



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. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
**OMARA Said**

Le : samedi 23 juin 2018

## **Etude comparative pour le calcul du gradient hydraulique dans les conduites circulaires en charge en regime turbulent rugueux**

---

### **Jury :**

Mme. CHARHABIL Sonia	MCA	Université de Biskra	Président
M. MASMOUDI Rachid	MCA	Université de Biskra	Examineur
M. BEDJAOUI Ali	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2017 - 2018

## اهداء

الأول من نطقت شفاتي باسمها، اليك يا روق السلام، وبانض الحب في كل زمان ومكان،  
يا أروع امرأة اجتاحت عالمي بالحب والحنان يا صاحبة القلب الملي بالدفء والامان، يا  
حبيبة القلب والوجدان يا أمي الغالية "عائشة".

إليك يا من غرس في الثقة بالنفس والارادة القوية، يا نور دري وتاج كياني، يا من رسم ظلال  
النجاح امامي، وتكبد العناء لأجل اسعادي يا من هو البحر في الحنان والصمود في الحياة  
وحدك أقف عرفانا وطاعة وحبا يا والدي الكرم "المختار".

السندى ودعامتي في الحياة واخوتي والمراري السعادة في أعينهم وارتاح بينهم "نادية وثورية  
ورقية واخي رشيد واخي تامر وزوجته"، والمحبيتي قلبي ابنتي اخوتي "زليخة".  
المرقا سمحني حلاوة ومرارة الحياة الجامعية "دقيش بلال" والمرحبا انا انا انا  
ب"سلام".

الكل الخالات والاخوال والعمات والاعمام، وكل اولادهم كبيرا وصغيرا.  
وأخص بالشكر الجزيل الى "عبدالرزاق لسلت"، والوالذي ساعدني في كتابة هذا البحث  
"يوسف".

الكل من علمني حرفا أساتذتي الكرام.

الكل من احبهم قلبي وكانوا مصدر سعادتي أهدي ثمرة جهدي.

سعد عمارة

## الملخص

تهتم هذه الدراسة الى مقارنة العلاقات التي تم من خلالها حساب الميل الهيدروليكي في الأنابيب المملوءة والذي عادة ما حُسب من خلال علاقات *Darcy –Manning-Strickler, Williams-Hazen et Achour-Bedjaoui*.

العمل المقدم يهدف الى حساب الميل الهيدروليكي باستخدام جُمع العلاقات المشار إليها وباستخدام قُيم محصل عليها مخبريًا من خلال تجارب مخبرية تمت بمخبر قسم الري بجامعة بسكرة.

## كلمات مفتاحية:

معامل الاحتكاك، التدفق، الميل الهيدروليكي، القطر، الأنبوب

## RESUME

Notre travail s'est intéressé exclusivement à la comparaison entre les relations donnant le gradient hydraulique obtenu en application des relations de *Darcy –Manning-Strickler, Williams-Hazen et Achour-Bedjaoui*.

Le travail consiste à évaluer le gradient hydraulique pour des valeurs des débits, diamètres, rugosité de chaque conduite étant connues.

Les valeurs utilisées pour la comparaison sont celles de *bedjaoui 2010* obtenues après des essais au laboratoire du département d'Hydraulique de l'université de Biskra.

## Mots clés:

Coefficient de frottement, débit, gradient, diamètre, conduite

## Abstract

This work was interested exclusively in the comparison between the relations giving the hydraulic gradient obtained pursuant to the relations of *Darcy - Manning-Strickler, Williams-Hazen and Achour-Bedjaoui*.

Work consists in evaluating the hydraulic gradient for values of the flows, diameters, roughness of each control being known.

The values used for the comparison are those of *bedjaoui 2010* obtained afterwards tests at the laboratory of the department of Hydraulics of the university of Biskra.

## Key Words :

Coefficient of friction, flow, gradient, diameter, pipe

## *Liste des tables*

<i>Tableau 1.1 : valeurs de <math>\varepsilon</math> pour des conduites de matériaux différents ( AFICPAR, 2017)</i>	
<i>Tableau 1.2 : Correspondances entre le coefficient K et les paramètres de la formule de LECHAPT et CALMON ( Conçu et réalisé par David Dorchies, Gilles Belaud )</i>	
<i>Tableau 1.3 : Valeurs Coefficient de Hazen Williams <math>C_{WH}</math>, Lamont (1981)</i>	
<i>Tableau 1-4 : Coefficient de Hazen Williams, Lamont (1981) ; (Soutter, 2007)</i>	
<i>Tableau 1.5 : Correspondance entre les valeurs de <math>C_{HW}</math> et <math>K_S</math> et <math>\mathcal{E}</math> pour différents matériaux de conduite. (Roland O, 2015)</i>	
<i>Tableau 2.1 : Conduites testées lors des essais expérimentaux</i>	
<i>Tableau 2.2 : Ecart max sur le calcul du gradient hydraulique J</i>	
<i>Tableau 2.3 : Valeurs utilisées pour les différents coefficients (Rugosité absolue, <math>C_{HW}</math> et <math>K_S</math>)</i>	

## **LISTE DES FIGURES**

<i>Figure 1.1 : Profil des vitesses dans une section circulaire en charge (expérience de Reynolds)</i>	
<i>Figure 1.2 : le profil des vitesses est parabolique l'écoulement est laminaire</i>	
<i>Figure 1.3 : le profil des vitesses est parabolique l'écoulement est turbulent</i>	
<i>Figure 1.4 : le profil de l'écoulement le long d'un diamètre de conduite hydraulique lisse</i>	
<i>Figure 1.5 : La variation du débit ou de la vitesse dans un tuyau de <math>D_{cst}</math> p de charge <math>h_r</math></i>	
<i>Figure 1.6 : les caractéristiques géométriques de la surface rugueuse (<math>h_k</math> ; <math>\varepsilon</math>)</i>	
<i>Figure 1.7 : Influence de la viscosité et le frottement augmenté sur la vitesse moyenne</i>	
<i>Figure 1.8 : Comparaison entre les relations (1.9) et (1.18)</i>	
<i>Figure 2.1 : Gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour <math>D=86/90</math> mm, Avec (<math>C_{HW}=140</math>, <math>K_S=100</math>, <math>\varepsilon=0,001</math>)</i>	
<i>Figure 2.2 : Gradient hydraulique J selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour <math>D=49/50</math> mm, Avec (<math>C_{HW}=140</math>, <math>K_S=100</math>, <math>\varepsilon=0,001</math>)</i>	

<b>Figure 2.3</b> : Gradient hydraulique $J$ selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour $D=60/63$ mm, Avec ( $C_{HW}=140, K_S=100, \varepsilon=0,001$ )	
<b>Figure 2.4</b> : Gradient hydraulique $J$ selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour $D=69/80$ mm, Avec ( $C_{HW}=140, K_S=100, \varepsilon=0,001$ )	
<b>Figure 2.5</b> : Gradient hydraulique $J$ selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour $D=77/80$ mm Avec ( $C_{HW}=140, K_S=100, \varepsilon=0,001$ )	
<b>Figure 2.6</b> : Gradient hydraulique $J$ selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour $D=87/90$ mm, Avec ( $C_{HW}=140, K_S=100, \varepsilon=0,001$ )	
<b>Figure 2.7</b> : Gradient hydraulique $J$ selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour $D=121/125$ mm, Avec ( $C_{HW}=140, K_S=100, \varepsilon=0,001$ )	
<b>Figure 2.8</b> : Gradient hydraulique $J$ selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour $D=107/110$ mm, Avec ( $C_{HW}=140, K_S=100, \varepsilon=0,001$ )	
<b>Figure 2.9</b> : Gradient hydraulique $J$ selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour $D=49/50$ mm, Avec ( $C_{HW}=140, K_S=100, \varepsilon=0,001$ )	
<b>Figure 2.10</b> : Gradient hydraulique $J$ selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour $D=56/60$ mm, Avec ( $C_{HW}=140, K_S=100, \varepsilon=0,001$ )	
<b>Figure 2.11</b> : Gradient hydraulique $J$ selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour $D=86/90$ mm, Avec ( $C_{HW}=140, K_S=100, \varepsilon=0,001$ )	
<b>Figure 2.12</b> : Gradient hydraulique $J$ selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour $D=124/130$ mm, Avec ( $C_{HW}=140, K_S=100, \varepsilon=0,001$ )	
<b>Figure 2.13</b> : Gradient hydraulique $J$ selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour $D=130/140$ mm), Avec ( $C_{HW}=140, K_S=100, \varepsilon=0,001$ )	

## PRINCIPALES NOTATIONS

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

## Index du contenu

<i>remercie</i>	
<i>اهداء</i>	
<i>Index du contenu</i>	
<b>RESUME</b>	
<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre 1 : Généralités les écoulements en charge</i>	
<i>1.1 Introduction</i>	4
<i>1.2.1 - Les pertes de charge linéaire</i>	4
<i>1.2.2- Profil des vitesses dans une section circulaire en charge</i>	4
<i>1.2.3- Expression de la perte de charge linéaire</i>	8
<i>1.2.3.1. - En régime laminaire <math>Re &lt; 2000</math></i>	9
<i>1.2.3.2 - En régime turbulent <math>Re &gt; 4000</math></i>	9
<i>1.2.3.3 - Régime turbulent en tuyau lisse</i>	13
<i>1.2.3.4 - Régime turbulent en tuyau rugueux</i>	13
<i>1.2.4 - Les pertes de charge singulière</i>	13
<i>1.3 Formules utilisées pour l'évaluation du gradient hydraulique</i>	19
<i>1.3.1 Formules anciennes</i>	19
<i>1.3.1.1 Relation de Darcy-Weisbach</i>	19
<i>1.3.1.2 Formule de Manning-Strickler</i>	20
<i>1.3.1.3 Formule de Lechapt et Calmon</i>	22
<i>1.3.1.4 Équation de Prony</i>	22
<i>1.3.2 Relations modernes</i>	23
<i>1.3.2.1 Formule de Williams-Hazen</i>	23
<i>1.3.2.2 Formule d'Achour –Bedjaoui (2006)</i>	25
<i>1.4 Conclusion</i>	28
<b>Chapitre 2</b> <b>Calcul du gradient hydraulique par la methode par la methode du modele rugueux de reference MMR</b>	

2.1 Introduction	30
<i>2.2 Données expérimentales</i>	30
<i>2.2.1. Evaluation du coefficient de frottement</i>	32
<i>2.2.2. Evaluation des gradients hydrauliques</i>	33
<i>2.2.3 Discussion des résultats</i>	42
<i>2-3 Conclusion</i>	44
<i>conclusion-générale</i>	45
<i>bibliographiques</i>	
<b>PRINCIPALES-NOTATIONS</b>	
<i>annexes</i>	



*Introduction générale*

*Introduction générale*

Le calcul des écoulements uniformes à surface libre ou en charge occupe une place importante dans la pratique de l'ingénieur hydraulicien. Un écoulement est considéré comme étant uniforme lorsque ses caractéristiques sont invariables dans le temps et dans l'espace. Ces caractéristiques sont la profondeur  $h$  de l'écoulement appelée aussi hauteur normale, l'aire de la section mouillée  $A$ , la vitesse moyenne  $V$  de l'écoulement et le débit volume  $Q$ . D'un point de vue pratique, la constance de la vitesse  $V$  est généralement associée à celle de la vitesse moyenne; mais de façon plus rigoureuse, cela signifie que l'écoulement est caractérisé par une vitesse constante en tout point de son domaine. En d'autres termes, la distribution des vitesses dans chacune des sections transversales de l'écoulement est uniforme, correspondant à une couche limite pleinement développée; cet aspect du problème a été longuement étudié par plusieurs chercheurs (*Prandtl*, 1926; *Keulegan*, 1938; *Hama*, 1954; *Schlichting*, 1955; *Morris*, 1955; *Iwasa*, 1957). Bien que la condition d'un écoulement uniforme, dans le sens strict du terme, ne soit pratiquement jamais satisfaite, elle est cependant fréquemment admise lors du calcul des caractéristiques d'un écoulement en canaux et rivières (*Chow*, 1973). Cette approche simplifiée donne des résultats assez satisfaisants dans bon nombre de cas pratiques. Le calcul du coefficient de frottement  $f$  peut se faire par application de la formule de *Colebrook-White*. Celle-ci est applicable lorsque l'écoulement est en régime pratiquement lisse, de transition ou turbulent rugueux. Pour ce dernier régime d'écoulement, la relation de *Colebrook-White* mène à la relation de *Nikuradse*, en écrivant que le nombre de *Reynolds*  $R \rightarrow \infty$ . La relation de *colebrook* sera utilisée comme référence pour la comparaison entre les diverses formules.

A fin de répondre au mieux l'objectif de cette étude nous l'avons traité en deux grands chapitres :

Le premier chapitre a eu pour objectif de passer en revue les principales notions sur les pertes de charges et de mettre en lumière les principales relations exprimant le gradient hydraulique unitaire  $J$  en fonction des paramètres de l'écoulement.

---

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude comparative pour le calcul du gradient hydraulique  $J$  en fonction de plusieurs relations qui sont utilisées pour la comparaison sont Darcy om le coefficient de frottement est calculé par la relation de *Colebrook-wite* (1939) exigeant un aspect itératif, la relation de *Williams-Hazen* (1920) donnant un calcul directe du gradient hydraulique, la relation de Manning-Strickler et en fin la relation de *Achour-Bedjaoui* (2006).

**Chapitre 1****Notions sur les pertes de charge****1.1 Introduction**

L'écoulement d'un fluide réel dans une conduite représente une des applications classiques de l'hydrodynamique théorique et expérimentale. La maîtrise de ces écoulements pour le calcul du fonctionnement des réseaux d'eau potable est indispensable. On distingue deux types de perte de charge :

- La perte de charge linéaire représentant l'énergie perdue entre les deux points ;
- La perte de charge singulière qui intervient lorsque l'écoulement uniforme est localement perturbé.

**1.2.1 - Les pertes de charge linéaire****1.2.2- Profil des vitesses dans une section circulaire en charge**

Dans le cas d'un écoulement permanent  $\partial/\partial t = 0$ , le profil des vitesses dans une section est dépendant de l'intensité de la vitesse et de la géométrie de l'ouvrage. En effet, nous avons vu que la turbulence apparaît quand la vitesse dépasse un seuil (expérience de Reynolds, Figure 1.1). Ceci peut être représenté par la figure suivante :

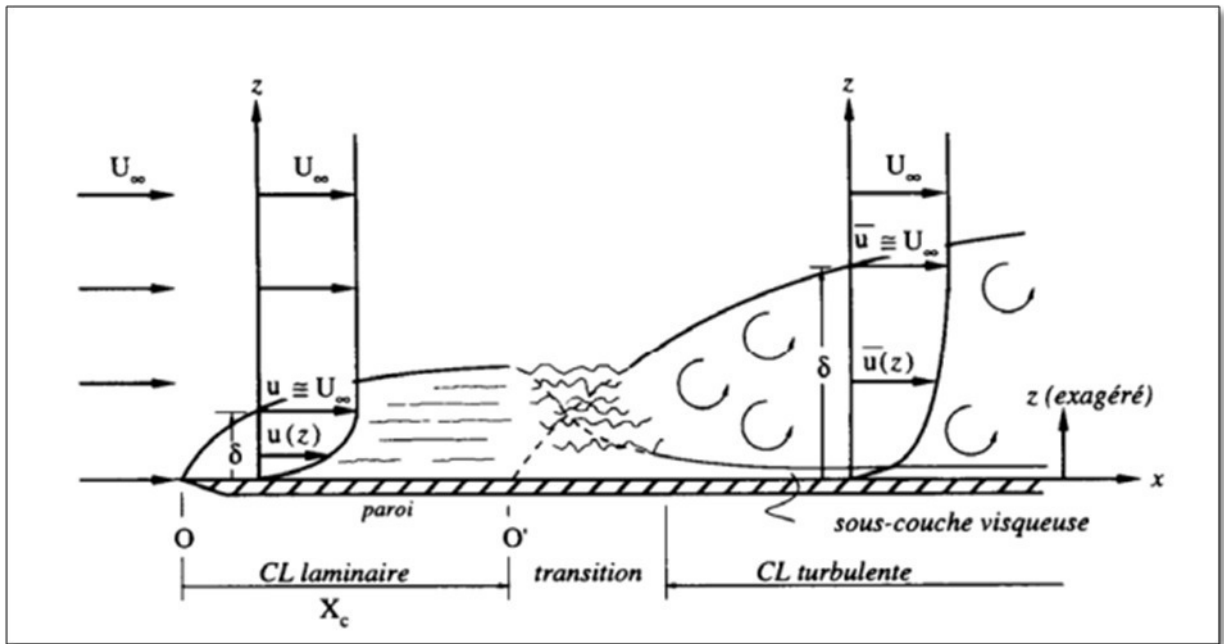


Figure 1.1 : Profil des vitesses dans une section circulaire en charge (expérience de Reynolds)

Dans la zone laminaire seules les forces de frottement interviennent. Dans la zone turbulente les forces de turbulence deviennent prépondérantes et une sous-couche visqueuse très mince apparaît.

Dans le cas des conduites en charge où l'écoulement est laminaire, seules les forces de viscosité interviennent ; le profil des vitesses est parabolique et est donné par la figure 1.2 :

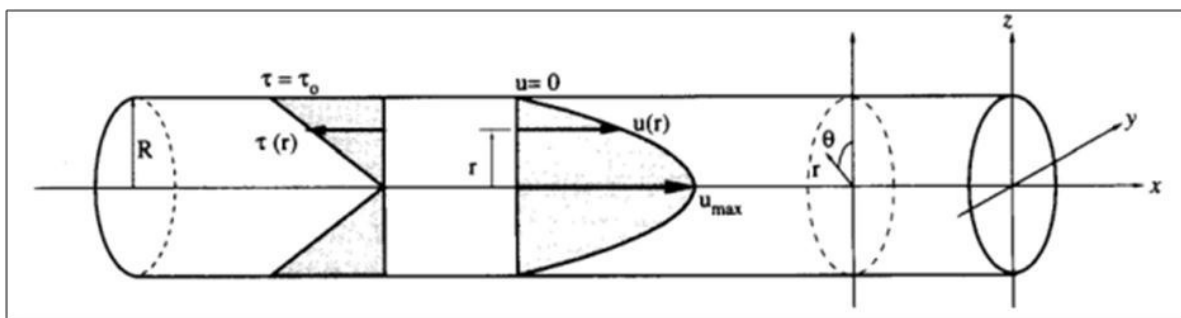
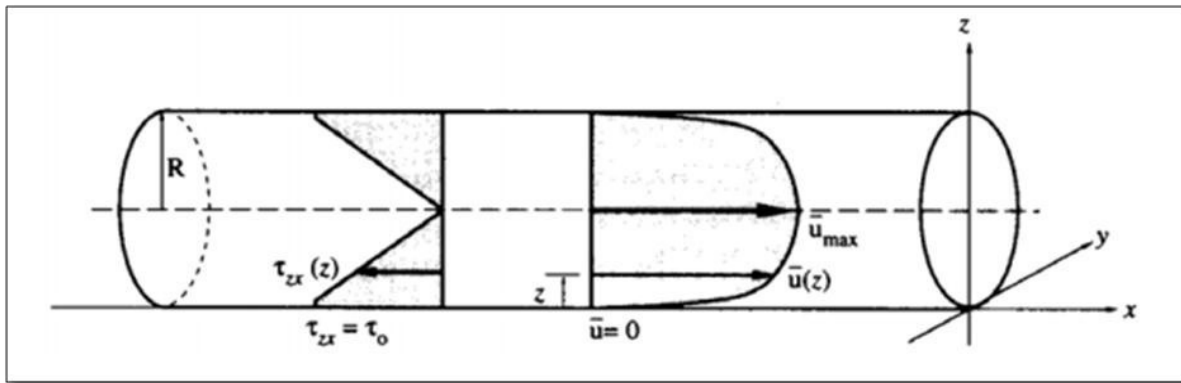


Figure 1.2 : le profil des vitesses est parabolique l'écoulement est laminaire

Dans le cas où l'écoulement est turbulent, le profil des vitesses tend à être uniformisé et est du type logarithmique.



