0,049	0,00262	0,0996495	0,0996495	0,06765	0,0596044
0,00100179	0,049	0,00296	0,12702696	0,12702696	0,08635	0,07471651
0,00100171	0,049	0,00311	0,14016014	0,14016014	0,09532	0,08187976
0,00100167	0,049	0,00319	0,14742858	0,14742858	0,10029	0,08582319
0,0010016	0,049	0,00333	0,16059042	0,16059042	0,10928	0,09292895
0,00100157	0,049	0,0034	0,16738232	0,16738232	0,11393	0,09657912
0,00100154	0,049	0,00347	0,17431484	0,17431484	0,11867	0,10029389
0,00100151	0,049	0,00354	0,18138808	0,18138808	0,12350	0,10407306
0,00100146	0,049	0,00367	0,19489716	0,19489716	0,13274	0,11126174
0,00100139	0,049	0,00386	0,21551385	0,21551385	0,14684	0,12216421
0,00100133	0,049	0,00404	0,23600129	0,23600129	0,16085	0,13292375
0,00100131	0,049	0,0041	0,24303711	0,24303711	0,16567	0,13660293
0,00100116	0,049	0,00464	0,31100975	0,31100975	0,21218	0,17178119
0,00100115	0,049	0,00469	0,31772685	0,31772685	0,21678	0,17522514
0,00100113	0,049	0,00479	0,33137647	0,33137647	0,22612	0,18220726
0,00100108	0,049	0,00503	0,36530663	0,36530663	0,24935	0,19947488
0,00100106	0,049	0,00513	0,37993213	0,37993213	0,25936	0,2068815
0,001001	0,049	0,0054	0,42085487	0,42085487	0,28738	0,22749798
0,00100096	0,049	0,00566	0,46223973	0,46223973	0,31572	0,24819917
0,00100095	0,049	0,0057	0,46877888	0,46877888	0,32020	0,25145747
0,00100095	0,049	0,00574	0,47536392	0,47536392	0,32471	0,2547353
0,00100094	0,049	0,00578	0,48199483	0,48199483	0,32925	0,25803265
0,0010009	0,049	0,00603	0,52447899	0,52447899	0,35835	0,27908209
0,00100089	0,049	0,00611	0,53845285	0,53845285	0,36792	0,285978
0,00100084	0,049	0,00645	0,59989118	0,59989118	0,41001	0,31614688
0,00100084	0,049	0,00649	0,6073374	0,6073374	0,41511	0,3197875
0,00100079	0,049	0,00688	0,68234454	0,68234454	0,46650	0,35628545
0,00100079	0,049	0,00692	0,69028445	0,69028445	0,47194	0,36013123

A N N E X E S

---

0,00100077	0,049	0,00709	0,72454136	0,72454136	0,49541	0,37668743
0,00100077	0,049	0,00712	0,73067286	0,73067286	0,49961	0,37964462
0,00100076	0,049	0,00722	0,75129761	0,75129761	0,51374	0,38957869
0,00100075	0,049	0,00729	0,7659059	0,7659059	0,52375	0,39660272
0,00100072	0,049	0,00755	0,82139601	0,82139601	0,56178	0,42319649
0,00100071	0,049	0,00765	0,84325509	0,84325509	0,57676	0,43363595
0,0010007	0,049	0,00777	0,86986496	0,86986496	0,59499	0,44631762
0,0010007	0,049	0,0078	0,87658189	0,87658189	0,59960	0,44951429
0,0010007	0,049	0,00783	0,88332489	0,88332489	0,60422	0,45272146
0,00100069	0,049	0,00793	0,90598764	0,90598764	0,61975	0,46348773
0,00100068	0,049	0,00802	0,92662964	0,92662964	0,63390	0,47327682
0,00100067	0,049	0,00817	0,96154942	0,96154942	0,65783	0,48980087
0,00100066	0,049	0,00823	0,9756984	0,9756984	0,66753	0,49648347
0,00100066	0,049	0,00831	0,99472411	0,99472411	0,68057	0,50545838
0,00100062	0,049	0,00888	1,1356007	1,1356007	0,77713	0,57153801

**Tableau 2.4** : valeurs du gradient hydraulique de  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25)  
 $D=124/130$  mm en PVC, Avec ( $C_{HW}=150$ ,  $K_S=120$ ,  $\varepsilon=0,001$ ).