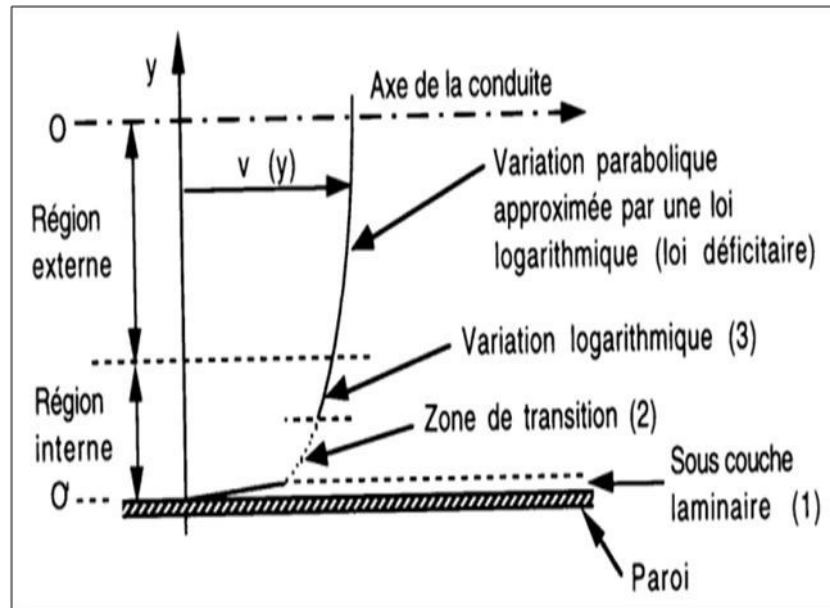
**Figure 1.3 :** le profil des vitesses est parabolique l'écoulement est turbulent

On constate une zone centrale (Figure 1.3) de pleine turbulence où le gradient de vitesse est très faible et le profil est aplati en son centre. La zone de la couche limite est de très faible épaisseur et proche de la paroi. Le gradient de vitesse est très important et les forces de viscosité sont donc très importantes dans cette couche. Une approche mathématique exacte n'est pas possible dans ce type d'écoulement complexe. Les relations qui seront construites sont toutes d'origines empiriques.

Deux types d'écoulements turbulents dans les conduites réelles (présentant des aspérités) existent :

- conduite hydraulique lisse : l'écoulement est séparé de la paroi par un film laminaire,
- conduite hydraulique rugueuse : la sous-couche laminaire disparaît et la turbulence arrive jusqu'à la paroi.

Décrivons le profil de l'écoulement le long d'un diamètre de conduite hydraulique lisse. On distingue habituellement deux régions : une région centrale dite externe qui correspond à plus de 90% de l'écoulement et une région voisine de la paroi dite interne.



**Figure 1.4 :** le profil de l'écoulement le long d'un diamètre de conduite hydraulique lisse

Dans la région centrale, très aplatie, la vitesse est indépendante des aspérités de la paroi et dépend peu de la viscosité. L'écoulement est formé de tourbillons importants, allongés, contenant des tourbillons plus petits. L'intensité de la turbulence est à peu près constante dans ce domaine. Dans la zone interne, voisine de la paroi, la vitesse passe d'une valeur élevée à zéro sur une distance relativement faible.

Le fort gradient de vitesse qui en résulte impose au fluide des contraintes de cisaillement élevées et donc d'intenses frottements visqueux. On comprend donc que la dissipation d'énergie qui entraîne une partie de la perte de charge ait lieu principalement dans cette zone. En revanche, l'intensité élevée de la turbulence se traduit par un accroissement important des transferts de quantité de mouvement entre particules de fluide, dans toutes les directions. Ces particules étant porteuses de chaleur, il en résulte des propriétés utilisables pour les transferts thermiques

La turbulence est mesurée par le nombre de Reynolds. Dans le cas des conduites circulaires le domaine laminaire et turbulent est différencié par une valeur de Nombre de *Reynolds*.

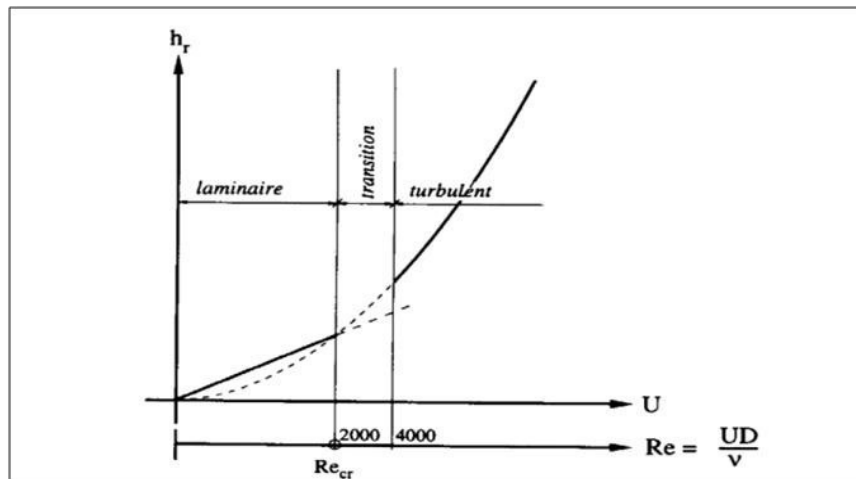


Figure 1.5 : La variation du débit ou de la vitesse dans un tuyau de  $D_{cst}$  p de charge  $h_r$

La variation du débit ou de la vitesse dans un tuyau de diamètre constant provoque une perte de charge. Cette dernière varie en fonction de la vitesse à peu près linéairement quand l'écoulement reste laminaire et quadratiquement quand l'écoulement est turbulent.

Entre les deux types d'écoulement il y a une zone de transition, c'est-à-dire une zone d'incertitude où il faut faire preuve de beaucoup de réserve Figure 1.5.

### 1.2.3- Expression de la perte de charge linéaire

Compte tenu des difficultés pour résoudre l'équation de Navier-Stokes, la perte de charge sera traduite par une équation empirique du type :

$$\Delta H = \lambda \frac{LU^2}{D2g} ; J = \frac{\Delta H}{L} = \lambda \frac{U^2}{D2g} \quad (1.1)$$

$\lambda$  : Coefficient de perte de charge. Il est sans dimension et est fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité de la paroi. (Parfois appelé  $f$ )

$L$  : Longueur de la conduite (m)

$D$  : Diamètre de la conduite (m)

$U$  : Vitesse moyenne (m/s)

$J$  : la perte de charge par unité de longueur (m/ml)

**1.2.3.1. - En régime laminaire  $Re < 2000$** 

En régime laminaire, seules les forces de viscosité interviennent. La vitesse est très faible et l'état de surface de la paroi n'intervient pas dans le calcul du coefficient  $\lambda$ , dans ce cas la  $\lambda$  est donnée par :

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

(1.2) On détermine ainsi :

Pour une conduite circulaire, on a :

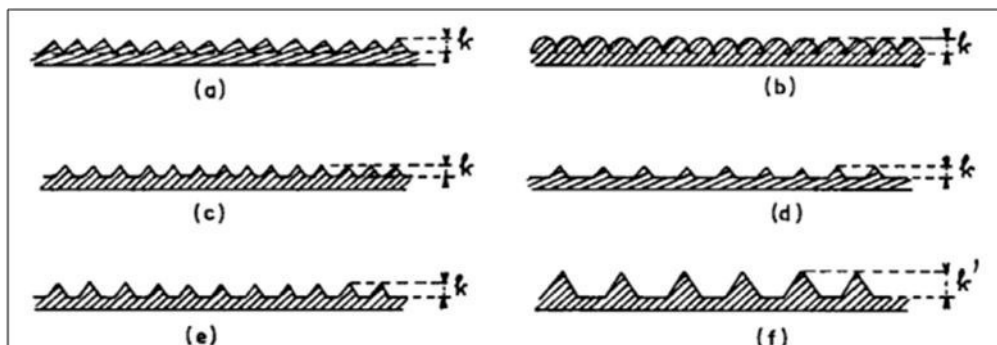
$$J = \frac{32 V U}{g D^2} \quad (1.3)$$

Pour un cas général le diamètre géométrique sera remplacé par le diamètre hydraulique  $D = D_h$

**1.2.3.2 - En régime turbulent  $Re > 4000$** 

Une surface rugueuse implique un état de surface telles que ses irrégularités ont une action directe sur les forces de frottement, c'est-à-dire qu'au delà d'un certain degré de rugosité la configuration géométrique de la surface exerce une influence bien déterminée sur l'écoulement. Dans le cas des écoulements en charge appliqués au domaine de l'ingénieur, la rugosité va jouer un rôle très important.

Une surface rugueuse peut être considérée comme étant constituée par une série de protubérances élémentaires. Elles sont caractérisées par une certaine hauteur  $k$  (désignée parfois par  $\epsilon$ ).



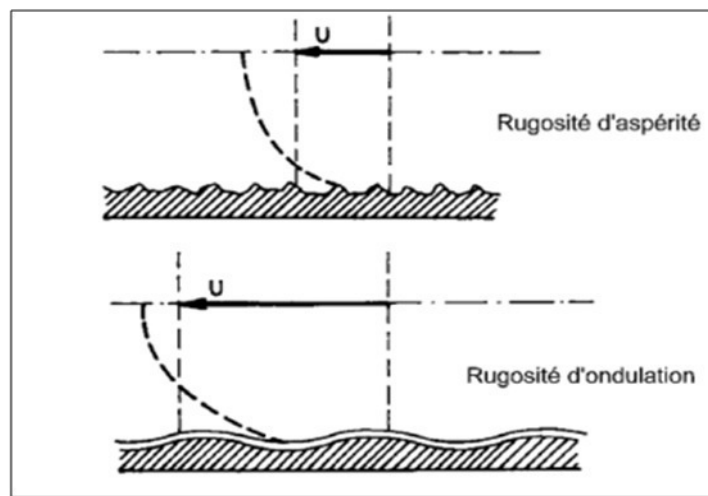
**Figure 1.6 :** les caractéristiques géométriques de la surface rugueuse ( $h_k ; \epsilon$ )



Cette rugosité peut être mesurée par rapport au diamètre de la conduite. On parle alors de

rugosité relative :  $\frac{K}{D} = \frac{\epsilon}{D}$

Si la rugosité est ondulée le film laminaire pourra, dans une certaine mesure, se modéliser sur les ondulations. Si au contraire elle présente des arêtes vives, le film sera aisément écorché puis déchiré par les aspérités, l'influence de la viscosité dans la couche limite sera diminuée et la turbulence fortement augmentée. Ceci se traduit par une vitesse moyenne réduite.



**Figure 1.7 :** Influence de la viscosité et le frottement augmenté sur la vitesse moyenne

Les surfaces auxquelles on a affaire dans la pratique (béton, acier, fonte) ne présentent pas des caractéristiques de rugosité uniforme. En effet, les protubérances de la surface sont inégales et irrégulièrement distribuées. Elles proviennent du rivetage, des recouvrements, des joints, des défauts sur la paroi, de corrosion, d'incrustations... On définit ainsi deux types de rugosité : lisse et rugueuse. La différence entre les deux dépend du nombre de *Reynolds*. Le tableau 1.1 regroupe des valeurs de la rugosité absolue pour des conduites de matériaux différents.

Tableau 1.1 : valeurs de  $\epsilon$  pour des conduites de matériaux différents ( AFICPAR, 2017)

Caractéristique	Rugosité $\epsilon$ en mm		
	Inferieur	supérieur	Normal
1- Galerie Roche non revêtue sur tout le périmètre. Roche revêtue seulement sur le seuil	100 10	1000 100	- -
2- Conduite en béton. très rugueuse : bois de coffrage : béton maigre avec des dégâts d'érosion ; joints imparfaitement alignés Rugueux : attaquée par les matériaux anguleux entraînés; empreintes de coffrage visibles Granuleuse : surface lissée a In taloche en bon en. joints bien exécutés ' Centrifugée : (en tuyaux). Lisse : coffrages métalliques neufs ou presque neufs; finissage moyen avec des joints bien soignes Très lisse: neuve, parfaitement lisse. coffrages métalliques; finissage parfait. par des ouvriers qualités et joints bien origines.	0.6 0.4 0.18 0.15 0.6 0.015	3.0 0.6 0.4 0.5 0.18 0.6	1.5 0.5 0.1 0.3 0.3 0.03
3. Conduite en acier : bout soudé. intérieur continue. Incération ou tuberculisation considérables. tuberculisation générale, 1 a 3 mm. Penture a la brosse avec de l'asphalte, émail ou bitume, en couche épaisse. Rouille légère. Conduits plongée dans l'asphalte chaud. Revêtîmes en béton centime. Revêtement en émail centrifuge. Bitume Natural (gelsonite) appliqué au pistolet. i { froid de 0. 4 mm d'épaisseur. Email bitumineux (goudron de houille), appliqué a la brosse de 2a 2.5 mm d'épaisseur. Idem, appliqué a la truelle. idem, a chaud lissé a la flamme	2.4 0.9 0.3 0.15 0.06 0.05 0.01 - - - -	12.2 2.4 0.9 0.3 0.15 0.15 0.3 - - - -	7.0 1.5 0.6 0.2 0.1 0.1 0.06 0.042 0.040 0.030 0.012
4- Conduite en acier élément rivés l'un a l'autre). (.joints écartés de 5 a 10 mm soudure incrustation) ou tuberculisation considérables tuberculisation générale. 1 a 3 mm Rouillée Penture a la bitume avec de l'asphalte ou bitume, en couche épaisse Conduit» plongée dam l'asphalte chaud ou peinte 5 la brosse avec du graphite Conduits neuve avec de l'émail center figue	2.4 0.9 0.3 0.15 0.06 0.015	12.2 3.7 1.4 1.8 0.9 0.6	8.0 2.5 1.0 1.5 0.6 0.4
5- Conduite en acier: élément rivé transversalement ct. longitudinalement. (Joints transversaux écartés de (1 ,8 a 2,4 m) Incrustations on tuberculisations considerable tuberculisation générale, 1 a 3 mm: 3 rangs de rivets dans les joints transversaux	6.0 4.6	12.2 6.0	9.0 5.0
2 rangs de rivets dans les joints transversaux 11 1 rang de rivets dans les joints transversaux: Surface de la conduit assez lisse :	3.0 2.1	4.6 3.0	3.5 2.5

- 3 range longitudinaux de rivets			
- 3 range transversaux	1.8	2.1	2.0
- 2range transversaux	1.5	1.8	1.6
- 1range transversaux	1.1	1.5	1.3
- 2 range longitudinaux de rivets			
- 3 range transversaux	1.2	1.5	1.3
- 2 range transversaux	0.9	1.2	1.1
- 1 range transversaux	0.6	0.9	1.2
- 1 range longitudinaux de rivets	0.8	1.1	1.0
- 3 range transversaux	0.5	0.8	0.6
- 2 range transversaux	0.3	0.5	0.4
- 1 range transversaux			
6- Conduites en bois. Végétation excessive sur la paroi. Doutes roqueuse avec joints saillants	0.3	3.5	3.2
En service, en bon état	0.12	0.3	0.2
Neuve. excellente construction	0.03	0.12	0.07
7- Tuyaux en amiante ciment		0.025	0.015
8 -Tuyaux en fer. Fer forgé rouillé.	0.15	3.0	0.6
For galvanisé, fonte revêtue	0.06	0.3	0.15
fonte. non revêtue, neuve	0.25	1.0	0.5
fonte avec corrosion.	1.0	3.0	1.5
fonte avec dépôt.	1.0	4.0	1.2
9-tuyau en Grés. : Avec des joints très bien alignés	0.06	-	
tuyau de 1.0m:D<600 mm	-	0.3	0.15
D>600 mm	-	0.6	0.3
De 0,6m:D<300 mm	-	0.3	0.15
D>300mm	-	0.6	0.3
10- Tuyaux d'égout en service. quand les matériaux neufs out den rugosités inférieure a celles qui sont	6.0 60.0	30 300	15 150
11-Matériaux Lisse Laiton cuivre plomb	0.04	0.010	0.007
Aluminium	0.0015	0.005	0.004
12-Matériaux ultra lisses Ver	0.001	0.002	-
Polyuréthane+époxy appliqué au pistolet son air et a la température ambiant de 0.1 a 0.2 mm d'épaisseur (sont joint)	0.002	0.004	-
Vinyle ( acétochlorure de polyvinyle ou polychlorure de vinyle (idem))	0.003	0.004	-
Aral dite époxy. Idem	0.0025	0.002	-

Le calcul de la perte de charge linéaire va donc prendre en compte le nombre de Reynolds

et la rugosité de la conduite. Le choix se fait en fonction de la turbulence c'est-à-dire de la valeur du nombre de *Reynolds*.

**1.2.3.3 - Régime turbulent en tuyau lisse**  $4000 < Re$  et  $\frac{\epsilon R_e \sqrt{\lambda}}{D} \leq 12$

Dans cette zone, la turbulence est encore modérée. L'épaisseur de la sous-couche limite est suffisante pour englober toutes les aspérités de la conduite qui se comporte dès lors comme un tuyau lisse. Deux expressions empiriques sont souvent utilisées:

- *Formule de Blasius* :

$$\lambda = (100R_e)^{-0.25} \quad (1.4)$$

- *Formule implicite de Von Karman*:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2. \log_{10} \left( \frac{R_e \sqrt{\lambda}}{2.51} \right) \quad (1.5)$$

**1.2.3.4 - Régime turbulent en tuyau rugueux** :  $\frac{\epsilon R_e \sqrt{\lambda}}{D} \geq 200$

La turbulence devient très importante et  $\lambda$  ne dépend plus que de  $\frac{\epsilon}{D}$ , dans ce régime *Nikuradse* propose pour le calcul de  $\lambda$  la relation suivante :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left( \frac{\epsilon}{3.71D} \right) \quad (1.6)$$

#### 1.2.4 - Les pertes de charge singulière

La perte de charge singulière, localisée dans une section de la conduite, est provoquée par un changement de direction et d'intensité de la vitesse.

L'écoulement uniforme est perturbé et devient localement un écoulement non uniforme.

La turbulence joue un rôle considérable, alors que les forces de viscosité sont négligeables. La perte de charge n'a donc lieu qu'en régime turbulent. Une telle non-uniformité de la vitesse peut être provoquée par :

- un branchement de section de la conduite,
- un changement de direction (coude),

- un branchement ou raccordement,
- un dispositif de mesure et contrôle de débit...

Comme pour les pertes de charge linéaire, les pertes de charges singulières se traduisent par la relation :

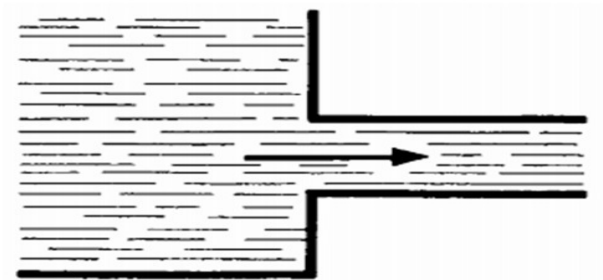
$$\Delta H = K \frac{V^2}{2g} \tag{1.7}$$

**K** est fonction des caractéristiques géométriques de la singularité et du nombre de *Reynolds*. La valeur de **K** est donnée pour les différents cas les plus classiques dans le tableau 1.2 :

**Raccordement d'une conduite avec un grand réservoir**

*Départ*

Sans saillie à l'intérieur du réservoir, avec raccordement à angles vifs



K = 0.5

Sans saillie à l'intérieur du réservoir, avec raccordement à angles vifs



K = 1

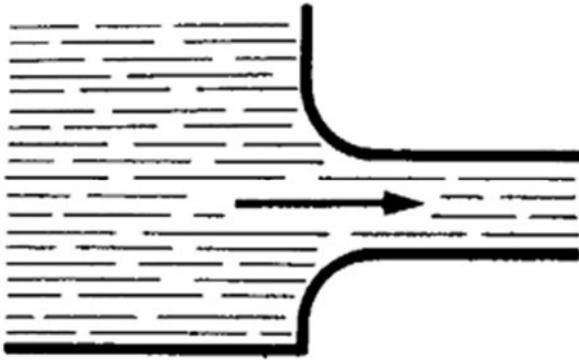
Avec saillie à l'intérieur du réservoir



$$K = 1$$

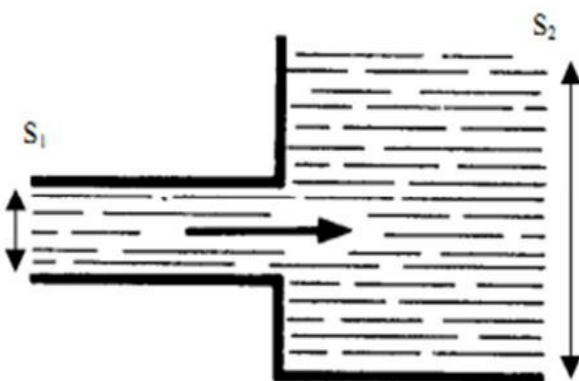
Comprise entre 1 et 2 fois le diamètre

Sans saillie à l'intérieur du réservoir, avec raccordement de profil arrondi



$$K = 0.05$$

Arrivée



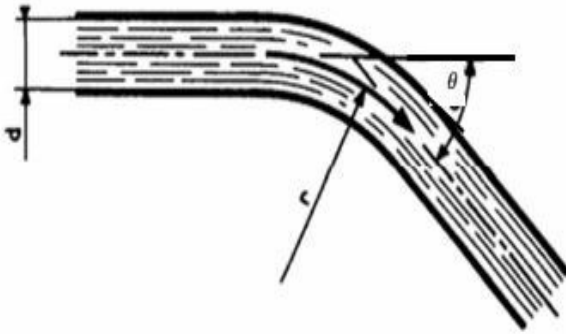
$$K = 1$$

$$K = K = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 + \frac{1}{9} \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2$$

$$S_2 \gg S_1 \Rightarrow K = 1$$

Coudes

Arrondi



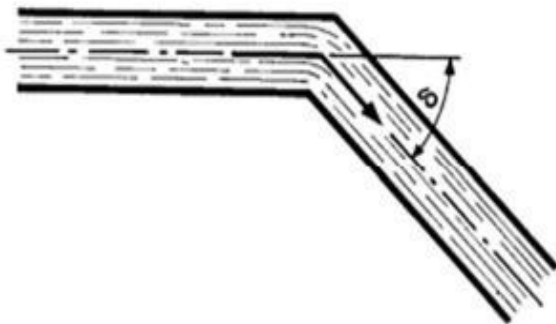
$$K = \left( 0.131 + 1.847 \left( \frac{D}{2R_0} \right)^{3.5} \right) \frac{\delta}{90^\circ}$$

$\delta$  en degrés

fonction des caractéristiques géométriques et du nombre de Reynolds

R/d ⇒	1	1.5	2	2.5	3
$\delta$ (°)					
11.25	0.037	0.021	0.018	0.017	0.017
22.5	0.074	0.043	0.036	0.034	0.034
30	0.098	0.057	0.048	0.046	0.045
45	0.147	0.085	0.073	0.069	0.067
60	0.196	0.114	0.097	0.092	0.090
90	0.294	0.170	0.145	0.138	0.134
180	0.589	0.381	0.291	0.275	0.269

Brusque

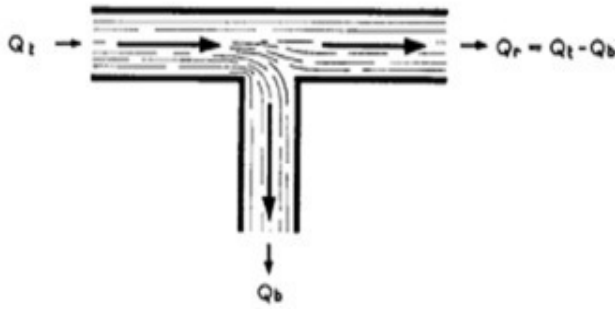


K est indépendant du diamètre

$\delta$ (°)	22.5	30	45	60	90
K	0.07	0.11	0.24	0.47	1.13

**Tés**

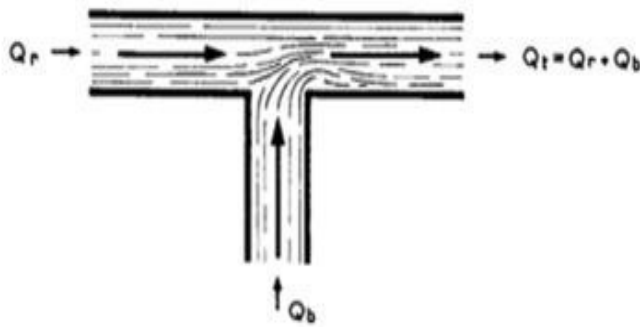
Branchement de prise à 90° de même diamètre et à angles vifs



$$\Delta H_b = K_b \frac{v_t^2}{2g}$$

$Q_b/Q_t$	$Q_b/Q_t \rightarrow 0$	0.2	0.4	0.6	0.8	$Q_b/Q_t \rightarrow 0$
$K_t$	0.40	0.26	0.15	0.06	0.02	0.00
$K_b$	1.00	1.01	1.05	1.15	1.32	1.45

Branchement d'amenée à 90° de même diamètre et à angles vifs



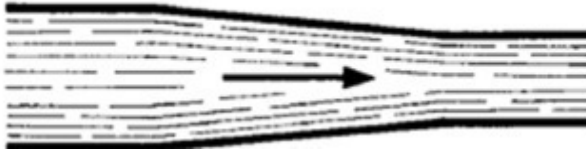
$$\Delta H_b = K_b \frac{v_t^2}{2g}$$

$Q_b/Q_t$	$Q_b/Q_t \rightarrow 0$	0.1	0.0	0.4	0.8	$Q_b/Q_t \rightarrow 0$
$K_t$	0	0.16	0.27	0.46	0.60	0.55
$K_b$	-0.60	-0.37	-0.18	0.26	0.94	1.20



Cônes

Convergent



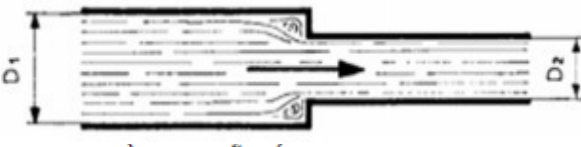
$$\text{Divergent } K = 3,2 \cdot \left( \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)^{1,25} \left( 1 - \frac{D_1}{D_2} \right)^2$$



$\left(\frac{D_1}{D_2}\right)$	$\theta$	3	6	8	10	12	14	16	20	24	30	40
0		0.03	0.08	0.12	0.15	0.19	0.23	0.28	0.37	0.46	0.62	0.90
0.05		0.03	0.07	0.10	0.14	0.17	0.12	0.25	0.33	0.42	0.56	0.82
0.1		0.03	0.06	0.09	0.12	0.16	0.19	0.22	0.30	0.37	0.50	0.73
0.2		0.02	0.05	0.07	0.10	0.12	0.15	0.18	0.23	0.30	0.39	0.58
0.3		0.02	0.04	0.06	0.07	0.09	0.11	0.13	0.18	0.23	0.30	0.44
0.4		0.01	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08	0.10	0.13	0.17	0.22	0.33
0.5		0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.09	0.12	0.15	0.23
0.6		0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.06	0.06	0.07	0.10	0.14

Changement brusque de diamètre

Rétrécissement



D <sub>1</sub> /D <sub>2</sub>	0.01	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
K	0.500	0.495	0.480	0.455	0.420	0.375	0.320	0.255	0.180	0.095

Elargissement



D <sub>1</sub> /D <sub>2</sub>	0.01	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
K	1.000	0.980	0.922	0.829	0.708	0.569	0.424	0.287	0.175	0.109

### 1.3 Formules utilisées pour l'évaluation du gradient hydraulique

#### 1.3.1 Formules anciennes

##### 1.3.1.1 Relation de Darcy-Weisbach

La formule de *Darcy-Weisbach* exprime la proportionnalité entre le gradient de la perte de charge **J**, la vitesse moyenne *V* de l'écoulement et le diamètre hydraulique  $D_h = 4A/P = 4R_h$ . Le facteur de proportionnalité étant le coefficient de frottement *f*. Le gradient **J** est inversement proportionnel à  $D_h$  et proportionnel au carré de la vitesse *V* :

$$j = \frac{fV^2}{D_h 2g} \tag{1.8}$$

La formule (1.8) est aussi bien valable pour les canaux ouverts que pour les conduites fermées.

Le coefficient de frottement *f* peut être évalué par diverses relations, selon la nature du régime d'écoulement. La formule de *Colebrook-white* permet d'évaluer le coefficient de frottement *f* lorsque l'écoulement est en régimes de transition, turbulent rugueux et lisse :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon/D_h}{3.7} + \frac{2.51}{R\sqrt{f}} \right) ; R > 2300 \tag{1.9}$$

Dans le cas où le régime d'écoulement est de transition, le coefficient de frottement dépend à la fois de la rugosité relative  $\varepsilon/D_h$  et du nombre de Reynolds  $R$ . La représentation graphique de la relation (1.9) dans un système d'axes de coordonnées à divisions logarithmiques montre que, pour la même valeur de  $\varepsilon/D_h$ , le coefficient de frottement  $f$  diminue lorsque  $R$  augmente. Pour des valeurs données de  $\varepsilon/D_h$  et de  $R$ , l'évaluation du coefficient de frottement  $f$ , par application de la relation (1.9), nécessite un procédé itératif. Une excellente relation approchée de (1.10) a été proposée par Achour (Achour, 2002):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D_h}{3.7} + \frac{4.5}{R} \log \frac{R}{6.97} \right) \quad (1.10)$$

Où :

- $D_h$  : Diamètre Hydraulique (m)
- $R$  : Nombre de Reynolds
- $\varepsilon$  : Rugosité absolue de la paroi interne de la conduite (m)

### 1.3.1.2 Formule de Manning-Strickler

La vitesse moyenne  $V$  de l'écoulement uniforme peut être également évaluée par la formule dite de Manning (1891). La vitesse  $V$  est liée au coefficient  $C$  de résistance de l'écoulement, au rayon hydraulique  $R_h$  et à la pente  $J$  du canal. A l'origine, la formule de *Manning-Strickler* se présentait sous une forme compliquée, puis elle a été simplifiée pour s'écrire, avec  $C = k$  :

$$V = k R_h^{2/3} \sqrt{J} \quad (1.11)$$

La relation (1.11) a été ensuite modifiée par plusieurs auteurs pour s'écrire, en unité métrique :

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} \sqrt{J} \quad (1.12)$$

( $n$  selon Manning et  $1/n = k$  selon Strickler).

La conversion en unité anglaise de la relation (1.11) donne :

$$V = \frac{1.486}{n} R_h^{2/3} \sqrt{J}$$

L'équation (1-11) peut s'écrire aussi sous une autre forme pour exprimer le gradient unitaire ou bien le gradient hydraulique  $J$  pour une conduite en charge ( $R_h=D/4$ ) :

$$J = \frac{10.29 \cdot Q^2}{K_s^2 D^{5.33}} \quad (1-13)$$

Avec :

$Q$  : Débit volume écoulé par la conduite ( $m^3/s$ )

$D$  : Diamètre de la conduite (m)

$K_s$ : coefficient de rugosité de *Manning-Strickler*

Dans cette conversion, la valeur numérique du coefficient de rugosité  $n$  reste inchangée et la même valeur est utilisée dans les deux systèmes d'unité. Comme l'exige la forme de la relation (1.8), le coefficient  $n$  doit avoir pour dimension  $[TL^{-1/3}]$ . Cependant, il paraît physiquement injustifié que la dimension de temps  $T$  puisse intervenir dans l'unité d'une rugosité puisqu'elle celle-ci ne devrait dépendre que de la nature du matériau constituant les parois du canal considéré. Pour cette raison, certains auteurs énoncent que le numérateur de la relation (1.8) devrait contenir le terme  $\sqrt{g}$ , où  $g$  est l'accélération de la pesanteur, ce qui conduirait à donner à  $n$  la dimension  $[L^{1/6}]$ . En outre, il a été démontré que le coefficient de rugosité  $n$  pouvait s'écrire:  $n = [\phi (R_h/\varepsilon)^{1/6}]$

Où  $\varepsilon$  est la rugosité absolue. Si la fonction doit être  $\phi (R_h/\varepsilon)$  considérée comme étant adimensionnelle, le coefficient de rugosité  $n$  doit alors avoir la même dimension que  $\varepsilon^{1/6}$ , c'est à dire  $[L^{1/6}]$ . *Hager* (1989) a pu montrer que la rugosité absolue  $\varepsilon$  et le coefficient  $k$  de Strickler sont liés par la relation :

$$\frac{K_s^{1/6}}{8.2\sqrt{g}} = 1 \quad (1.14)$$

D'autre part, il est également possible d'admettre que le terme  $1,486/n$  figurant dans la relation (1.14) puisse contenir de manière implicite la dimension  $[L^{1/3} T^{-1}]$ , ou que  $\phi (R_h/\varepsilon)$  Contienne un facteur ayant une dimension. Ceci rendrait alors le coefficient  $n$  adimensionnel. Sous cette dernière condition, la conversion en unité anglaise conduit à la constante  $(3,2808)^{1/3} = 1,486$ , puisque  $1m = 3,2808$  ft.

### 1.3.1.3 Formule de Lechapt et Calmon

La formule de *colébrook* ne permet pas un calcul direct du coefficient de perte de charge. Aussi dans un but de simplification et pour permettre un calcul aisé de la perte de charge linéaire  $j$  sur ordinateur, MM. LECHAPT et CALMON ont établi des formules du type :

$$J = L \frac{Q^M}{D^N} \quad (1.15)$$

Où :

L, M et N sont invariants pour une valeur donnée de la rugosité  $k$ .

*Lechapt et Calmon*: Permet de connaître une des trois dimensions suivantes, connaissant les deux autres : Longueur L, débit Q, géométrie (D pour conduite circulaire).

**Tableau 1.2** : Correspondances entre le coefficient  $K$  et les paramètres de la formule de LECHAPT et CALMON ( Conçu et réalisé par David Dorchies, Gilles Belaud )

Domaine d'application (à titre indicatif) coefficients	Coefficient de rugosité selon COLEBROOK	Coefficients de LECHPT et CALMON		
	k	L	M	N
Fonte et acier non revêtus béton grossier, eau moyennement corrosive	2	1.863	2	5.33
Fonte et acier non revêtue eau peu corrosive	1	1.601	1.975	5.25
Fonte et acier avec revêtement ciment centrifugé	0.25	1.16	1.93	5.11
	0.1	1.1	1.89	5.01
Polyéthylène, PVC	0.05	1.049	1.86	4.93
	0	1.01	1.84	4.88

Malgré leur extrême simplicité, ces formules ne donnent, pour des vitesses comprises entre 0.4m/s et 2m/s, qu'un écart relatif maximum de l'ordre de 3% par rapport à la loi de *Colébrook*.

### 1.3.1-4 Équation de Prony

L'équation de Prony est une importante équation très utilisée en hydraulique. Elle permet de calculer la perte de charge due à la friction dans une conduite. C'est une équation empirique développée par *Riche de Prony* au XIX<sup>e</sup> siècle :

$$h_f = L/D (aV + bV^2) \quad (1.16)$$

où  $h_f$  représente la perte de charge due à la friction; calculée à partir du rapport de la longueur de la conduite sur son diamètre  $L/D$ , la vitesse du flux  $V$ , et deux facteurs empiriques  $a$  et  $b$  tenant compte de la friction. Cette équation est aujourd'hui supplantée par l'équation de *Darcy-Weisbach*.

### 1.3.2 Relations modernes

#### 1.3.2-1 Formule de Williams-Hazen

Une autre expression de la perte de charge unitaire  $J$  est la formule de *Hazen-Williams*, donnée par :

$$h_L = \frac{C_f L}{C_{HW}^{1.852} D^{4.87}} Q^{1.852}$$

Avec :

$h_L$ : perte de charge due au frottement (m)

$L$  : distance entre la section 1 et 2 (m)

$C_{HW}$ : coefficient de Hazen-Williams (Tableau 1.3)

$D$ : diamètre (m)

$Q$  : débit dans la conduite ( $m^3/s$ )

$C_f$ : facteur de conversion d'unité (10.675 S.I)

Pour l'expression du gradient hydraulique l'expression (1.17) devient :

$$J = 10,675 \left( \frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1.852} \frac{1}{D^{4.87}} \quad (1.17)$$

Au lieu d'employer un facteur de frottement, la formule de *Hazen-Williams* de capacité de transport de la conduite ( $C_{WH}$ ) des conduites plus lisses (avec des capacités de charge plus élevées) et les valeurs de  $C_{WH}$  inférieures décrivent des conduites plus rugueuses.

Le tableau 1.3 présente les valeurs de  $C_{WH}$  fréquemment utilisée, en particulier en *Amérique Hazen-Williams*

Tableau 1.3 : Valeurs Coefficient de Hazen Williams  $C_{WH}$ , Lamont (1981)

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

D'autres valeurs pour le coefficient CHW sont portées dans le tableau 1.4

Tableau 1-4 : Coefficient de Hazen Williams, Lamont (1981) ; (Soutter, 2007)

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

Le tableau 1.5 exprime les valeurs de correspondance entre les différents coefficients de Williams-Hazen  $C_{HW}$  et de *Manning-Strickler*  $K_s$  en se référant a la rugosité absolue  $\epsilon$  de la paroi interne d'une conduite.