$\varepsilon$ (m)	$D$ (m)	$Q_{exp}$	$J_{exp}$	$J$		
		m <sup>3</sup> /s	m/m	Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen
0,00100471	0,124	0,01955	0,03842772	0,03842772	0,01855	0,01773
0,00100446	0,124	0,02066	0,04289306	0,04289306	0,02072	0,01963
0,00100436	0,124	0,02114	0,04490001	0,04490001	0,02169	0,02049
0,00100429	0,124	0,02149	0,04639233	0,04639233	0,02242	0,02112
0,00100416	0,124	0,02218	0,04940578	0,04940578	0,02388	0,02239
0,00100401	0,124	0,02306	0,05338658	0,05338658	0,02581	0,02407
0,00100393	0,124	0,02349	0,05538782	0,05538782	0,02678	0,02490
0,00100385	0,124	0,02402	0,05790514	0,05790514	0,02801	0,02595
0,00100375	0,124	0,02464	0,0609209	0,0609209	0,02947	0,02721
0,00100362	0,124	0,02554	0,06543483	0,06543483	0,03166	0,02908
0,00100346	0,124	0,02679	0,07197177	0,07197177	0,03484	0,03177
0,00100334	0,124	0,02771	0,07698171	0,07698171	0,03727	0,03382
0,00100332	0,124	0,02789	0,07798164	0,07798164	0,03776	0,03423
0,00100322	0,124	0,02878	0,0830205	0,0830205	0,04021	0,03628
0,00100317	0,124	0,02922	0,08556988	0,08556988	0,04145	0,03731
0,00100315	0,124	0,02948	0,08709446	0,08709446	0,04219	0,03793
0,00100308	0,124	0,03015	0,09108523	0,09108523	0,04413	0,03954
0,00100296	0,124	0,03139	0,0987069	0,0987069	0,04783	0,04260
0,00100272	0,124	0,03417	0,11690693	0,11690693	0,05668	0,04986
0,00100259	0,124	0,03583	0,12850836	0,12850836	0,06232	0,05443
0,00100252	0,124	0,03695	0,13664588	0,13664588	0,06627	0,05763
0,00100244	0,124	0,0381	0,14526123	0,14526123	0,07046	0,06099
0,00100236	0,124	0,03942	0,15547481	0,15547481	0,07543	0,06496
0,00100229	0,124	0,04069	0,16562898	0,16562898	0,08037	0,06889

**Tableau 2.5** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour  $D=130/140$  mm en PVC, Avec ( $C_{HW}=150$ ,  $K_S=120$ ,  $\mathcal{E}=0,001$ ).

$\varepsilon$ (m)	$D$ (m)	$Q_{exp}$	$J_{exp}$	$J$		
		m <sup>3</sup> /s	m/m	Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen
0,00100701	0,13	0,01478	0,01715146	0,01715146	0,00824	0,00839
0,00100618	0,13	0,01682	0,02217567	0,02217567	0,01068	0,01066
0,00100584	0,13	0,01782	0,02487385	0,02487385	0,01198	0,01186
0,00100571	0,13	0,01823	0,02602486	0,02602486	0,01254	0,01237
0,00100559	0,13	0,01864	0,0272019	0,0272019	0,01311	0,01289
0,00100521	0,13	0,02005	0,03144842	0,03144842	0,01517	0,01476
0,001005	0,13	0,0209	0,0341571	0,0341571	0,01648	0,01594
0,00100489	0,13	0,02138	0,03573612	0,03573612	0,01725	0,01662
0,00100474	0,13	0,02207	0,03806846	0,03806846	0,01838	0,01763
0,00100461	0,13	0,02272	0,04033302	0,04033302	0,01948	0,01860
0,0010046	0,13	0,02274	0,04040375	0,04040375	0,01951	0,01863
0,00100445	0,13	0,02354	0,04328318	0,04328318	0,02091	0,01986
0,00100438	0,13	0,02392	0,04468562	0,04468562	0,02159	0,02046
0,0010042	0,13	0,02494	0,04856062	0,04856062	0,02347	0,02211
0,00100397	0,13	0,02641	0,05442855	0,05442855	0,02632	0,02458
0,00100383	0,13	0,02744	0,05873941	0,05873941	0,02841	0,02638
0,00100372	0,13	0,02825	0,06224491	0,06224491	0,03011	0,02784
0,00100359	0,13	0,0293	0,06694025	0,06694025	0,03239	0,02979
0,00100348	0,13	0,03024	0,0712885	0,0712885	0,03451	0,03159
0,00100338	0,13	0,03114	0,07557992	0,07557992	0,03659	0,03335
0,0010033	0,13	0,03194	0,07949981	0,07949981	0,03850	0,03495
0,00100326	0,13	0,03226	0,0810955	0,0810955	0,03927	0,03560
0,00100318	0,13	0,03311	0,08541107	0,08541107	0,04137	0,03736
0,00100306	0,13	0,03446	0,09249511	0,09249511	0,04481	0,04023
0,00100298	0,13	0,03541	0,09764933	0,09764933	0,04731	0,04231
0,00100282	0,13	0,03743	0,10907327	0,10907327	0,05287	0,04689
0,00100275	0,13	0,0383	0,11418812	0,11418812	0,05535	0,04893
0,0010027	0,13	0,03909	0,11893416	0,11893416	0,05766	0,05081
0,00100264	0,13	0,03999	0,12445881	0,12445881	0,06034	0,05300
0,00100258	0,13	0,04088	0,13004537	0,13004537	0,06306	0,05520
0,00100252	0,13	0,04192	0,1367289	0,1367289	0,06631	0,05783
0,00100248	0,13	0,04265	0,14152023	0,14150835	0,06864	0,05971
0,00100243	0,13	0,04342	0,14666352	0,14665142	0,07114	0,06172
0,0010024	0,13	0,04395	0,15025707	0,1502448	0,07289	0,06313