Tableau 1.5 : 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

**1.3.2-2 Formule d'Achour –Bedjaoui (2006)**

La formule proposée par Achour et Bedjaoui (2006) constitue la solution exacte la relation implicite (1.9) de Colebrook-white. Le coefficient de frottement  $f$  est exprimé sous la forme explicite suivante:

$$f = \left[ -2 \log \left( \frac{\mathcal{E}/D}{3.7} + \frac{10.04}{\bar{R}} \right) \right]^{-2} \tag{1.18}$$

Le paramètre  $R$  figurant dans la relation (1.18) représente le nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement dans un modèle rugueux de référence. Celui-ci est une conduite circulaire sous pression de rugosité relative arbitrairement choisie égale  $3,7 \cdot 10^{-2}$ . La relation exacte de  $R$  n'a pas encore été établie, mais une relation approché a cependant été proposé par Achour et Bedjaoui (2006) qui montrent que  $R$  est fonction de la rugosité relative  $\mathcal{E}/D$  et du nombre de Reynolds  $R$  caractérisant l'écoulement dans la conduite considéré :

$$\bar{R} = 2R \left[ -\log \left( \frac{\mathcal{E}/D}{3.7} + \frac{5.5}{R^{0.9}} \right) \right]^{-1} \tag{1.19}$$

Ainsi, lorsque la rugosité relative  $\mathcal{E}/D$  et le nombre de Reynolds  $R$  sont les paramètres connus du problème, l'usage simultané des relations (1.18) et (1.19) permet alors d'évaluer de manière explicite le coefficient de frottement  $f$  recherché. Les relations (1.18) et (1.19) sont applicables dans



tout le domaine de l'écoulement turbulent et couvrent ainsi l'ensemble du diagramme de *Moody*. Afin de mieux apprécier la validité de la relation (4), celle-ci a été comparé la relation (1.9) de *Colebrook-white* pour  $R \geq 2300$  et  $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,05$ . Les résultats issus de cette comparaison ont été graphiquement représentés dans le système d'axes de coordonnées à divisions semi logarithmiques de la figure 1.2.

En éliminant le coefficient de frottement  $f$  entre les relations (1.8) et (1.19), le gradient  $J$  de la perte de charge linéaire s'exprime par :

$$J = \frac{Q^2}{2\pi^2 D^5} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{10,04}{R} \right) \right]^{-2} \quad (1.20)$$

Rappelons que le nombre de *Reynolds*  $\bar{R}$  est donné par la relation (1.19). La relation (1.20) est applicable dans tout le domaine de l'écoulement turbulent correspondant à  $R > 2300$  et couvre la large gamme  $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,05$ . Elle occasionne une erreur relative maximale de 0,4%, qui se réduit à 0,2% pour les valeurs du nombre de *Reynolds*  $R \geq 4000$ .

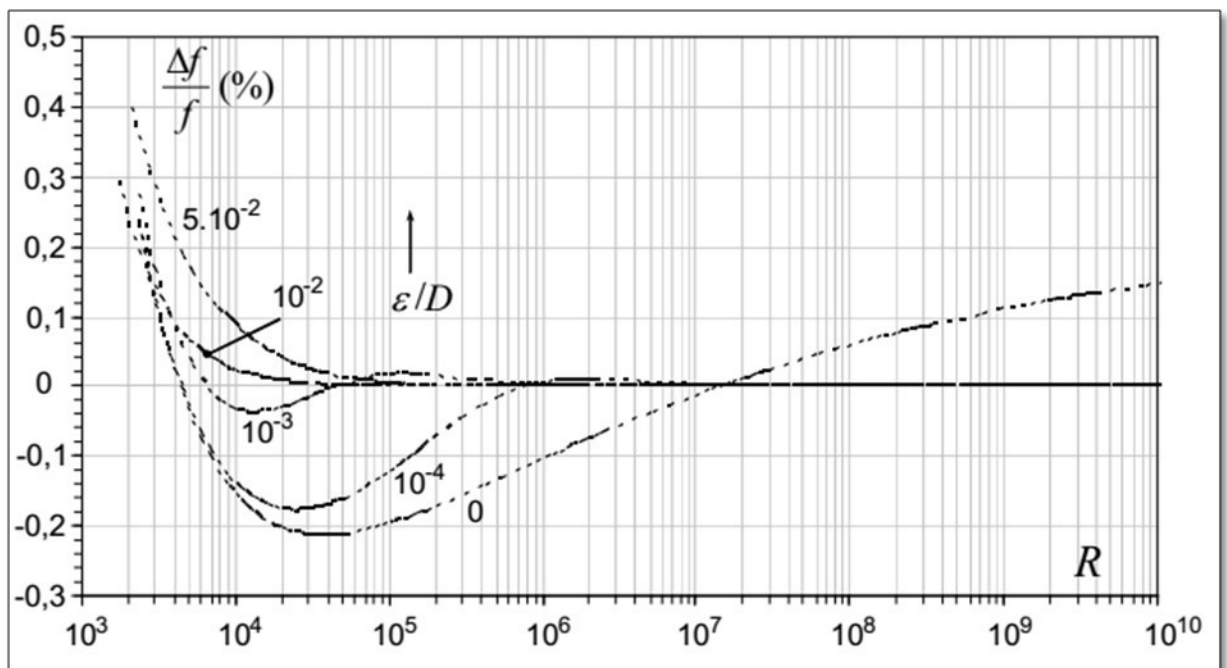


Figure 1.8 : Comparaison entre les relations (1.9) et (1.18)

La figure 1.2 montre clairement que l'Écart relatif maximal  $(\Delta f) / f$  entre les relations (1.9) et (1.18) est inférieur à 0,4% dans tout le domaine de l'écoulement turbulent. Cet Écart maximal est obtenu

pour  $R = 2300$  et pour la plus forte rugosité relative  $\varepsilon/D = 0,05$ . L'écart  $(\Delta f)/f$  diminue au fur et à mesure que le nombre de *Reynolds*  $R$  augmente et que la rugosité relative  $\varepsilon/D$  diminue.

### **1.4 Conclusion**

Le présent chapitre a eu pour objectif de passer en revue les principales notions sur les pertes de charges et de mettre en lumière les principales relations exprimant le gradient hydraulique unitaire  $J$  en fonction des paramètres de l'écoulement.

La majorité des relations exposées sont à caractère empirique et la plus utilisée est celle de *Darcy-Weisbach* où le coefficient de frottement  $f$  est exprimé par la relation de *Colebrook-white* malgré son aspect itératif elle reste la plus universelle et une référence.

D'autres chercheurs ont essayé de résoudre ce problème d'itérations exigé par la relation de *Colebrook-white* on en cite *Achour-Bedjaoui 2006*, *Saad Bénis 2004*, *Swamee et Jain 1976*, mais la relation de *Achour-Bedjaoui 2006* reste la solution la plus exacte de la relation de *Colebrook-white*.

Une autre relation intéressante pour l'évaluation du gradient hydraulique est celle de *Williams-Hazen* beaucoup utilisée dans les pays Anglo-saxon, cette relation présente un avantage dû à son aspect explicite où le coefficient de frottement n'intervient pas dans le calcul du gradient mais son inconvénient est son recours à l'utilisation d'un coefficient portant le nom des auteurs où le choix de sa valeur est un handicap car plusieurs auteurs préconisent des valeurs différentes pour un même matériau.

La relation proposée par *Achour-Bedjaoui 2006* pour l'évaluation du gradient hydraulique reste la plus exacte et valable dans le domaine  $0 \leq \varepsilon / D \leq 0,05$  et  $R \leq 4000$

Le chapitre suivant sera consacré à une étude comparative pour le calcul du gradient hydraulique  $J$  en fonction de plusieurs relations qui sont de la possibilité d'exprimer les différents coefficients (*Darcy-weisbach*, *Manning-Strickler*, *Williams-Hazen* ; *Achour-Bedjaoui*).

**Chapitre 2**  
***Etude comparative pour le calcul du gradient hydraulique***  
***par voie expérimental***

**2.1 Introduction**

Le présent chapitre sera consacré à une étude comparative pour l'évaluation du gradient hydraulique  $J$  en utilisant les relations de *Darcy-Weisbach* ; *Achour-Bedjaoui*, *Williams-Hazen* et pour le calcul du coefficient de frottement  $f$  il sera bien bénéfique d'utiliser les relations de *Colebrook-white (1939)*, de *Achour-Bedjaoui (2006)*.

Les résultats obtenus sur le calcul du gradient seront comparés à ceux obtenus par essais expérimentaux.

Les données utilisées sont celles issues d'essais expérimentaux ayant concernés 12 conduites circulaires de diamètre respectif: 49/50, 49/60, 60/63, 69/80, 77/80, 87/90, 49/50, 56/60, 121/125, 107/110, 124/130, 130/146 mm. Chacune de ces conduites a fait l'objet d'essais dans une large gamme des débits volumes  $Q$ . Pour chaque débit obtenu par manipulation de la vanne de réglage la perte de charge linéaire  $\Delta h$  a été déterminée par lecture sur le tableau manométrique du protocole expérimental.

**2.2 Données expérimentales**

Les gammes des débits testés ont fait l'objet d'une analyse visant à définir la nature du régime d'écoulement dans les conduites testées.

Selon les possibilités expérimentales, dépendantes fortement des débits fournis par la pompe et des diamètres des conduites, les régimes d'écoulement turbulent rugueux, de transition et pratiquement lisse ont été obtenus et répartis comme c'est indiqué dans le tableau .1:

Tableau 2.1 : Conduites testées lors des essais expérimentaux

N°	Diamètre D (mm)	Nature de la Conduite	Débit $Q$ ( l/s)	Régime observé
01	49/60	Plexiglas	$4.04 \leq Q \leq 12,33$	Pratiquement lisse
02	69/ 80	Plexiglas	$3.73 \leq Q \leq 22.63$	Pratiquement lisse
03	60/ 63	PVC	$3.73 \leq Q \leq 13.74$	Pratiquement lisse
04	77/ 80	PVC	$6.15 \leq Q \leq 21.26$	Pratiquement lisse
05	107/110	PVC	$9.41 \leq Q \leq 34.09$	Pratiquement lisse
06	121/125	PVC	$15.11 \leq Q \leq 43.65$	Pratiquement lisse
07	86 /90	Acier	$7.55 \leq Q \leq 24.74$	turbulent rugueux
08	49/50	Aluminium	$1.72 \leq Q \leq 8.88$	turbulent rugueux
09	49/50	Acier Galvanisé	$1.72 \leq Q \leq 7,77$	turbulent rugueux
10	56/60	Acier Galvanisé	$1.78 \leq Q \leq 6,22$ $6,22 \leq Q \leq 12,44$	Reg de Transition turbulent rugueux
11	124/130	PVC	$19.55 \leq Q \leq 40.69$	Turbulent rugueux
12	130/140	PVC	$13.78 \leq Q \leq 43.95$	Transition

Nous pouvons observer que:

1. Les débits ont pu être variés, pour l'ensemble des régimes d'écoulement (turbulent rugueux, de transition et pratiquement lisse) dans la gamme suffisante  $1.72 \text{ l/s} \leq Q \leq 43.95 \text{ l/s}$ .
2. Le régime d'écoulement de transition a pu être observé dans la conduite de diamètre  $D = 130/140 \text{ mm}$ , dans la gamme relativement réduite  $13.78 \leq Q \leq 43.95 \text{ l/s}$ .
3. Le régime d'écoulement turbulent rugueux a pu être observé dans les conduites de diamètres 49/50 (acier), 56/63, 49/50 (galvanisé), 87/90, 124/130, dans la gamme largement suffisante  $1.72 \text{ l/s} \leq Q \leq 43.95 \text{ l/s}$ .
4. Le régime d'écoulement pratiquement lisse a pu être observé dans les conduites de diamètre  $D=49/60, 69/80, 60/63, 77/80, 107/110, 121/125 \text{ (mm)}$ , et dans la gamme acceptable  $3.73 \text{ l/s} \leq Q \leq 43.65 \text{ l/s}$ .
5. Les résultats qui pourraient résulter des faibles débits tel que  $Q = (1,72 \text{ à } 3.73) \text{ l/s}$  ne sont pas du tout significatifs compte tenu de l'erreur absolue du débitmètre à diaphragme utilisé. Cette

erreur, étant de l'ordre de 0.5 l/s, la mesure d'un débit  $Q = 3.7328$  occasionne par conséquent une erreur relative significative de 13.40 %.

Les résultats qui pourraient résulter des faibles débits tel que  $Q = 1.72$  l/s ne sont pas du tout significatifs compte tenu de l'erreur absolue du débitmètre à diaphragme utilisé. Cette erreur étant de l'ordre de 0.5 l/s, la mesure d'un débit  $Q = 3.7328$  l/s occasionne par conséquent une erreur relative significative de 13.40 %. Les données utilisées sont regroupés dans les tableaux : 2.2, 3.3 jusqu'à 2.13 en annexes.

### **2.2.1. Evaluation du coefficient de frottement**

Le coefficient de frottement  $f$  est calculé pour les valeurs connues du diamètre  $D$ , du débit volume  $Q$ , la rugosité de la conduite et la viscosité cinématique du liquide (eau) et cela par deux relations celles de *Colebrook-white (1939)*, de *Achour-Bedjaoui (2006)* et qui seront utilisées pour l'évaluation du gradient hydraulique  $J$  respectivement par les relations de *Darcy* et de *Achour-Bedjaoui*.

#### **Relation de Colebrook-white (1939)**

$$f = \left[ -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{R\sqrt{f}} \right) \right]^{-2} \quad (2.1)$$

#### **Relation de Achour et bedjaoui (2006)**

$$f = \left[ -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10.04}{\bar{R}} \right) \right]^{-2} \quad (2.2)$$

Avec :

$$\bar{R} = 2R \left[ -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.5}{R^{0.9}} \right) \right]^{-1} \quad (2.2)$$

Pour les valeurs données de  $Q$ ,  $D$ ,  $\varepsilon$  et  $\nu$ , les étapes suivantes indiquent la voie à suivre pour l'évaluation du gradient  $J$  de la perte de charge linéaire :

- i. Avec les valeurs de  $Q$ ,  $D$  et  $\nu$ , la relation (2.4) permet le calcul du nombre de Reynolds  $R$ .

$$R = \frac{4Q}{\pi D \vartheta} \quad (2.4)$$

- ii. Les valeurs données de  $\varepsilon$  et de  $D$  permettent le calcul aisé de  $\varepsilon/D$ .
- iii. Les valeurs ainsi calculées de  $Q$ ,  $D$ ,  $\varepsilon/D$ ,  $\bar{R}$  sont introduites dans la relation (2.3), (2.4), et (2.2) destinée au calcul du coefficient de frottement  $f$ .
- iv. Pour les valeurs ainsi calculées de  $Q$ ,  $D$ ,  $\varepsilon/D$ ,  $\bar{R}$  et  $f$  sont introduites dans les relations destinée au calcul du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de *Darcy* (1.8) ; *Manning-Strickler* (1.13), *Williams-Hazen* (1.17) et *Achour-Bedjaoui* (1.20)

### 2.2.2. Evaluation des gradients hydrauliques

Le gradient hydraulique est 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*

$$J = \frac{8}{g} \frac{f Q^2}{\pi^2 D^5} \quad (2.5)$$

Le coefficient de frottement sera calculé par la relation de *Colebrook-white* (2.1)

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

2- La relation de *Williams-Hazen*

$$J = 10,675 \left( \frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1.852} \frac{1}{D^{4.87}} \quad (2.6)$$

3 – La relation de *Achour-Bedjaoui*

$$J = \frac{Q^2}{2\pi^2 D^5} \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{10,04}{\bar{R}} \right) \right]^{-2} \quad (2.7)$$

Pour le coefficient de frottement et le nombre de Reynolds on utilise les relations (2.8) et (2.9)

$$f = \left[ -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{10.04}{R} \right) \right]^{-2} \quad (2.8)$$

$$\bar{R} = 2R \left[ -\log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.5}{R^{0.9}} \right) \right]^{-1} \quad (2.9)$$

4- La relation de *Manning-Strickler*

$$J = \frac{10.29.Q^2}{K_S^2 D^{5.33}} \quad (2.10)$$

Les résultats de calcul sont portés dans les tableaux 2.2, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,11 et 14 en annexes et cela pour chaque diamètre.

Les écarts maximaux sur le calcul de *J* en se référant à la relation de *Darcy* (comme référence) sont portés dans le tableau 2.2, ce tableau est déduit des tableaux (2.16, 2.17 jusqu'à 2.28) en annexes.