**Tableau 2.7** : écarts sur le calculer du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour  $D=69/80$  mm en Plexiglas Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\mathcal{E}=0,001$ ).

$\varepsilon$ (m)	$D$	$Q_{exp}$	$J_{exp}$	<i>Ecarts sur J</i>	
	(m)	m <sup>3</sup> /s	m/m	<i>Entre Darcy-Manning-Strickler</i>	<i>Entre Darcy-Williams-Hazen</i>
0,00100243	0,069	0,00705554	0,11455294	30,91	53,75
0,00100205	0,069	0,00840018	0,16216018	30,82	54,87
0,0010017	0,069	0,01015563	0,23672987	30,74	56,06
0,00100149	0,069	0,01161468	0,30941111	30,68	56,90
0,00100138	0,069	0,01252855	0,35988269	30,66	57,36
0,0010013	0,069	0,01328981	0,40483608	30,64	57,72
0,00100119	0,069	0,0145292	0,48368152	30,61	58,26
0,00100119	0,069	0,01461384	0,48932113	30,61	58,29
0,00100117	0,069	0,01478169	0,50060351	30,61	58,36
0,00100114	0,069	0,01519348	0,52882582	30,60	58,53
0,00100109	0,069	0,01590869	0,57968296	30,59	58,80
0,00100108	0,069	0,01606344	0,59099395	30,59	58,86
0,00100106	0,069	0,01636869	0,6136259	30,58	58,97
0,00100105	0,069	0,01651926	0,62494664	30,58	59,02
0,00100104	0,069	0,01666852	0,63627049	30,58	59,08
0,00100103	0,069	0,0168165	0,64759743	30,58	59,13
0,00100101	0,069	0,01725306	0,68159635	30,57	59,28
0,001001	0,069	0,01739622	0,69293503	30,57	59,33
0,00100099	0,069	0,01753826	0,70427662	30,56	59,38
0,00100096	0,069	0,01809559	0,74967074	30,56	59,56
0,00100095	0,069	0,01836812	0,7723836	30,55	59,65
0,00100093	0,069	0,01876973	0,80647223	30,55	59,77
0,00100092	0,069	0,01890176	0,81784006	30,55	59,81
0,0010009	0,069	0,01935701	0,85764644	30,54	59,95

A N N E X E S

0,00100089	0,069	0,01967595	0,88609699	30,54	60,05
0,00100087	0,069	0,02005219	0,92025617	30,54	60,16
0,00100086	0,069	0,02017609	0,931647	30,53	60,19

**Tableau 2.8** : écarts sur le calculer du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour  $D=49/50$  mm en Acier Galvanisé, Avec ( $CHW=120$ ,  $KS=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ ).

$\varepsilon$	$D$	$Q_{exp}$	$J_{exp}$	Ecart sur $J$	
(m)	(m)	m <sup>3</sup> /s	m/m	Entre Darcy-Manning-Strickler	Entre Darcy Williams-Hazen
0,00100299	0,049	0,00172	0,04319695	32,50	36,71
0,00100271	0,049	0,00191	0,05317857	32,39	37,58
0,00100257	0,049	0,00202	0,05943103	32,34	38,04
0,00100224	0,049	0,00234	0,07959492	32,20	39,26
0,00100215	0,049	0,00244	0,08649893	32,17	39,60
0,00100208	0,049	0,00253	0,09295795	32,14	39,90
0,00100201	0,049	0,00262	0,0996495	32,11	40,19
0,00100179	0,049	0,00296	0,12702696	32,02	41,18
0,00100171	0,049	0,00311	0,14016014	31,99	41,58
0,00100167	0,049	0,00319	0,14742858	31,97	41,79
0,0010016	0,049	0,00333	0,16059042	31,95	42,13
0,00100157	0,049	0,0034	0,16738232	31,94	42,30
0,00100154	0,049	0,00347	0,17431484	31,92	42,46
0,00100151	0,049	0,00354	0,18138808	31,91	42,62
0,00100146	0,049	0,00367	0,19489716	31,89	42,91
0,00100139	0,049	0,00386	0,21551385	31,87	43,31
0,00100133	0,049	0,00404	0,23600129	31,84	43,68
0,00100131	0,049	0,0041	0,24303711	31,83	43,79
0,00100116	0,049	0,00464	0,31100975	31,78	44,77

A N N E X E S

0,00100115	0,049	0,00469	0,31772685	31,77	44,85
0,00100113	0,049	0,00479	0,33137647	31,76	45,02
0,00100108	0,049	0,00503	0,36530663	31,74	45,40
0,00100106	0,049	0,00513	0,37993213	31,73	45,55
0,001001	0,049	0,0054	0,42085487	31,71	45,94
0,00100096	0,049	0,00566	0,46223973	31,70	46,31
0,00100095	0,049	0,0057	0,46877888	31,70	46,36
0,00100095	0,049	0,00574	0,47536392	31,69	46,41
0,00100094	0,049	0,00578	0,48199483	31,69	46,47
0,0010009	0,049	0,00603	0,52447899	31,68	46,79
0,00100089	0,049	0,00611	0,53845285	31,67	46,89
0,00100084	0,049	0,00645	0,59989118	31,65	47,30
0,00100084	0,049	0,00649	0,6073374	31,65	47,35
0,00100079	0,049	0,00688	0,68234454	31,63	47,79
0,00100079	0,049	0,00692	0,69028445	31,63	47,83
0,00100077	0,049	0,00709	0,72454136	31,62	48,01
0,00100077	0,049	0,00712	0,73067286	31,62	48,04
0,00100076	0,049	0,00722	0,75129761	31,62	48,15
0,00100075	0,049	0,00729	0,7659059	31,62	48,22
0,00100072	0,049	0,00755	0,82139601	31,61	48,48
0,00100071	0,049	0,00765	0,84325509	31,60	48,58
0,0010007	0,049	0,00777	0,86986496	31,60	48,69
0,0010007	0,049	0,0078	0,87658189	31,60	48,72
0,0010007	0,049	0,00783	0,88332489	31,60	48,75
0,00100069	0,049	0,00793	0,90598764	31,59	48,84
0,00100068	0,049	0,00802	0,92662964	31,59	48,92
0,00100067	0,049	0,00817	0,96154942	31,59	49,06
0,00100066	0,049	0,00823	0,9756984	31,58	49,12
0,00100066	0,049	0,00831	0,99472411	31,58	49,19
0,00100062	0,049	0,00888	1,1356007	31,57	49,67

**Tableau 2.9** : écarts sur le calcul du gradient hydraulique de  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazen (2.21) et Manning-Strickler (2.25)  
 $D=124/130$  mm en PVC, Avec ( $CHW=150$ ,  $KS=120$ ,  $\mathcal{E}=0,001$ ).

$\varepsilon$ (m)	$D$ (m)	$Q_{exp}$	$J_{exp}$	Ecart sur $J$	
		m <sup>3</sup> /s	m/m	Entre Darcy- Manning- Strickler	Entre Darcy Williams- Hazen
0,00100471	0,124	0,01955	0,03842772	51,72	53,87
0,00100446	0,124	0,02066	0,04289306	51,70	54,22
0,00100436	0,124	0,02114	0,04490001	51,69	54,37
0,00100429	0,124	0,02149	0,04639233	51,68	54,47
0,00100416	0,124	0,02218	0,04940578	51,67	54,67
0,00100401	0,124	0,02306	0,05338658	51,65	54,92
0,00100393	0,124	0,02349	0,05538782	51,64	55,04
0,00100385	0,124	0,02402	0,05790514	51,63	55,18
0,00100375	0,124	0,02464	0,0609209	51,62	55,34
0,00100362	0,124	0,02554	0,06543483	51,61	55,56
0,00100346	0,124	0,02679	0,07197177	51,59	55,86
0,00100334	0,124	0,02771	0,07698171	51,58	56,07
0,00100332	0,124	0,02789	0,07798164	51,58	56,11
0,00100322	0,124	0,02878	0,0830205	51,57	56,30
0,00100317	0,124	0,02922	0,08556988	51,57	56,40
0,00100315	0,124	0,02948	0,08709446	51,56	56,45
0,00100308	0,124	0,03015	0,09108523	51,56	56,59
0,00100296	0,124	0,03139	0,0987069	51,54	56,84
0,00100272	0,124	0,03417	0,11690693	51,52	57,35
0,00100259	0,124	0,03583	0,12850836	51,51	57,64
0,00100252	0,124	0,03695	0,13664588	51,50	57,83
0,00100244	0,124	0,0381	0,14526123	51,49	58,01
0,00100236	0,124	0,03942	0,15547481	51,48	58,22
0,00100229	0,124	0,04069	0,16562898	51,48	58,41