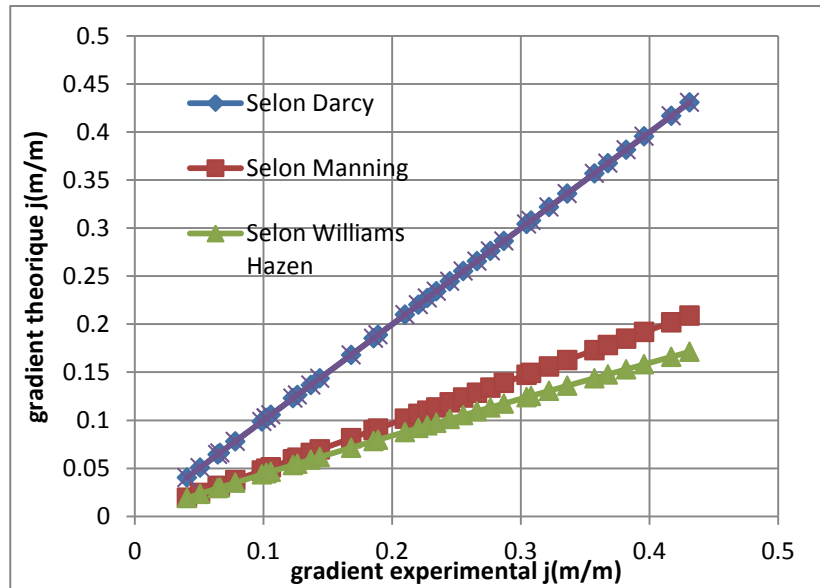
**Tableau 2.2:** Ecart max sur le calcul du gradient hydraulique J

N°	Diamètre D (mm)	Nature de la Conduite	Relations	Ecarts Maximum %	Régime observé
01	49/60	Plexiglas	<i>Darcy-Manning-Strickler</i>	31,92	Pratiquement lisse
			<i>Darcy – Williams-Hazen</i>	<b>68,08</b>	
			<i>Darcy-Achour-Bedjaoui</i>	0	
02	69/ 80	Plexiglas	<i>Darcy-Manning-Strickler</i>	30,84	Pratiquement lisse
			<i>Darcy – Williams-Hazen</i>	65,05	
			<i>Darcy-Achour-Bedjaoui</i>	0	
03	60/ 63	PVC	<i>Darcy-Manning-Strickler</i>	52,34	Pratiquement lisse
			<i>Darcy – Williams-Hazen</i>	63,61	
			<i>Darcy-Achour-Bedjaoui</i>	0	
04	77/ 80	PVC	<i>Darcy-Manning-Strickler</i>	52	Pratiquement lisse
			<i>Darcy – Williams-Hazen</i>	61.44	
			<i>Darcy-Achour-Bedjaoui</i>	0	

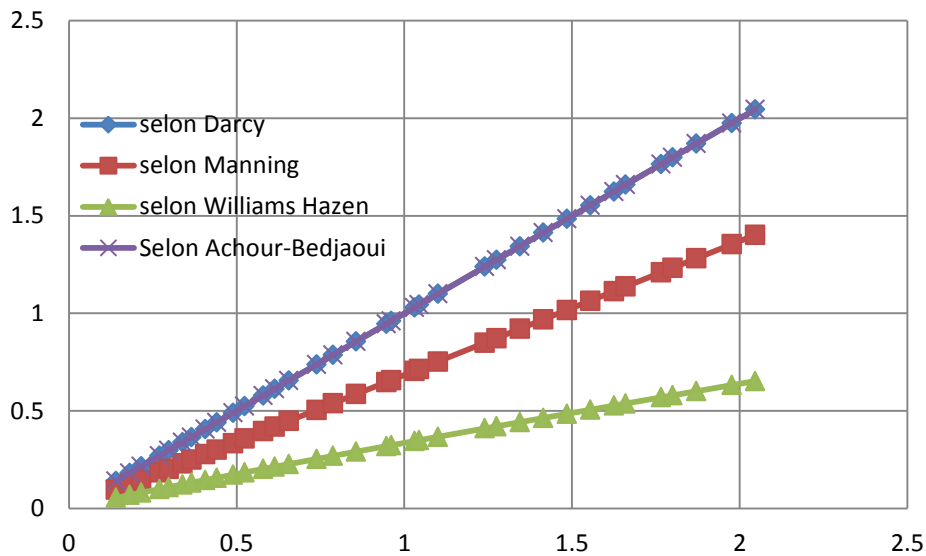


05	107/110	PVC	<i>Darcy-Manning-Strickler</i>	51.93	Pratiquement lisse
			<i>Darcy – Williams-Hazen</i>	58	
			<i>Darcy-Achour-Bedjaoui</i>	0	
06	121/125	PVC	<i>Darcy-Manning-Strickler</i>	51.5	Pratiquement lisse
			<i>Darcy – Williams-Hazen</i>	57.14	
			<i>Darcy-Achour-Bedjaoui</i>	0	
07	86 /90	Acier	<i>Darcy-Manning-Strickler</i>	8.02	turbulent rugueux
			<i>Darcy – Williams-Hazen</i>	17.21	
			<i>Darcy-Achour-Bedjaoui</i>	0	
08	49/50	Aluminium	<i>Darcy-Manning-Strickler</i>	38.72	turbulent rugueux
			<i>Darcy – Williams-Hazen</i>	56.57	
			<i>Darcy-Achour-Bedjaoui</i>	0	
09	49/50	Acier Galvanisé	<i>Darcy-Manning-Strickler</i>	31.92	turbulent rugueux
			<i>Darcy – Williams-Hazen</i>	68.08	
			<i>Darcy-Achour-Bedjaoui</i>	0	
10	56/60	Acier Galvanisé	<i>Darcy-Manning-Strickler</i>	5.08	Reg de Transition turbulent rugueux
			<i>Darcy – Williams-Hazen</i>	28.09	
			<i>Darcy-Achour-Bedjaoui</i>	0	
11	124/130	PVC	<i>Darcy-Manning-Strickler</i>	51.66	Turbulent rugueux
			<i>Darcy – Williams-Hazen</i>	56.23	
			<i>Darcy-Achour-Bedjaoui</i>	0	
12	130/140	PVC	<i>Darcy-Manning-Strickler</i>	51.88	Transition
			<i>Darcy – Williams-Hazen</i>	55.79	
			<i>Darcy-Achour-Bedjaoui</i>	0	

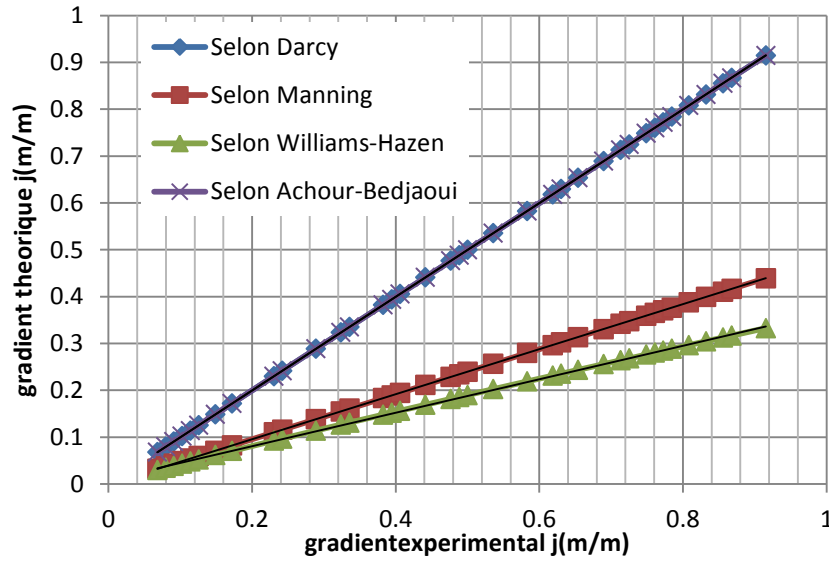
Les tableaux en annexes sont représentés graphiquement par les figures 2.1, 2, 3, 4,5, 6, 7, 8, 9, 10, 11et 2.12.



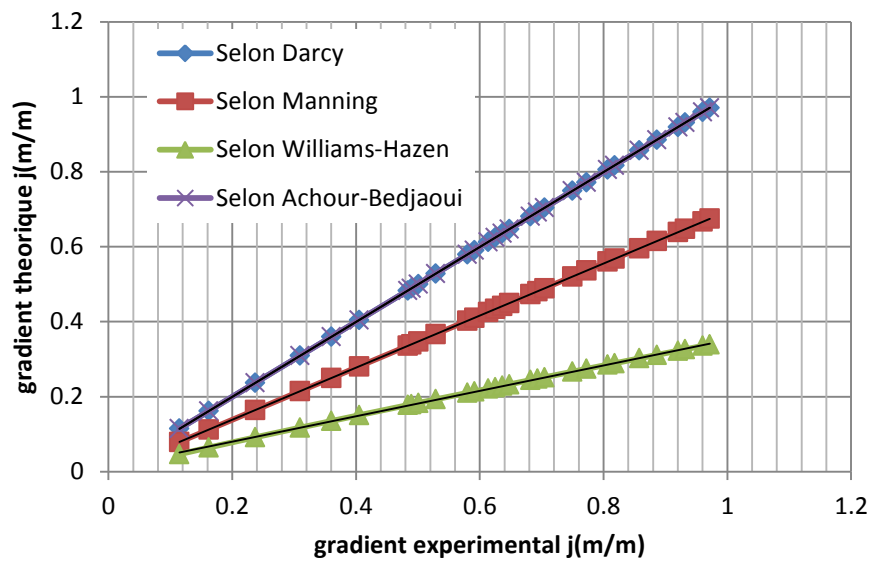
**Figure 2.1 :** Gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=86/90$  mm, Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ )



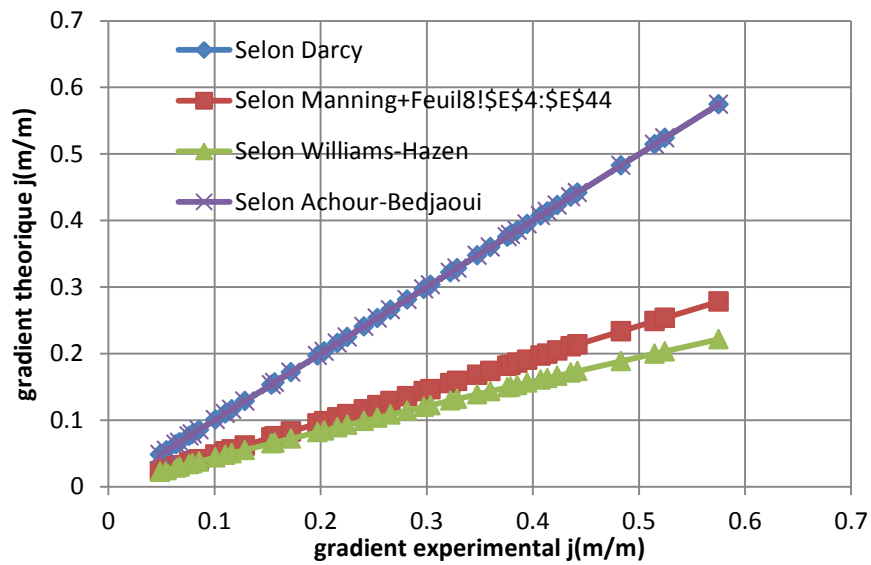
**Figure 2.2 :** Gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=49/50$  mm, Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ )



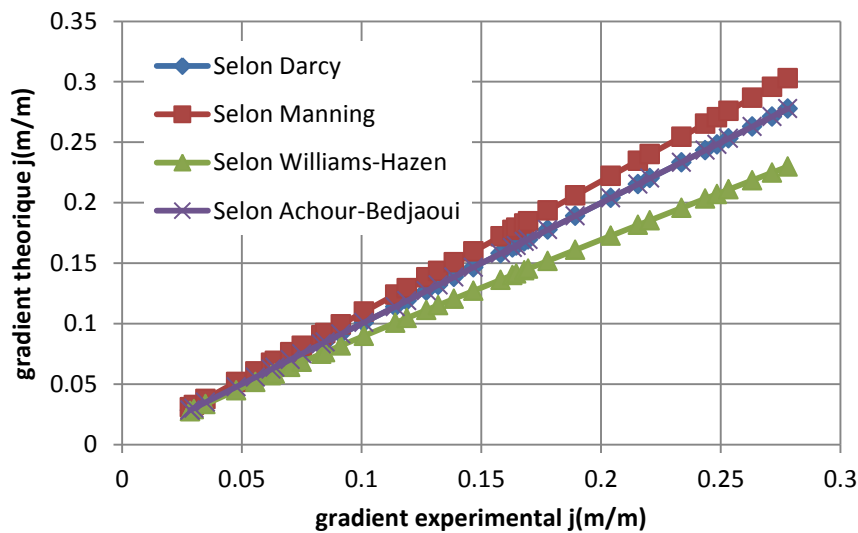
**Figure 2.3 :** Gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=60/63$  mm, Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ )



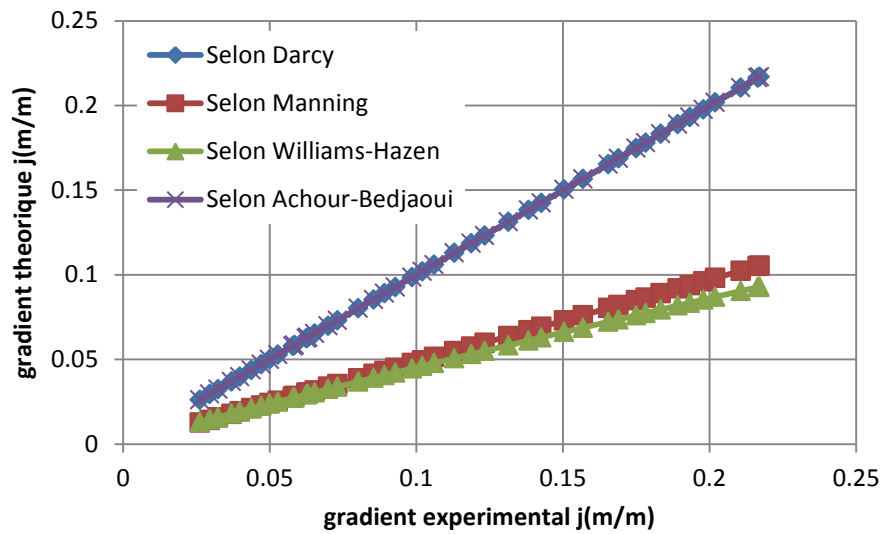
**Figure 2.4 :** Gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=69/80$  mm, Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ )



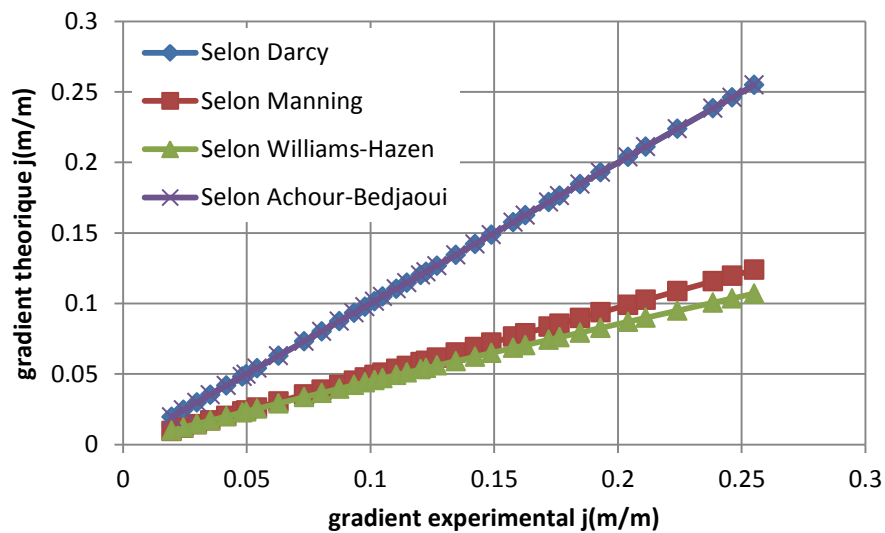
**Figure 2.5 :** Gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=77/80$  mm Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ )



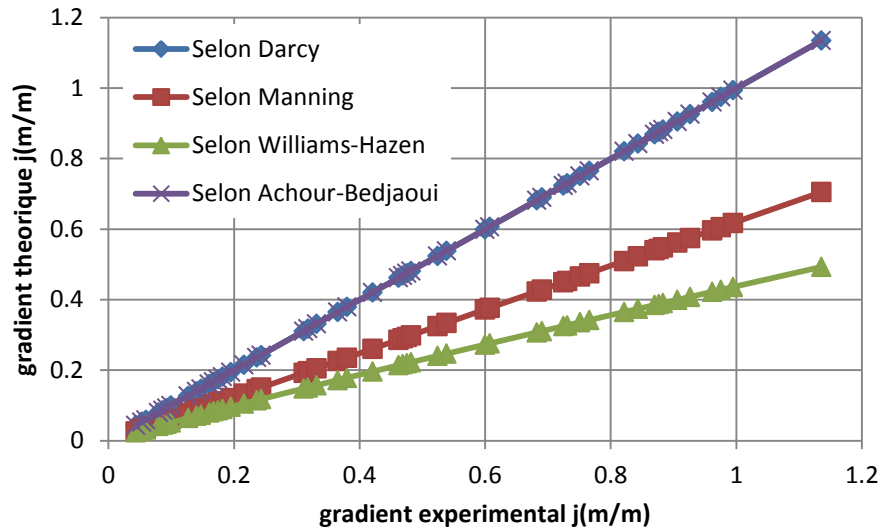
**Figure 2.6 :** Gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=87/90$  mm, Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ )



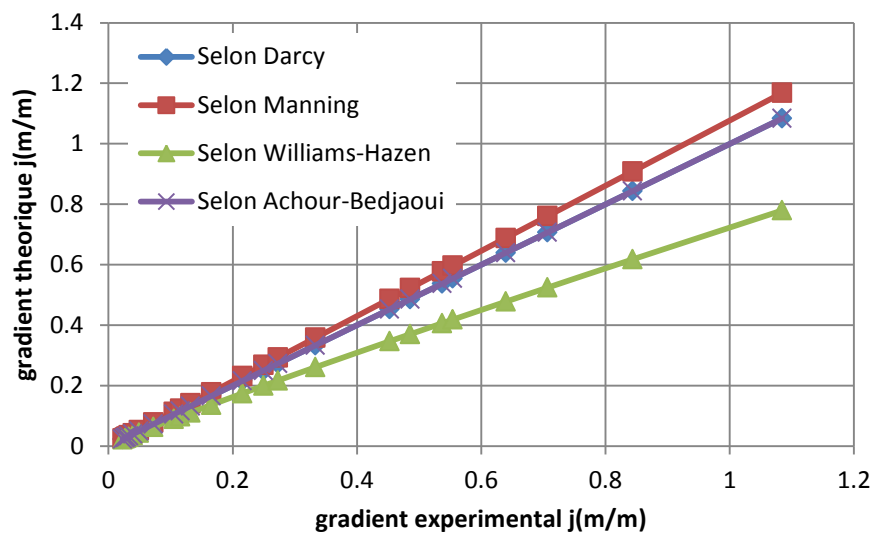
**Figure 2.7 :** Gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=121/125$  mm, Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ )



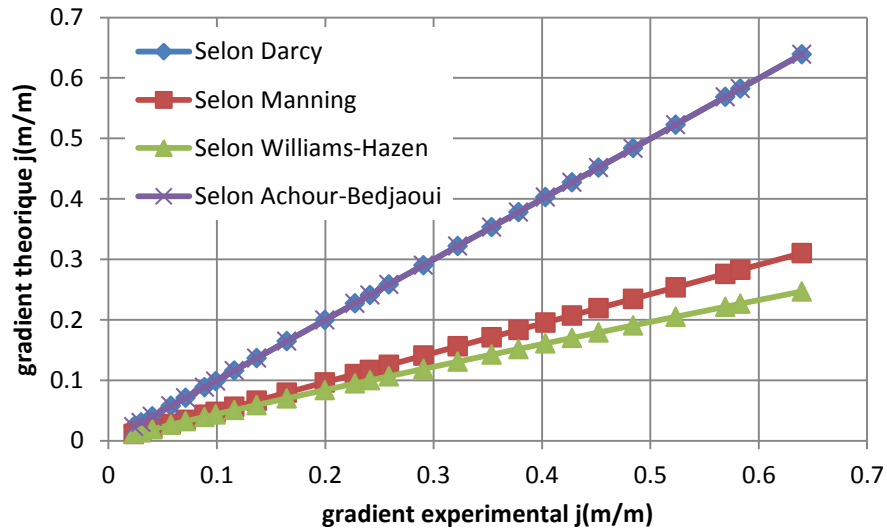
**Figure 2.8 :** Gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=107/110$  mm, Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ )



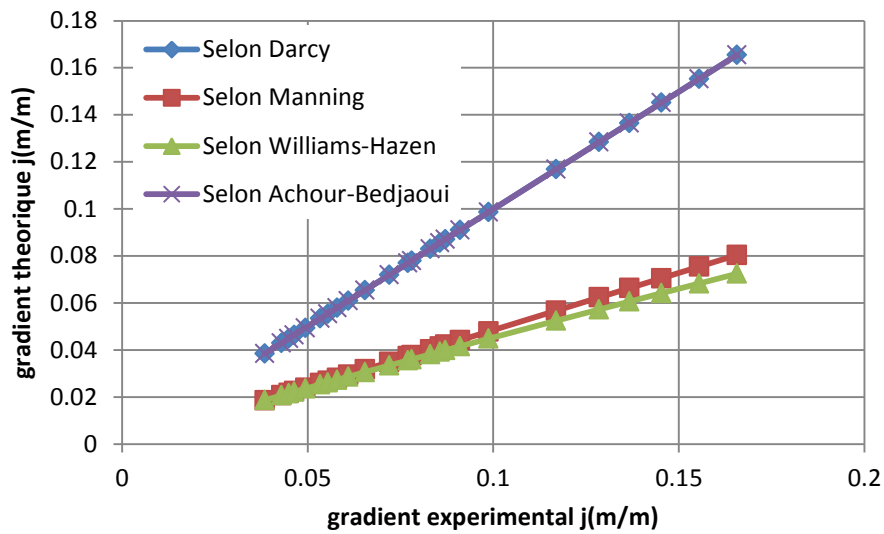
**Figure 2.9 :** Gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=49/50$  mm, Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ )



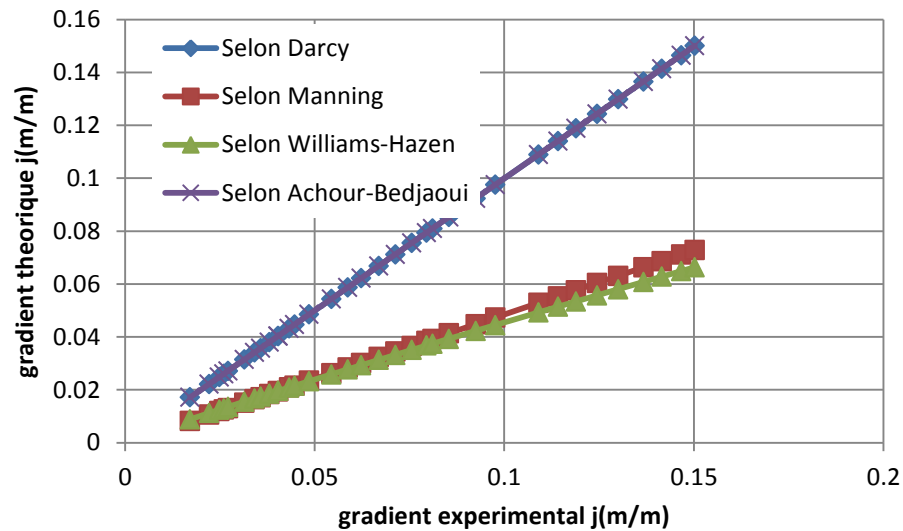
**Figure 2.10 :** Gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=56/60$  mm, Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ )



**Figure 2.11** : Gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=86/90$  mm, Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ )



**Figure 2.12** : Gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=124/130$  mm, Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ )



**Figure 2.13 :** Gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=130/140$  mm), Avec ( $C_{HW}=140$ ,  $K_S=100$ ,  $\varepsilon=0,001$ )

### 2.2.3 Discussion des résultats

D'après les résultats obtenus .nous remarquons que les écarts sur le calcul de gradient hydraulique entre les quatre relations utilisées sont réduits par rapport à la relation de Achour. *et al* (2006) en se référant aux valeurs des gradients expérimentaux ou bien celles obtenues en application de la relation de *darcy* mais d'une importance pour les relations de *Williams-Hazen* et *Manning-Strickler* cet écart est due au mauvais choix des deux coefficients celui de *Williams-Hazen*  $C_{HW}$  et de *Manning-Strickler*  $K_S$  où l'écart peut atteindre **68 %** qui est une valeur très importante quoi que ces relation s'appliquent pour les régimes turbulents rugueux.

Le choix de ces coefficients est justifié en se référant aux tableaux 1.4 et 1.5. Le tableau 2.3 regroupe les valeurs utilisées pour les différents coefficients.

Nous remarquons que les écarts se resserrent et s'approchent pour les valeurs des gradients obtenus par les relations de *Williams-Hazen*  $C_{HW}$  et de *Manning-Strickler*  $K_S$ .

Faut-il penser à corriger ces coefficients pour réduire l'ecart ?



**Tableau 2.3 :** Valeurs utilisées pour les différents coefficients (Rugosité absolue,  $C_{HW}$  et  $Ks$ )

Nature de la Conduite	Rugosité de la Conduite $\varepsilon$ (mm)	Coefficient de <i>Williams-Hazen</i> $C_{HW}$	Coefficient de <i>Manning Strickler</i> $K$
PVC	0.1	146	120
Plexiglas	0.1	146	100-140
Aluminium	0.1	130	105
Acier galvanisé	0.1	80	80

Il est à noter que le tableau 2.3 est constitué après une recherche sur le net et auprès de livres (comme référence Lancaster).

Les forts écarts sont obtenus pour les conduites en plexiglas et en application de la relation de *Williams-Hazen*, les écarts sont également importants même en application de la relation de Manning-Strickler d'où il faut corriger ces coefficients et de trouver une correspondance entre ces coefficients et la rugosité absolue de la conduite.

On observe également (Tableau 2.3) que les écarts sont nuls en application de la relation de *Achour-Bedjaoui* car le coefficient de frottement est calculé par la relation (2.8) qui est une solution exacte de la relation de *Colebrook-white* qui exige un procédé itératif.

### **2.3 Conclusion**

Le présent chapitre a consacré une étude comparative pour l'évaluation du gradient hydraulique  $J$  en se basant sur quatre relations celles de Darcy (comme référence), *Williams-Hazen* (largement utilisée dans certains pays Anglo-saxons, de *Manning –Strickler* et de *Achour-Bedjaoui* (récente). Pour les relations exigeant l'évaluation du coefficient de frottement  $f$  et qui sont la relation de *Darcy* et de *Achour-Bedjaoui*, ce coefficient a été évalué en application des relations (2.1) et (2.2) tout en notant l'aspect itératif de la relation de *Colebrook-white* (2.1) et l'aspect explicite de la relation de *Achour-Bedjaoui* (2.2).

Les données utilisées pour le calcul sont celles obtenues par *Bedjaoui* (2010) au laboratoire d'hydraulique de l'université de Biskra.

Les conduites testées sont de 12 conduites dont les diamètres, débits et matériaux varient

Les matériaux utilisés pour les conduites sont :

Le plexiglas ;

- Le PVC ;
- L'aluminium ;
- L'acier galvanisé.

Les régimes observés sont le turbulent rugueux, le régime de transition et le régime lisse.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les écarts obtenus sur le calcul du gradient  $J$  sont nuls vis-à-vis la relation de *Achour-Bedjaoui* (2006) comparées à ceux obtenus par la relation de *Darcy* (relation de référence) et également aux gradients expérimentaux, ces écarts sont très importants atteignant 68% pour les relations de *Williams-Hazen* et celle de *Manning Strickler*.

Les écarts importants sont causés par le mauvais choix de coefficients de *williams-Hazen* et de *Manning-Strickler* proposés par la littérature trouvée.

Il est impératif de corriger ces coefficients en se référant la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite.

### ***Conclusion générale***

Le calcul des écoulements uniformes à surface libre ou en charge occupe une place importante dans la pratique de l'ingénieur hydraulicien.

Le calcul du coefficient de frottement  $f$  peut se faire par application de la formule de *Colebrook-White*. Celle-ci est applicable lorsque l'écoulement est en régime pratiquement lisse, de transition ou turbulent rugueux. Pour ce dernier régime d'écoulement, la relation de *Colebrook-White* mène à la relation de *Nikuradse*, en écrivant que le nombre de *Reynolds*  $R \rightarrow \infty$ . La relation de *Colebrook-white* est utilisée comme référence pour la comparaison entre les diverses formules.

Il est à noter l'aspect itératif de la relation de *Colebrook-White* exigeant ainsi un programme informatisé pour la résoudre, aspect que *Achour-Bedjaoui* (2006) ont évité en proposant une relation valable pour  $Re$  au-delà de 4000 et  $\varepsilon/D$  allant de 0 jusqu'à 0.05

Les autres relations utilisées pour la comparaison sont celles de *Swamee-Jain* (1976) et *Saad-Benis* (2004) dont les limites d'applicabilité sont respectivement :  $5.10^2 < R < 10^8$  et  $10^{-6} < \varepsilon / D < 10^{-2}$  et  $10^{-6} \leq \frac{\varepsilon}{D} \leq 10^{-2}$  pour  $5.10^3 \leq Re \leq 10^8$

L'objectif principal de cette étude est de faire une étude comparative pour l'évaluation des pertes de charges. Etude comparative pour le calcul du gradient hydraulique dans les conduites circulaires en charge en régime turbulent rugueux

A fin de répondre au mieux l'objectif de notre recherche nous avons subdivisé notre mémoire en deux grands chapitres :

Le premier chapitre a eu pour objectif de passer en revue les principales notions sur les pertes de charges et de mettre en lumière les principales relations exprimant le gradient hydraulique unitaire  $J$  en fonction des paramètres de l'écoulement.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude comparative pour le calcul du gradient hydraulique  $J$  en fonction de plusieurs relations qui sont utilisées pour la comparaison sont Darcy om le coefficient de frottement est calculé par la relation de *Colebrook-wite* (1939) exigeant un aspect itératif, la relation de *Williams-Hazen* (1920) donnant un calcul directe du gradient hydraulique, la relation de Manning-Strickler et en fin la relation de *Achour-Bedjaoui* (2006).

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les écarts obtenus sur le calcul du gradient  $J$  sont nuls vis-à-vis la relation de *Achour-Bedjaoui* (2006) comparées à ceux obtenus par la relation de *Darcy* (relation de référence) et également aux gradients expérimentaux, ces écarts sont très importants atteignant 68% pour les relations de *Williams-Hazen* et celle de *Manning Strickler*.

Les écarts importants sont causés par le mauvais choix de coefficients de *williams-Hazen* et de *Manning-Strickler* proposés par la littérature trouvée.

Il est impératif de corriger ces coefficients en se référant la rugosité absolue de la paroi interne de la conduite.

*Références Bibliographiques*

**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.

**Bedjaoui Ali** : LES ECOULEMENTS EN CHARGE, cours, Université de Biskra 2017

**José VAZQUEZ** (Laboratoire Systèmes Hydrauliques Urbains) ENGEES, HYDRAULIQUE GENERALE p47. 62

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

**Yacine BEBOUKHA** , M.F.E Coefficients de Chézy et de Manning en écoulement uniforme dans des canaux artificiels p8.11 Université Mohamed Khider – Biskra

**Yan DABROWSKI** Règles de base de l'hydraulique du dimanche 23 au jeudi 27 février 2014, Djibouti

**Pierre F. Lemieux,** Écoulements en charge Formules et données de base Département de génie civil Faculté de génie Université de SHERBROOKE

**Tableau 2.2** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=49/50$  mm

$\varepsilon$ m (m)	D (m) m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	J exp m/m	$J$			
				Selon Darcy- Weisbach	Selon Manning- Strickler	Selon Williams- Hazen	Selon Achour- Bedjaoui
0,001	0,049	0,003114	0,140516	0,14038217	0,0955669	0,05427727	0,14037895
0,001	0,049	0,003538	0,181203	0,18100726	0,12336328	0,06875297	0,1810039
0,001	0,049	0,003857	0,215209	0,21497029	0,14661201	0,08067264	0,21496684
0,001	0,049	0,00432	0,269775	0,26945598	0,18392373	0,09951943	0,26945241
0,001	0,049	0,004535	0,297119	0,29684719	0,20268651	0,10888627	0,29684357
0,001	0,049	0,004839	0,338204	0,33783932	0,23077115	0,12278898	0,33783563
0,001	0,049	0,005032	0,365636	0,36523927	0,24954653	0,13201267	0,36523553
0,001	0,049	0,005309	0,406839	0,40643127	0,27777664	0,1457859	0,40642747
0,001	0,049	0,005529	0,441222	0,44071468	0,30127524	0,15717137	0,44071083
0,001	0,049	0,005824	0,489424	0,48886395	0,33428201	0,17305412	0,48886005
0,001	0,049	0,006027	0,523898	0,52344668	0,35799145	0,18439085	0,52344274
0,001	0,049	0,006337	0,579127	0,57853796	0,39576527	0,20233946	0,57853396
0,001	0,049	0,006524	0,613685	0,61310302	0,41946736	0,21353634	0,61309899
0,001	0,049	0,006741	0,655193	0,65447028	0,44783592	0,22687645	0,65446621
0,001	0,049	0,007157	0,738326	0,73754906	0,50481506	0,2534859	0,73754493
0,001	0,049	0,007389	0,786887	0,78603701	0,5380735	0,26891351	0,78603285
0,001	0,049	0,007709	0,856339	0,85544965	0,58568805	0,29087898	0,85544543
0,001	0,049	0,008107	0,946752	0,94587895	0,64772493	0,31930153	0,94587468
0,001	0,049	0,008166	0,960674	0,9596709	0,65718708	0,32361849	0,95966662
0,001	0,049	0,008458	1,030328	1,02939892	0,70502681	0,34537564	1,02939461
0,001	0,049	0,008515	1,044267	1,04329545	0,71456143	0,34969864	1,04329112
0,001	0,049	0,00874	1,100054	1,0990599	0,75282344	0,36700429	1,09905554
0,001	0,049	0,009279	1,239705	1,23855115	0,84854058	0,41001915	1,23854673
0,001	0,049	0,009409	1,274657	1,27344168	0,87248347	0,42072127	1,27343724
0,001	0,049	0,009664	1,344605	1,34328844	0,9204159	0,44208174	1,34328397
0,001	0,049	0,009913	1,414608	1,41329114	0,96845731	0,46340831	1,41328664
0,001	0,049	0,010156	1,484664	1,48332125	1,01651936	0,48466581	1,48331672
0,001	0,049	0,010393	1,554772	1,55325333	1,06451583	0,50582019	1,55324877
0,001	0,049	0,010625	1,624929	1,62327016	1,11257205	0,52693028	1,62326558
0,001	0,049	0,01074	1,660024	1,65854895	1,1367863	0,53754137	1,65854436
0,001	0,049	0,011076	1,76538	1,76379712	1,20902745	0,56910078	1,76379249
0,001	0,049	0,011185	1,800521	1,7986356	1,23294086	0,57951651	1,79863096
0,001	0,049	0,011402	1,870833	1,86900726	1,28124547	0,60051083	1,86900259
0,001	0,049	0,01172	1,976378	1,9745719	1,35370955	0,63189643	1,97456721
0,001	0,049	0,011927	2,046791	2,04484672	1,40195059	0,65272129	2,044842

**Tableau 2.3** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=86/90$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J			
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen	Selon Achour-Bedjaoui
0,001	0,086	0,00755095	0,04050163	0,040463258	0,019461625	0,019012432	0,040462079
0,001	0,086	0,00845768	0,05074768	0,050699572	0,024416214	0,023455677	0,050698341
0,001	0,086	0,00953727	0,06445197	0,064390861	0,031047339	0,029300323	0,064389575
0,001	0,086	0,00966401	0,06616802	0,066105273	0,031877953	0,030025481	0,066103981
0,001	0,086	0,01050973	0,07819672	0,078122575	0,037701569	0,035072495	0,078121244
0,001	0,086	0,01182367	0,09887612	0,098782325	0,047717811	0,043623047	0,098780939
0,001	0,086	0,01202914	0,10232905	0,102231976	0,049390713	0,045037407	0,102230581
0,001	0,086	0,01202914	0,10232905	0,102231976	0,049390713	0,045037407	0,102230581
0,001	0,086	0,01223127	0,10578364	0,105683264	0,051064519	0,046448988	0,105681862
0,001	0,086	0,01319698	0,12307982	0,122963011	0,059446331	0,053468455	0,122961572
0,001	0,086	0,01338202	0,12654343	0,126423324	0,061125077	0,054865207	0,126421879
0,001	0,086	0,01392286	0,13694233	0,136812356	0,066165712	0,059042397	0,136810892
0,001	0,086	0,01427239	0,14388138	0,143744791	0,069529609	0,061816877	0,143743315
0,001	0,086	0,01543545	0,16820502	0,168045342	0,081323208	0,071468796	0,168043829
0,001	0,086	0,01621676	0,1856112	0,185435001	0,089764427	0,078312733	0,185433464
0,001	0,086	0,01636869	0,18909541	0,188915887	0,091454247	0,079676936	0,188914345
0,001	0,086	0,01725306	0,21001995	0,20982053	0,10160345	0,087832463	0,209818963
0,001	0,086	0,01767918	0,22049401	0,220284661	0,106684314	0,091892266	0,220283082
0,001	0,086	0,01795783	0,22748085	0,227264841	0,110073723	0,094592543	0,227263254
0,001	0,086	0,01823235	0,23447089	0,234248251	0,113464837	0,097288026	0,234246657
0,001	0,086	0,01863679	0,24496173	0,244729131	0,118554549	0,101322549	0,244727525
0,001	0,086	0,01903291	0,2554593	0,255216705	0,123647786	0,105347052	0,255215089
0,001	0,086	0,0194212	0,26596332	0,26571073	0,128744413	0,10936197	0,265709105
0,001	0,086	0,01980213	0,27647354	0,276210954	0,133844295	0,113367693	0,276209319
0,001	0,086	0,02017609	0,28698976	0,28671719	0,138947326	0,117364597	0,286715546
0,001	0,086	0,02078489	0,30452957	0,304240308	0,147459036	0,124007382	0,304238649
0,001	0,086	0,02090459	0,3080394	0,307746809	0,149162357	0,125333246	0,307745147
0,001	0,086	0,02137689	0,3220846	0,321778668	0,155978703	0,130628008	0,321776995
0,001	0,086	0,02183931	0,33613905	0,335819743	0,162799851	0,135909383	0,335818059
0,001	0,086	0,0225157	0,3572373	0,356897908	0,173040184	0,143807629	0,356896209
0,001	0,086	0,02284662	0,3677935	0,367444126	0,178164056	0,147746513	0,36744242
0,001	0,086	0,02328077	0,38187563	0,381512872	0,18499958	0,152988203	0,381511157
0,001	0,086	0,02370722	0,39596564	0,395589497	0,191839186	0,158218694	0,395587772
0,001	0,086	0,02433333	0,4171149	0,416718603	0,202105927	0,166044324	0,416716865
0,001	0,086	0,02474221	0,43122347	0,430813757	0,208955116	0,171248557	0,430812011

**Tableau 2.4** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=60/63mm$

$\varepsilon$	D	$Q_{exp}$	$J_{exp}$	J			
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen	Selon Achour-Bedjaoui
m	m	$m^3/s$	m/m				
0,001	0,06	0,003733	0,06811326	0,06805679	0,0324058	0,029774276	0,06805465
0,001	0,06	0,004037	0,07959597	0,0795221	0,03789869	0,03441998	0,07951991
0,001	0,06	0,00432	0,09110099	0,09099704	0,04339845	0,039021657	0,09099479
0,001	0,06	0,004587	0,10262582	0,10253185	0,04892876	0,043605476	0,10252956
0,001	0,06	0,004839	0,11416848	0,11404977	0,05445252	0,048145668	0,11404744
0,001	0,06	0,005079	0,12572736	0,12558903	0,05998783	0,052661237	0,12558666
0,001	0,06	0,005529	0,14888861	0,14872349	0,07108859	0,061627037	0,14872105
0,001	0,06	0,005947	0,17210113	0,17196367	0,08224369	0,07053255	0,17196117
0,001	0,06	0,006883	0,23031842	0,23011957	0,11016972	0,092460074	0,23011696
0,001	0,06	0,007056	0,24198944	0,2417943	0,11577742	0,096810014	0,24179166
0,001	0,06	0,007709	0,28875239	0,28846414	0,13819833	0,114053912	0,28846144
0,001	0,06	0,008166	0,32389906	0,32357376	0,15506917	0,126891102	0,32357101
0,001	0,06	0,008313	0,33562744	0,33529569	0,16070237	0,131153902	0,33529292
0,001	0,06	0,008877	0,38259993	0,38220467	0,18324796	0,148108112	0,38220185
0,001	0,06	0,009013	0,39435684	0,39397546	0,18890587	0,152337871	0,39397262
0,001	0,06	0,009147	0,40611907	0,40574773	0,19456471	0,156558957	0,40574488
0,001	0,06	0,009537	0,4414357	0,44099647	0,2115097	0,169145492	0,44099359
0,001	0,06	0,009913	0,47679467	0,47636972	0,22851617	0,181702818	0,47636681
0,001	0,06	0,010035	0,4885899	0,4881404	0,23417551	0,185866015	0,48813748
0,001	0,06	0,010156	0,5003895	0,49995648	0,23985684	0,190037904	0,49995355
0,001	0,06	0,01051	0,53581278	0,53533726	0,25686927	0,202487415	0,5353343
0,001	0,06	0,010965	0,58309859	0,58258884	0,27959152	0,219021021	0,58258585
0,001	0,06	0,011294	0,61860134	0,61800006	0,29662127	0,231347015	0,61799704
0,001	0,06	0,011402	0,63044255	0,62985216	0,30232133	0,235460838	0,62984913
0,001	0,06	0,011615	0,65413508	0,65355708	0,31372212	0,243671867	0,65355403
0,001	0,06	0,011927	0,68969817	0,6890702	0,33080278	0,255932609	0,68906713
0,001	0,06	0,012131	0,71342242	0,71279828	0,34221569	0,264098731	0,7127952
0,001	0,06	0,012231	0,72528909	0,72457639	0,34788095	0,268144792	0,7245733
0,001	0,06	0,01243	0,74903117	0,74830196	0,35929318	0,276280565	0,74829886
0,001	0,06	0,012529	0,76090672	0,76024749	0,36503923	0,280369647	0,76024439
0,001	0,06	0,012626	0,77278491	0,77204345	0,3707134	0,284402912	0,77204034
0,001	0,06	0,012723	0,78466604	0,78393022	0,37643134	0,288462664	0,78392709
0,001	0,06	0,012915	0,80843619	0,80772642	0,38787835	0,296576444	0,80772328
0,001	0,06	0,013104	0,83221719	0,83149829	0,39931395	0,304664463	0,83149514
0,001	0,06	0,01329	0,85600855	0,85522942	0,41073024	0,312721737	0,85522626
0,001	0,06	0,01338202	0,86790797	0,86709327	0,41643766	0,316743628	0,86709011
0,001	0,06	0,01374487	0,91553063	0,91467124	0,43932697	0,332832822	0,91466805



**Tableau 2.5** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=69/80$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	$J$			
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen	Selon Achour-Bedjaoui
0,001	0,069	0,00705554	0,11455294	0,11442964	0,07914247	0,04661538	0,11442772
0,001	0,069	0,00840018	0,16216018	0,16198547	0,11218294	0,06439234	0,16198344
0,001	0,069	0,01015563	0,23672987	0,23647467	0,16396958	0,09151089	0,23647251
0,001	0,069	0,01161468	0,30941112	0,30907737	0,21446885	0,11733977	0,30907512
0,001	0,069	0,01252855	0,35988269	0,3594944	0,24954626	0,13500935	0,3594921
0,001	0,069	0,01328981	0,40483608	0,40439923	0,28079364	0,15059431	0,40439689
0,001	0,069	0,0145292	0,48368152	0,4831595	0,33560877	0,17763298	0,48315709
0,001	0,069	0,01461384	0,48932113	0,48879306	0,33952997	0,17955401	0,48879065
0,001	0,069	0,01478169	0,50060351	0,50006313	0,34737457	0,18339223	0,50006072
0,001	0,069	0,01519348	0,52882582	0,52825495	0,36699841	0,19296609	0,52825252
0,001	0,069	0,01590869	0,57968296	0,57905716	0,40236353	0,21012552	0,5790547
0,001	0,069	0,01606344	0,59099395	0,59035593	0,4102294	0,21392658	0,59035346
0,001	0,069	0,01636869	0,6136259	0,61296342	0,42596848	0,2215162	0,61296094
0,001	0,069	0,01651926	0,62494664	0,6242719	0,43384152	0,22530486	0,62426941
0,001	0,069	0,01666852	0,63627049	0,63558355	0,44171689	0,22908957	0,63558105
0,001	0,069	0,0168165	0,64759743	0,64689823	0,44959451	0,23287035	0,64689572
0,001	0,069	0,01725306	0,68159635	0,68086032	0,47324064	0,24419003	0,6808578
0,001	0,069	0,01739622	0,69293503	0,69218683	0,48112697	0,2479559	0,6921843
0,001	0,069	0,01753826	0,70427662	0,70351619	0,48901539	0,2517182	0,70351366
0,001	0,069	0,01809559	0,74967074	0,74886109	0,52058927	0,26673286	0,74885854
0,001	0,069	0,01836812	0,7723836	0,77154958	0,53638799	0,27422027	0,77154701
0,001	0,069	0,01876973	0,80647223	0,80560125	0,56009996	0,28542752	0,80559867
0,001	0,069	0,01890176	0,81784006	0,81695682	0,56800762	0,28915714	0,81695424
0,001	0,069	0,01935701	0,85764644	0,85672006	0,59569818	0,30218735	0,85671746
0,001	0,069	0,01967595	0,88609699	0,88513988	0,61548995	0,31147312	0,88513727
0,001	0,069	0,02005219	0,92025617	0,91926222	0,63925365	0,32259331	0,9192596
0,001	0,069	0,02017609	0,931647	0,93064067	0,64717805	0,32629467	0,93063804
0,001	0,069	0,02048268	0,96013319	0,95909616	0,66699588	0,33553668	0,95909352
0,001	0,069	0,02060408	0,97153152	0,97048203	0,6749257	0,33922901	0,97047938

**Tableau 2.6** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=77/80$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J			
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen	Selon Achour-Bedjaoui
0,001	0,077	0,00614486	0,04844845	0,04840343	0,0232317	0,02223825	0,04840202
0,001	0,077	0,0065239	0,0545726	0,05452188	0,0261862	0,02484532	0,05452043
0,001	0,077	0,00705554	0,06377581	0,06371654	0,0306279	0,0287246	0,06371505
0,001	0,077	0,00722433	0,06684769	0,06678554	0,03211085	0,03001022	0,06678404
0,001	0,077	0,00770923	0,07607457	0,07600384	0,0365662	0,03384709	0,0760023
0,001	0,077	0,00786444	0,07915371	0,0790801	0,0380533	0,03511986	0,07907855
0,001	0,077	0,00816627	0,08531691	0,08523757	0,04103032	0,0376569	0,08523599
0,001	0,077	0,00887742	0,10075126	0,10065754	0,04848764	0,04395455	0,10065592
0,001	0,077	0,00927878	0,11002822	0,10992587	0,05297114	0,04770566	0,10992423
0,001	0,077	0,00953727	0,11621909	0,11611098	0,05596359	0,05019611	0,11610933
0,001	0,077	0,01003491	0,12861472	0,12849506	0,06195611	0,0551543	0,12849338
0,001	0,077	0,01096465	0,15345607	0,15331326	0,07396847	0,06499002	0,15331153
0,001	0,077	0,01107555	0,15656551	0,15641983	0,07547234	0,06621266	0,15641809
0,001	0,077	0,01161468	0,17212595	0,17196577	0,0829988	0,07230528	0,17196401
0,001	0,077	0,01243022	0,19706474	0,19688131	0,09506372	0,08198817	0,19687951
0,001	0,077	0,01262613	0,2033069	0,20311768	0,09808395	0,08439743	0,20311587
0,001	0,077	0,01300939	0,21579962	0,21559878	0,10412888	0,08920319	0,21559695
0,001	0,077	0,01328981	0,22517623	0,2249666	0,1086663	0,09279687	0,22496476
0,001	0,077	0,01374487	0,24081656	0,24059238	0,11623541	0,09876724	0,24059051
0,001	0,077	0,01409868	0,2533397	0,25310388	0,12229647	0,10352727	0,253102
0,001	0,077	0,01444409	0,26587206	0,26562458	0,12836238	0,10827367	0,26562269
0,001	0,077	0,01486493	0,28154985	0,28128775	0,13595124	0,11418848	0,28128584
0,001	0,077	0,01527455	0,29724071	0,29696396	0,14354696	0,12008422	0,29696204
0,001	0,077	0,01543545	0,30352053	0,30323794	0,14658708	0,1224374	0,30323601
0,001	0,077	0,01590869	0,32237158	0,32207141	0,15571348	0,12948026	0,32206947
0,001	0,077	0,01606344	0,32865898	0,32835293	0,15875754	0,13182249	0,32835098
0,001	0,077	0,01651926	0,34753185	0,34720825	0,16789536	0,13883384	0,34720628
0,001	0,077	0,0168165	0,36012242	0,35978706	0,17399172	0,14349573	0,35978508
0,001	0,077	0,01718105	0,3758699	0,37551989	0,18161703	0,14930985	0,37551791
0,001	0,077	0,01725306	0,37902064	0,37866765	0,18314271	0,15047096	0,37866566
0,001	0,077	0,01739622	0,38532316	0,38496437	0,18619469	0,1527915	0,38496237
0,001	0,077	0,01760886	0,39477999	0,39441235	0,19077418	0,15626821	0,39441035
0,001	0,077	0,01788856	0,40739434	0,40701501	0,19688294	0,16089634	0,407013
0,001	0,077	0,01802684	0,41370376	0,41331854	0,19993846	0,16320727	0,41331652
0,001	0,077	0,01823235	0,4231706	0,42277656	0,20452315	0,16666984	0,42277454
0,001	0,077	0,01850292	0,43579806	0,43539222	0,21063864	0,17127963	0,43539019

**Tableau 2.7** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=87/90$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J			
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen	Selon Achour-Bedjaoui
0,001	0,087	0,0065239	0,0284833	0,02845113	0,03073356	0,02762976	0,02845004
0,001	0,087	0,0065239	0,0284833	0,02845113	0,03073356	0,02762976	0,02845004
0,001	0,087	0,00670565	0,03008096	0,03004697	0,03246977	0,02907216	0,03004588
0,001	0,087	0,00722433	0,03488019	0,03484075	0,03768707	0,03337349	0,03483963
0,001	0,087	0,00845768	0,04771772	0,04766368	0,05165353	0,04468669	0,04766249
0,001	0,087	0,00914689	0,05576563	0,05570245	0,06041499	0,05166394	0,05570122
0,001	0,087	0,00966401	0,06221548	0,06214498	0,06743915	0,05720318	0,06214372
0,001	0,087	0,00978915	0,06382942	0,06375707	0,06919708	0,05858263	0,06375581
0,001	0,087	0,01027497	0,07029066	0,07021096	0,07623585	0,06408067	0,07020967
0,001	0,087	0,01062523	0,07514204	0,07505683	0,08152189	0,06818479	0,07505553
0,001	0,087	0,01118539	0,08323731	0,08314288	0,0903441	0,07499129	0,08314156
0,001	0,087	0,01129419	0,08485773	0,08476145	0,09211025	0,07634784	0,08476012
0,001	0,087	0,01171963	0,09134366	0,09124002	0,09918025	0,08175933	0,09123867
0,001	0,087	0,01233113	0,10108469	0,10096996	0,10980036	0,08983522	0,10096859
0,001	0,087	0,01310351	0,11409343	0,11396387	0,12398608	0,10053353	0,11396247
0,001	0,087	0,01338202	0,11897732	0,11884221	0,12931267	0,10452669	0,1188408
0,001	0,087	0,01383414	0,12712354	0,12697915	0,13819813	0,11116104	0,12697773
0,001	0,087	0,01409868	0,13201491	0,13186496	0,14353387	0,11512969	0,13186352
0,001	0,087	0,01444409	0,13854081	0,13838344	0,15065315	0,12040802	0,13838199
0,001	0,087	0,01486493	0,14670449	0,14653779	0,15955986	0,12698571	0,14653633
0,001	0,087	0,01543545	0,15814466	0,15796494	0,17204266	0,13615909	0,15796347
0,001	0,087	0,0156738	0,16305136	0,16286605	0,17739698	0,14007859	0,16286457
0,001	0,087	0,01575247	0,16468739	0,16450025	0,17918235	0,14138357	0,16449877
0,001	0,087	0,01590869	0,16796022	0,16776933	0,18275391	0,14399126	0,16776784
0,001	0,087	0,01598625	0,16959698	0,16940421	0,18454011	0,14529398	0,16940272
0,001	0,087	0,01636869	0,17778422	0,17758213	0,1934753	0,15179687	0,17758063
0,001	0,087	0,01689002	0,1892556	0,18904047	0,20599568	0,1608719	0,18903895
0,001	0,087	0,01753826	0,20401958	0,20378761	0,22211127	0,17249319	0,20378607
0,001	0,087	0,01802684	0,21551368	0,21526863	0,23465878	0,18149809	0,21526708
0,001	0,087	0,01823235	0,22044254	0,22019187	0,24003963	0,18534871	0,22019032
0,001	0,087	0,01876973	0,23359408	0,23332842	0,25439795	0,19559294	0,23332685
0,001	0,087	0,01916318	0,24346502	0,24318812	0,26517533	0,20325407	0,24318654
0,001	0,087	0,01935701	0,24840278	0,24812022	0,27056669	0,20707783	0,24811863
0,001	0,087	0,01954898	0,25334197	0,25305378	0,27595979	0,21089719	0,2530522
0,001	0,087	0,01992754	0,26322464	0,26292521	0,28675106	0,21852304	0,26292361
0,001	0,087	0,02023777	0,27146444	0,27115565	0,29574881	0,22486522	0,27115404

**Tableau 2.8** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=107/110$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J			
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen	Selon Achour-Bedjaoui
0,001	0,107	0,00940889	0,01963537	0,01961844	0,00943004	0,00986007	0,01961768
0,001	0,107	0,01050973	0,02446126	0,02444016	0,01176578	0,0121025	0,02443936
0,001	0,107	0,01161468	0,02983767	0,02981193	0,01436984	0,01456401	0,0298111
0,001	0,107	0,01262613	0,03522687	0,03519648	0,01698158	0,01699965	0,03519562
0,001	0,107	0,01374487	0,04170841	0,04167242	0,02012419	0,01989407	0,04167154
0,001	0,107	0,01478169	0,04820369	0,04816211	0,02327478	0,02276232	0,0481612
0,001	0,107	0,01503007	0,04982947	0,04978647	0,02406354	0,02347575	0,04978555
0,001	0,107	0,0156738	0,05416837	0,05412164	0,02616892	0,02537173	0,05412071
0,001	0,107	0,01689002	0,06286039	0,06280615	0,03038769	0,02913791	0,0628052
0,001	0,107	0,01823235	0,07320404	0,07314088	0,03540972	0,03357128	0,0731399
0,001	0,107	0,01909815	0,08029346	0,08022418	0,0388526	0,03658334	0,08022319
0,001	0,107	0,01992754	0,08739186	0,08731644	0,04230041	0,03957997	0,08731543
0,001	0,107	0,02060408	0,0934047	0,0933241	0,04522136	0,04210451	0,09332307
0,001	0,107	0,0210829	0,09778121	0,09769683	0,04734761	0,04393457	0,0976958
0,001	0,107	0,0214934	0,101613	0,1015253	0,04920935	0,04553197	0,10152426
0,001	0,107	0,02183931	0,10489904	0,10480851	0,05080602	0,04689839	0,10480747
0,001	0,107	0,02240434	0,1103791	0,11028385	0,05346895	0,04917026	0,11028279
0,001	0,107	0,02284662	0,11476601	0,11466697	0,05560083	0,05098304	0,11466591
0,001	0,107	0,02338809	0,12025308	0,12014931	0,05826754	0,05324337	0,12014824
0,001	0,107	0,0236013	0,12244896	0,12234327	0,05933478	0,05414581	0,1223422
0,001	0,107	0,02402225	0,12684241	0,12673294	0,06147019	0,0559479	0,12673186
0,001	0,107	0,02474221	0,13453628	0,13442017	0,06521	0,05909291	0,13441909
0,001	0,107	0,02544244	0,14223667	0,14211389	0,06895329	0,06222749	0,14211279
0,001	0,107	0,02602813	0,14884186	0,14871342	0,07216443	0,06490643	0,14871231
0,001	0,107	0,02678976	0,15765556	0,15751949	0,07644954	0,06846767	0,15751838
0,001	0,107	0,0272091	0,16261649	0,16247615	0,07886163	0,07046575	0,16247503
0,001	0,107	0,0279846	0,17199323	0,1718448	0,08342102	0,07423035	0,17184367
0,001	0,107	0,02834243	0,17640848	0,17625623	0,08556802	0,07599777	0,17625509
0,001	0,107	0,02900184	0,18469147	0,18453207	0,08959598	0,07930482	0,18453092
0,001	0,107	0,02964706	0,19298003	0,19281346	0,09362686	0,08260327	0,19281231
0,001	0,107	0,03048677	0,20403967	0,20386355	0,09900571	0,08698849	0,20386238
0,001	0,107	0,03102079	0,21123326	0,21105096	0,10250451	0,08983145	0,21104979
0,001	0,107	0,03194441	0,22396937	0,22377608	0,10869938	0,09484767	0,2237749
0,001	0,107	0,03295833	0,23837983	0,23817407	0,11570913	0,10049832	0,23817288
0,001	0,107	0,03349197	0,24614475	0,24593233	0,11948647	0,10353271	0,24593113
0,001	0,107	0,03409195	0,25502354	0,25480343	0,1238058	0,10699379	0,25480222