**Tableau 2.10** : écarts sur le calculer du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25) Pour  $D=130/140$  mm en PVC, Avec ( $CHW=150$ ,  $KS=120$ ,  $\mathcal{E}=0,001$ ).

$\varepsilon$ (m)	$D$ (m)	$Q_{exp}$	$J_{exp}$	Ecart sur $J$	
		m <sup>3</sup> /s	m/m	Entre Darcy- Manning- Strickler	Entre Darcy Williams- Hazen
0,00100701	0,13	0,01478	0,01715146	51,94	51,09
0,00100618	0,13	0,01682	0,02217567	51,86	51,94
0,00100584	0,13	0,01782	0,02487385	51,83	52,31
0,00100571	0,13	0,01823	0,02602486	51,81	52,46
0,00100559	0,13	0,01864	0,0272019	51,80	52,61
0,00100521	0,13	0,02005	0,03144842	51,76	53,08
0,001005	0,13	0,0209	0,0341571	51,74	53,35
0,00100489	0,13	0,02138	0,03573612	51,73	53,49
0,00100474	0,13	0,02207	0,03806846	51,72	53,70
0,00100461	0,13	0,02272	0,04033302	51,71	53,88
0,0010046	0,13	0,02274	0,04040375	51,71	53,89
0,00100445	0,13	0,02354	0,04328318	51,69	54,11
0,00100438	0,13	0,02392	0,04468562	51,68	54,21
0,0010042	0,13	0,02494	0,04856062	51,67	54,48
0,00100397	0,13	0,02641	0,05442855	51,64	54,84
0,00100383	0,13	0,02744	0,05873941	51,63	55,08
0,00100372	0,13	0,02825	0,06224491	51,62	55,27
0,00100359	0,13	0,0293	0,06694025	51,61	55,49
0,00100348	0,13	0,03024	0,0712885	51,60	55,69
0,00100338	0,13	0,03114	0,07557992	51,59	55,88
0,0010033	0,13	0,03194	0,07949981	51,58	56,03
0,00100326	0,13	0,03226	0,0810955	51,58	56,10
0,00100318	0,13	0,03311	0,08541107	51,57	56,26
0,00100306	0,13	0,03446	0,09249511	51,56	56,50

A N N E X E S

---

0,00100298	0,13	0,03541	0,09764933	51,55	56,67
0,00100282	0,13	0,03743	0,10907327	51,53	57,01
0,00100275	0,13	0,0383	0,11418812	51,53	57,15
0,0010027	0,13	0,03909	0,11893416	51,52	57,28
0,00100264	0,13	0,03999	0,12445881	51,51	57,42
0,00100258	0,13	0,04088	0,13004537	51,51	57,55
0,00100252	0,13	0,04192	0,1367289	51,50	57,70
0,00100248	0,13	0,04265	0,14152023	51,49	57,80
0,00100243	0,13	0,04342	0,14666352	51,49	57,91
0,0010024	0,13	0,04395	0,15025707	51,49	57,98

**Tableau 2.12** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25)  
Pour  $D=69/80$  mm en Plexiglas Avec ( $C_{HW}$ ,  $K_S$  corrigés).

$\varepsilon$ m	$D$	$Q_{exp}$	$J_{exp}$	$J$		
	(m)	m <sup>3</sup> /s	m/m	Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen
0,00100243	0,069	0,00705554	0,11455294	0,11455294	0,11455	0,11451
0,00100205	0,069	0,00840018	0,16216018	0,16216018	0,16216	0,16210
0,0010017	0,069	0,01015563	0,23672987	0,23672987	0,23673	0,23664
0,00100149	0,069	0,01161468	0,30941111	0,30941111	0,30941	0,30929
0,00100138	0,069	0,01252855	0,35988269	0,35988269	0,35988	0,35975
0,0010013	0,069	0,01328981	0,40483608	0,40483608	0,40484	0,40468
0,00100119	0,069	0,0145292	0,48368152	0,48368152	0,48368	0,48350
0,00100119	0,069	0,01461384	0,48932113	0,48932113	0,48932	0,48913
0,00100117	0,069	0,01478169	0,50060351	0,50060351	0,50060	0,50041
0,00100114	0,069	0,01519348	0,52882582	0,52882582	0,52883	0,52862
0,00100109	0,069	0,01590869	0,57968296	0,57968296	0,57968	0,57946
0,00100108	0,069	0,01606344	0,59099395	0,59099395	0,59099	0,59076
0,00100106	0,069	0,01636869	0,6136259	0,6136259	0,61363	0,61339
0,00100105	0,069	0,01651926	0,62494664	0,62494664	0,62495	0,62470
0,00100104	0,069	0,01666852	0,63627049	0,63627049	0,63627	0,63602
0,00100103	0,069	0,0168165	0,64759743	0,64759743	0,64760	0,64735
0,00100101	0,069	0,01725306	0,68159635	0,68159635	0,68160	0,68133
0,001001	0,069	0,01739622	0,69293503	0,69293503	0,69294	0,69266
0,00100099	0,069	0,01753826	0,70427662	0,70427662	0,70428	0,70400
0,00100096	0,069	0,01809559	0,74967074	0,74967074	0,74967	0,74938
0,00100095	0,069	0,01836812	0,7723836	0,7723836	0,77238	0,77208
0,00100093	0,069	0,01876973	0,80647223	0,80647223	0,80647	0,80616
0,00100092	0,069	0,01890176	0,81784006	0,81784006	0,81784	0,81752
0,0010009	0,069	0,01935701	0,85764644	0,85764644	0,85765	0,85731
0,00100089	0,069	0,01967595	0,88609699	0,88609699	0,88610	0,88575
0,00100087	0,069	0,02005219	0,92025617	0,92025617	0,92026	0,91989

A N N E X E S

0,00100086	0,069	0,02017609	0,931647	0,931647	0,93165	0,93128
0,00100085	0,069	0,02048268	0,96013319	0,96013319	0,96013	0,95975

**Tableau 2.13** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25)  
Pour  $D=49/50$  mm en Acier Galvanisé, Avec ( $C_{HW}$ ,  $K_S$  corrigés).

$\varepsilon$ (m)	$D$ (m)	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	$J$		
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen
0,00100299	0,049	0,00172	0,04319695	0,04319695	0,04320	0,04318
0,00100271	0,049	0,00191	0,05317857	0,05317857	0,05318	0,05315
0,00100257	0,049	0,00202	0,05943103	0,05943103	0,05943	0,05940
0,00100224	0,049	0,00234	0,07959492	0,07959492	0,07959	0,07956
0,00100215	0,049	0,00244	0,08649893	0,08649893	0,08650	0,08646
0,00100208	0,049	0,00253	0,09295795	0,09295795	0,09296	0,09291
0,00100201	0,049	0,00262	0,0996495	0,0996495	0,09965	0,09960
0,00100179	0,049	0,00296	0,12702696	0,12702696	0,12703	0,12697
0,00100171	0,049	0,00311	0,14016014	0,14016014	0,14016	0,14009
0,00100167	0,049	0,00319	0,14742858	0,14742858	0,14743	0,14736
0,0010016	0,049	0,00333	0,16059042	0,16059042	0,16059	0,16051
0,00100157	0,049	0,0034	0,16738232	0,16738232	0,16738	0,16730
0,00100154	0,049	0,00347	0,17431484	0,17431484	0,17431	0,17423
0,00100151	0,049	0,00354	0,18138808	0,18138808	0,18139	0,18130
0,00100146	0,049	0,00367	0,19489716	0,19489716	0,19490	0,19480
0,00100139	0,049	0,00386	0,21551385	0,21551385	0,21551	0,21541
0,00100133	0,049	0,00404	0,23600129	0,23600129	0,23600	0,23589
0,00100131	0,049	0,0041	0,24303711	0,24303711	0,24304	0,24292
0,00100116	0,049	0,00464	0,31100975	0,31100975	0,31101	0,31086
0,00100115	0,049	0,00469	0,31772685	0,31772685	0,31773	0,31757
0,00100113	0,049	0,00479	0,33137647	0,33137647	0,33138	0,33122
0,00100108	0,049	0,00503	0,36530663	0,36530663	0,36531	0,36513

A N N E X E S

0,00100106	0,049	0,00513	0,37993213	0,37993213	<i>0,37993</i>	<i>0,37975</i>
0,001001	0,049	0,0054	0,42085487	0,42085487	<i>0,42086</i>	<i>0,42065</i>
0,00100096	0,049	0,00566	0,46223973	0,46223973	<i>0,46224</i>	<i>0,46201</i>
0,00100095	0,049	0,0057	0,46877888	0,46877888	<i>0,46878</i>	<i>0,46855</i>
0,00100095	0,049	0,00574	0,47536392	0,47536392	<i>0,47536</i>	<i>0,47513</i>
0,00100094	0,049	0,00578	0,48199483	0,48199483	<i>0,48200</i>	<i>0,48176</i>
0,0010009	0,049	0,00603	0,52447899	0,52447899	<i>0,52448</i>	<i>0,52422</i>
0,00100089	0,049	0,00611	0,53845285	0,53845285	<i>0,53845</i>	<i>0,53819</i>
0,00100084	0,049	0,00645	0,59989118	0,59989118	<i>0,59989</i>	<i>0,59960</i>
0,00100084	0,049	0,00649	0,6073374	0,6073374	<i>0,60734</i>	<i>0,60704</i>
0,00100079	0,049	0,00688	0,68234454	0,68234454	<i>0,68234</i>	<i>0,68201</i>
0,00100079	0,049	0,00692	0,69028445	0,69028445	<i>0,69028</i>	<i>0,68995</i>
0,00100077	0,049	0,00709	0,72454136	0,72454136	<i>0,72454</i>	<i>0,72418</i>
0,00100077	0,049	0,00712	0,73067286	0,73067286	<i>0,73067</i>	<i>0,73031</i>
0,00100076	0,049	0,00722	0,75129761	0,75129761	<i>0,75130</i>	<i>0,75093</i>
0,00100075	0,049	0,00729	0,7659059	0,7659059	<i>0,76591</i>	<i>0,76553</i>
0,00100072	0,049	0,00755	0,82139601	0,82139601	<i>0,82140</i>	<i>0,82099</i>
0,00100071	0,049	0,00765	0,84325509	0,84325509	<i>0,84326</i>	<i>0,84284</i>
0,0010007	0,049	0,00777	0,86986496	0,86986496	<i>0,86987</i>	<i>0,86943</i>
0,0010007	0,049	0,0078	0,87658189	0,87658189	<i>0,87658</i>	<i>0,87615</i>
0,0010007	0,049	0,00783	0,88332489	0,88332489	<i>0,88333</i>	<i>0,88289</i>
0,00100069	0,049	0,00793	0,90598764	0,90598764	<i>0,90599</i>	<i>0,90554</i>
0,00100068	0,049	0,00802	0,92662964	0,92662964	<i>0,92663</i>	<i>0,92617</i>
0,00100067	0,049	0,00817	0,96154942	0,96154942	<i>0,96155</i>	<i>0,96107</i>
0,00100066	0,049	0,00823	0,9756984	0,9756984	<i>0,97570</i>	<i>0,97521</i>
0,00100066	0,049	0,00831	0,99472411	0,99472411	<i>0,99472</i>	<i>0,99423</i>
0,00100062	0,049	0,00888	1,1356007	1,1356007	<i>1,13560</i>	<i>1,13504</i>

**Tableau 2.14** : valeurs du gradient hydraulique de  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25)  
 $D=124/130$  mm en PVC, Avec ( $C_{HW}$ ,  $K_S$  corrigés).

$\varepsilon$ (m)	$D$ (m)	$Q_{exp}$	$J_{exp}$	$J$		
		m <sup>3</sup> /s	m/m	Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen
0,00100471	0,124	0,01955	0,03842772	0,03842772	0,03843	0,03842
0,00100446	0,124	0,02066	0,04289306	0,04289306	0,04289	0,04289
0,00100436	0,124	0,02114	0,04490001	0,04490001	0,04490	0,04489
0,00100429	0,124	0,02149	0,04639233	0,04639233	0,04639	0,04638
0,00100416	0,124	0,02218	0,04940578	0,04940578	0,04941	0,04940
0,00100401	0,124	0,02306	0,05338658	0,05338658	0,05339	0,05338
0,00100393	0,124	0,02349	0,05538782	0,05538782	0,05539	0,05538
0,00100385	0,124	0,02402	0,05790514	0,05790514	0,05791	0,05789
0,00100375	0,124	0,02464	0,0609209	0,0609209	0,06092	0,06091
0,00100362	0,124	0,02554	0,06543483	0,06543483	0,06543	0,06542
0,00100346	0,124	0,02679	0,07197177	0,07197177	0,07197	0,07196
0,00100334	0,124	0,02771	0,07698171	0,07698171	0,07698	0,07697
0,00100332	0,124	0,02789	0,07798164	0,07798164	0,07798	0,07797
0,00100322	0,124	0,02878	0,0830205	0,0830205	0,08302	0,08300
0,00100317	0,124	0,02922	0,08556988	0,08556988	0,08557	0,08555
0,00100315	0,124	0,02948	0,08709446	0,08709446	0,08709	0,08708
0,00100308	0,124	0,03015	0,09108523	0,09108523	0,09109	0,09107
0,00100296	0,124	0,03139	0,0987069	0,0987069	0,09871	0,09869
0,00100272	0,124	0,03417	0,11690693	0,11690693	0,11691	0,11688
0,00100259	0,124	0,03583	0,12850836	0,12850836	0,12851	0,12848
0,00100252	0,124	0,03695	0,13664588	0,13664588	0,13665	0,13662
0,00100244	0,124	0,0381	0,14526123	0,14526123	0,14526	0,14523
0,00100236	0,124	0,03942	0,15547481	0,15547481	0,15547	0,15544
0,00100229	0,124	0,04069	0,16562898	0,16562898	0,16563	0,16560

**Tableau 2.15** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (2.20) ; William-Hazan (2.21) et Manning-Strickler (2.25)  
Pour  $D=130/140$  mm en PVC, Avec ( $C_{HW}$ ,  $K_S$  corrigés).

$\varepsilon$ (m)	$D$ (m)	$Q_{exp}$	$J_{exp}$	$J$		
		m <sup>3</sup> /s	m/m	Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen
0,00100701	0,13	0,01478	0,01715146	0,01715146	0,01715	0,01715
0,00100618	0,13	0,01682	0,02217567	0,02217567	0,02218	0,02217
0,00100584	0,13	0,01782	0,02487385	0,02487385	0,02487	0,02487
0,00100571	0,13	0,01823	0,02602486	0,02602486	0,02602	0,02602
0,00100559	0,13	0,01864	0,0272019	0,0272019	0,02720	0,02720
0,00100521	0,13	0,02005	0,03144842	0,03144842	0,03145	0,03144
0,001005	0,13	0,0209	0,0341571	0,0341571	0,03416	0,03415
0,00100489	0,13	0,02138	0,03573612	0,03573612	0,03574	0,03573
0,00100474	0,13	0,02207	0,03806846	0,03806846	0,03807	0,03806
0,00100461	0,13	0,02272	0,04033302	0,04033302	0,04033	0,04033
0,0010046	0,13	0,02274	0,04040375	0,04040375	0,04040	0,04040
0,00100445	0,13	0,02354	0,04328318	0,04328318	0,04328	0,04328
0,00100438	0,13	0,02392	0,04468562	0,04468562	0,04469	0,04468
0,0010042	0,13	0,02494	0,04856062	0,04856062	0,04856	0,04855
0,00100397	0,13	0,02641	0,05442855	0,05442855	0,05443	0,05442
0,00100383	0,13	0,02744	0,05873941	0,05873941	0,05874	0,05873
0,00100372	0,13	0,02825	0,06224491	0,06224491	0,06224	0,06223
0,00100359	0,13	0,0293	0,06694025	0,06694025	0,06694	0,06693
0,00100348	0,13	0,03024	0,0712885	0,0712885	0,07129	0,07128
0,00100338	0,13	0,03114	0,07557992	0,07557992	0,07558	0,07557
0,0010033	0,13	0,03194	0,07949981	0,07949981	0,07950	0,07949
0,00100326	0,13	0,03226	0,0810955	0,0810955	0,08110	0,08108
0,00100318	0,13	0,03311	0,08541107	0,08541107	0,08541	0,08540
0,00100306	0,13	0,03446	0,09249511	0,09249511	0,09250	0,09248
0,00100298	0,13	0,03541	0,09764933	0,09764933	0,09765	0,09763

A N N E X E S

---

0,00100282	0,13	0,03743	0,10907327	0,10907327	<i>0,10907</i>	<i>0,10905</i>
0,00100275	0,13	0,0383	0,11418812	0,11418812	<i>0,11419</i>	<i>0,11417</i>
0,0010027	0,13	0,03909	0,11893416	0,11893416	<i>0,11893</i>	<i>0,11891</i>
0,00100264	0,13	0,03999	0,12445881	0,12445881	<i>0,12446</i>	<i>0,12444</i>
0,00100258	0,13	0,04088	0,13004537	0,13004537	<i>0,13005</i>	<i>0,13002</i>
0,00100252	0,13	0,04192	0,1367289	0,1367289	<i>0,13673</i>	<i>0,13670</i>
0,00100248	0,13	0,04265	0,14152023	0,14150835	<i>0,14152</i>	<i>0,14149</i>
0,00100243	0,13	0,04342	0,14666352	0,14665142	<i>0,14666</i>	<i>0,14664</i>
0,0010024	0,13	0,04395	0,15025707	0,1502448	<i>0,15026</i>	<i>0,15023</i>