**Tableau 2.9** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13) , Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=49/50$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J			
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen	Selon Achour-Bedjaoui
0,001	0,049	0,00172	0,04319695	0,04315495	0,0264453	0,02356615	0,04315234
0,001	0,049	0,00191	0,05317857	0,05312684	0,03261057	0,02861302	0,05312412
0,001	0,049	0,00202	0,05943103	0,05937321	0,03647493	0,03173954	0,05937043
0,001	0,049	0,00234	0,07959492	0,0795174	0,0489467	0,0416752	0,07951447
0,001	0,049	0,00244	0,08649893	0,08641467	0,05321957	0,04503351	0,08641169
0,001	0,049	0,00253	0,09295795	0,09286739	0,05721801	0,04815807	0,09286438
0,001	0,049	0,00262	0,0996495	0,0995524	0,06136126	0,05137879	0,09954935
0,001	0,049	0,00296	0,12702696	0,12690311	0,07832044	0,06440538	0,12689994
0,001	0,049	0,00311	0,14016014	0,14002347	0,08645945	0,07058008	0,14002024
0,001	0,049	0,00319	0,14742858	0,14728481	0,09096473	0,0739793	0,14728156
0,001	0,049	0,00333	0,16059042	0,16043378	0,0991243	0,08010444	0,16043049
0,001	0,049	0,0034	0,16738232	0,16721904	0,10333549	0,08325088	0,16721572
0,001	0,049	0,00347	0,17431484	0,17414481	0,10763428	0,086453	0,17414148
0,001	0,049	0,00354	0,18138808	0,1812111	0,11202068	0,08971063	0,18120774
0,001	0,049	0,00367	0,19489716	0,194707	0,12039925	0,09590725	0,1947036
0,001	0,049	0,00386	0,21551385	0,21530354	0,13318836	0,10530514	0,21530009
0,001	0,049	0,00404	0,23600129	0,23577098	0,1458997	0,11457983	0,23576748
0,001	0,049	0,0041	0,24303711	0,24279993	0,15026554	0,11775127	0,24279641
0,001	0,049	0,00464	0,31100975	0,31070606	0,19245431	0,14807481	0,31070241
0,001	0,049	0,00469	0,31772685	0,31741664	0,19662438	0,15104348	0,31741298
0,001	0,049	0,00479	0,33137647	0,33105288	0,2050986	0,15706205	0,3310492
0,001	0,049	0,00503	0,36530663	0,36494985	0,22616617	0,17194668	0,36494611
0,001	0,049	0,00513	0,37993213	0,37956109	0,23524825	0,17833116	0,37955733
0,001	0,049	0,0054	0,42085487	0,42044382	0,26066288	0,1961025	0,42044
0,001	0,049	0,00566	0,46223973	0,46178818	0,28636803	0,21394686	0,46178431
0,001	0,049	0,0057	0,46877888	0,4683209	0,29042994	0,2167555	0,46831703
0,001	0,049	0,00574	0,47536392	0,47489952	0,29452045	0,21958098	0,47489563
0,001	0,049	0,00578	0,48199483	0,48152401	0,29863957	0,22242328	0,48152012
0,001	0,049	0,00603	0,52447899	0,52396662	0,32503213	0,24056783	0,52396268
0,001	0,049	0,00611	0,53845285	0,53792678	0,33371374	0,24651208	0,53792283
0,001	0,049	0,00645	0,59989118	0,59930497	0,37188709	0,27251755	0,59930096
0,001	0,049	0,00649	0,6073374	0,60674387	0,37651394	0,27565576	0,60673985
0,001	0,049	0,00688	0,68234454	0,68167771	0,42312486	0,30711687	0,68167363
0,001	0,049	0,00692	0,69028445	0,68960985	0,42805922	0,31043192	0,68960576
0,001	0,049	0,00709	0,72454136	0,72383331	0,44934937	0,32470331	0,7238292
0,001	0,049	0,00712	0,73067286	0,72995878	0,45316009	0,3272524	0,72995466

0,001	0,049	0,00722	0,75129761	0,75056339	0,4659787	0,33581553	0,75055925
0,001	0,049	0,00729	0,7659059	0,76515724	0,4750581	0,34187022	0,76515309
0,001	0,049	0,00755	0,82139601	0,8205932	0,50954855	0,36479396	0,82058901
0,001	0,049	0,00765	0,84325509	0,8424309	0,52313592	0,37379274	0,84242669
0,001	0,049	0,00777	0,86986496	0,86901466	0,53967675	0,38472429	0,86901044
0,001	0,049	0,0078	0,87658189	0,87572513	0,54385218	0,38747982	0,8757209
0,001	0,049	0,00783	0,88332489	0,8824614	0,54804371	0,39024439	0,88245717
0,001	0,049	0,00793	0,90598764	0,90510204	0,56213166	0,39952488	0,90509779
0,001	0,049	0,00802	0,92662964	0,92572379	0,57496367	0,40796304	0,92571953
0,001	0,049	0,00817	0,96154942	0,96060956	0,59667217	0,42220671	0,96060528
0,001	0,049	0,00823	0,9756984	0,97474453	0,6054682	0,4279671	0,97474025
0,001	0,049	0,00831	0,99472411	0,99375175	0,61729636	0,43570343	0,99374745
0,001	0,049	0,00888	1,1356007	1,13449046	0,70488392	0,49266385	1,13448609

---

**Tableau 2.10** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=121/125$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J			
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen	Selon Achour-Bedjaoui
0,001	0,121	0,01511199	0,02621919	0,0261883	0,01263136	0,01302943	0,02618761
0,001	0,121	0,01606344	0,02960398	0,02956908	0,01427197	0,0145893	0,02956837
0,001	0,121	0,0168165	0,03242862	0,03239037	0,01564149	0,01588123	0,03238965
0,001	0,121	0,01795783	0,03695484	0,03691123	0,01783669	0,01793493	0,0369105
0,001	0,121	0,01863679	0,03978764	0,03974068	0,01921095	0,01921095	0,03973993
0,001	0,121	0,01954898	0,04375818	0,04370651	0,02113756	0,02098859	0,04370574
0,001	0,121	0,02029926	0,04716549	0,04710978	0,02279121	0,0225048	0,04710901
0,001	0,121	0,02090459	0,05000755	0,04994847	0,02417074	0,02376342	0,04994769
0,001	0,121	0,0214934	0,05285187	0,05278941	0,02555154	0,02501789	0,05278863
0,001	0,121	0,0225157	0,057977	0,05790847	0,02803998	0,0272662	0,05790767
0,001	0,121	0,02262653	0,05854687	0,05847766	0,0283167	0,02751528	0,05847686
0,001	0,121	0,02338809	0,06253809	0,06246414	0,03025493	0,02925498	0,06246333
0,001	0,121	0,02349493	0,06310856	0,06303394	0,03053199	0,02950297	0,06303313
0,001	0,121	0,02391768	0,06539119	0,06531386	0,03164062	0,03049365	0,06531304
0,001	0,121	0,02474221	0,06995982	0,06987707	0,03385975	0,03246905	0,06987624
0,001	0,121	0,02529397	0,07310325	0,07301677	0,03538677	0,03382277	0,07301594
0,001	0,121	0,02650663	0,08025452	0,08015956	0,03886117	0,03688707	0,08015871
0,001	0,121	0,0273475	0,0854092	0,08530812	0,04136587	0,03908347	0,08530726
0,001	0,121	0,02793956	0,08913484	0,08902933	0,04317635	0,04066494	0,08902847
0,001	0,121	0,02851972	0,09286275	0,09275281	0,04498806	0,04224259	0,09275194
0,001	0,121	0,02939062	0,09860222	0,09848547	0,04777759	0,04466261	0,09848459
0,001	0,121	0,02990137	0,10204826	0,10192742	0,04945258	0,04611067	0,10192654
0,001	0,121	0,03048677	0,1060708	0,10594518	0,05140789	0,04779649	0,10594429
0,001	0,121	0,03146579	0,11297173	0,11283794	0,05476262	0,05067793	0,11283703
0,001	0,121	0,03225967	0,11872728	0,11858664	0,05756077	0,0530713	0,11858573
0,001	0,121	0,03288141	0,12333468	0,12318858	0,05980089	0,05498114	0,12318766
0,001	0,121	0,03394292	0,13140371	0,13124803	0,06372431	0,05831349	0,13124711
0,001	0,121	0,03482785	0,1383259	0,13816199	0,06709037	0,06116033	0,13816106
0,001	0,121	0,03537005	0,1426549	0,14248584	0,06919554	0,06293537	0,1424849
0,001	0,121	0,03632626	0,15045195	0,15027366	0,07298745	0,06612266	0,15027272
0,001	0,121	0,03708774	0,15680963	0,15662375	0,07607951	0,0687126	0,1566228
0,001	0,121	0,03810239	0,16548531	0,16528914	0,08029921	0,07223458	0,16528818
0,001	0,121	0,038501	0,1689575	0,16875721	0,0819881	0,07364034	0,16875625
0,001	0,121	0,03918912	0,17503643	0,1748289	0,08494501	0,07609641	0,17482794
0,001	0,121	0,03954494	0,17822189	0,17801059	0,08649454	0,07738094	0,17800962
0,001	0,121	0,0401206	0,1834363	0,1832188	0,08903108	0,07948004	0,18321782

0,001	0,121	0,04075099	0,18923268	0,18900832	0,09185084	0,08180832	0,18900734
0,001	0,121	0,0411867	0,19329178	0,19306256	0,0938255	0,08343564	0,19306158
0,001	0,121	0,04167926	0,19793228	0,19769756	0,09608307	0,08529302	0,19769657
0,001	0,121	0,04210568	0,20199408	0,20175453	0,09805916	0,08691616	0,20175354
0,001	0,121	0,04300564	0,21070201	0,21045215	0,10229577	0,09038798	0,21045115
0,001	0,121	0,04359562	0,21651039	0,21625359	0,10512176	0,09269789	0,21625259
0,001	0,121	0,0436542	0,21709131	0,21683385	0,10540442	0,09292868	0,21683285

---



**Tableau 2.11** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=56/60$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J			
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen	Selon Achour-Bedjaoui
0,001	0,056	0,00178	0,02265392	0,02263247	0,02394601	0,02130444	0,02263058
0,001	0,056	0,00191	0,02604667	0,02602201	0,02757147	0,02427538	0,02602006
0,001	0,056	0,00202	0,0291022	0,02907464	0,03083869	0,02692793	0,02907264
0,001	0,056	0,00214	0,03262864	0,03259772	0,03461153	0,02996529	0,03259568
0,001	0,056	0,00234	0,03895388	0,03891695	0,04138328	0,03535737	0,03891483
0,001	0,056	0,00262	0,04874967	0,04870343	0,0518795	0,04358993	0,04870121
0,001	0,056	0,00319	0,07208139	0,07201295	0,07690854	0,06276428	0,07201057
0,001	0,056	0,00386	0,10531988	0,1052198	0,11260763	0,08934122	0,10521726
0,001	0,056	0,00404	0,11532023	0,11521063	0,12335477	0,0972099	0,11520805
0,001	0,056	0,00432	0,13177761	0,13165233	0,14104598	0,11005457	0,13164969
0,001	0,056	0,00484	0,16525223	0,16509508	0,17704511	0,13583941	0,16509235
0,001	0,056	0,00553	0,21551266	0,21530762	0,23112317	0,17386779	0,21530477
0,001	0,056	0,00595	0,24936815	0,24913087	0,26756367	0,19911208	0,24912795
0,001	0,056	0,00622	0,27243599	0,27217677	0,29239772	0,21616829	0,27217381
0,001	0,056	0,00688	0,33311914	0,3328021	0,35774213	0,26055894	0,33279905
0,001	0,056	0,00802	0,45229423	0,45186362	0,48611828	0,34611715	0,45186043
0,001	0,056	0,00831	0,48551249	0,48505026	0,52190957	0,36965219	0,48504704
0,001	0,056	0,00874	0,53693363	0,53642238	0,57731931	0,40585543	0,53641912
0,001	0,056	0,00888	0,5542338	0,55370605	0,5959628	0,4179776	0,55370277
0,001	0,056	0,00954	0,63948628	0,63887732	0,68784402	0,47732676	0,63887398
0,001	0,056	0,01003	0,70672295	0,70604983	0,76031767	0,52372285	0,70604644
0,001	0,056	0,01096	0,84357601	0,84277249	0,90785047	0,61719349	0,84276902
0,001	0,056	0,01243	1,08457918	1,08354588	1,16771128	0,77920678	1,08354229

**Tableau 2.12** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=86/90$  mm

$\varepsilon$	D	$Q_{exp}$	$J_{exp}$	J			
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen	Selon Achour-Bedjaoui
m	m	m <sup>3</sup> /s	m/m				
0,001	0,086	0,00574	0,02349171	0,02346949	0,01124605	0,01144152	0,02346843
0,001	0,086	0,00652	0,0302538	0,03022515	0,01451013	0,01448657	0,03022404
0,001	0,086	0,00755	0,04049151	0,04045316	0,01945674	0,01900801	0,04045198
0,001	0,086	0,00901	0,05755446	0,05749989	0,02770931	0,02637116	0,05749863
0,001	0,086	0,01003	0,07125032	0,07118276	0,03433824	0,03216535	0,07118145
0,001	0,086	0,01119	0,08860064	0,0885166	0,04274018	0,03939238	0,08851524
0,001	0,086	0,01182	0,09881504	0,0987213	0,04768822	0,04359799	0,09871991
0,001	0,086	0,01282	0,11617227	0,11606202	0,05609862	0,05067428	0,1160606
0,001	0,086	0,01392	0,13688629	0,13675636	0,06613854	0,05901995	0,1367549
0,001	0,086	0,01527	0,1646291	0,16447283	0,07958921	0,07005656	0,16447133
0,001	0,086	0,01682	0,19963641	0,19944689	0,09656686	0,08379318	0,19944533
0,001	0,086	0,01796	0,22753578	0,22731973	0,11010038	0,09461375	0,22731814
0,001	0,086	0,0185	0,24138793	0,24115869	0,11682064	0,09994958	0,24115709
0,001	0,086	0,01916	0,2588741	0,25862824	0,12530464	0,10665357	0,25862662
0,001	0,086	0,0203	0,29051751	0,29024158	0,14065922	0,11870297	0,29023993
0,001	0,086	0,02138	0,32217806	0,32187201	0,15602405	0,13066317	0,32187034
0,001	0,086	0,0224	0,35358285	0,35324694	0,1712664	0,14244207	0,35324525
0,001	0,086	0,02317	0,37825762	0,37789827	0,18324334	0,15164285	0,37789655
0,001	0,086	0,02392	0,40309152	0,40270855	0,19529831	0,16085873	0,40270682
0,001	0,086	0,02464	0,42767476	0,42726846	0,20723235	0,16994075	0,42726671
0,001	0,086	0,02534	0,45227277	0,45184304	0,21917416	0,17899	0,45184128
0,001	0,086	0,02622	0,48417157	0,48371161	0,23466132	0,19067189	0,48370983
0,001	0,086	0,02726	0,5232716	0,52277441	0,2536459	0,20491456	0,52277261
0,001	0,086	0,02843	0,56907358	0,56853289	0,27588612	0,22149997	0,56853108
0,001	0,086	0,02878	0,58314837	0,58259431	0,28272077	0,22657661	0,58259249
0,001	0,086	0,03015	0,63989489	0,63928679	0,31027785	0,2469557	0,63928494

**Tableau 2.13** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=124/130$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J			
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen	Selon Achour-Bedjaoui
0,001	0,124	0,01955	0,03842772	0,03838214	0,01855277	0,01863059	0,03838142
0,001	0,124	0,02066	0,04289306	0,04284217	0,02071934	0,02063688	0,04284143
0,001	0,124	0,02114	0,04490001	0,04484672	0,02169328	0,02153363	0,04484598
0,001	0,124	0,02149	0,04639233	0,04633726	0,02241755	0,02219855	0,04633652
0,001	0,124	0,02218	0,04940578	0,04934712	0,02388022	0,02353659	0,04934637
0,001	0,124	0,02306	0,05338658	0,05332318	0,02581273	0,02529521	0,05332241
0,001	0,124	0,02349	0,05538782	0,05532204	0,02678436	0,02617569	0,05532127
0,001	0,124	0,02402	0,05790514	0,05783635	0,02800666	0,02727998	0,05783558
0,001	0,124	0,02464	0,0609209	0,06084853	0,02947112	0,02859838	0,06084774
0,001	0,124	0,02554	0,06543483	0,06535708	0,03166337	0,03056299	0,06535628
0,001	0,124	0,02679	0,07197177	0,07188621	0,0348386	0,03339091	0,0718854
0,001	0,124	0,02771	0,07698171	0,07689018	0,03727249	0,03554558	0,07688937
0,001	0,124	0,02789	0,07798164	0,07788891	0,03775829	0,03597439	0,07788809
0,001	0,124	0,02878	0,0830205	0,08292177	0,04020656	0,03812931	0,08292094
0,001	0,124	0,02922	0,08556988	0,08546812	0,04144534	0,03921593	0,08546728
0,001	0,124	0,02948	0,08709446	0,08699088	0,04218619	0,03986462	0,08699004
0,001	0,124	0,03015	0,09108523	0,09097687	0,04412553	0,04155879	0,09097603
0,001	0,124	0,03139	0,0987069	0,09858947	0,04782973	0,04477961	0,09858862
0,001	0,124	0,03417	0,11690693	0,11676777	0,05667679	0,05240024	0,11676689
0,001	0,124	0,03583	0,12850836	0,12835538	0,06231734	0,0572121	0,12835449
0,001	0,124	0,03695	0,13664588	0,13648316	0,06627415	0,06056821	0,13648226
0,001	0,124	0,0381	0,14526123	0,14508825	0,07046367	0,06410558	0,14508734
0,001	0,124	0,03942	0,15547481	0,15528962	0,07543077	0,06827944	0,1552887
0,001	0,124	0,04069	0,16562898	0,16543168	0,08036939	0,07240924	0,16543075

**Tableau 2.14** : valeurs du gradient hydraulique  $J$  selon les relations de Darcy (1.8) ; Manning-Strickler (1.13), Williams-Hazen (1.17) et Achour-Bedjaoui (1.20) pour  $D=130/140$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J			
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Manning-Strickler	Selon Williams-Hazen	Selon Achour-Bedjaoui
0,001	0,13	0,01478	0,01715146	0,0171326	0,00824297	0,00881697	0,01713202
0,001	0,13	0,01682	0,02217567	0,02215125	0,01067546	0,01120242	0,02215065
0,001	0,13	0,01782	0,02487385	0,02484646	0,01198258	0,01246704	0,02484584
0,001	0,13	0,01823	0,02602486	0,02599619	0,01254031	0,01300347	0,02599557
0,001	0,13	0,01864	0,0272019	0,02717193	0,01311072	0,01355027	0,0271713
0,001	0,13	0,02005	0,03144842	0,03141375	0,01516923	0,01550951	0,0314131
0,001	0,13	0,0209	0,0341571	0,03411943	0,01648266	0,01674917	0,03411877
0,001	0,13	0,02138	0,03573612	0,0356967	0,01724846	0,01746854	0,03569604
0,001	0,13	0,02207	0,03806846	0,03802647	0,01837974	0,01852696	0,03802579
0,001	0,13	0,02272	0,04033302	0,04028852	0,01947832	0,01955017	0,04028784
0,001	0,13	0,02274	0,04040375	0,04035916	0,01951263	0,01958205	0,04035848
0,001	0,13	0,02354	0,04328318	0,04323541	0,0209097	0,02087699	0,04323472
0,001	0,13	0,02392	0,04468562	0,0446363	0,02159022	0,02150542	0,0446356
0,001	0,13	0,02494	0,04856062	0,04850701	0,02347079	0,02323456	0,0485063
0,001	0,13	0,02641	0,05442855	0,05436843	0,02631914	0,02583434	0,05436771
0,001	0,13	0,02744	0,05873941	0,05867454	0,02841208	0,02773126	0,0586738
0,001	0,13	0,02825	0,06224491	0,06217614	0,03011423	0,02926634	0,0621754
0,001	0,13	0,0293	0,06694025	0,06686628	0,03239441	0,03131274	0,06686553
0,001	0,13	0,03024	0,0712885	0,07120972	0,0345063	0,0331986	0,07120896
0,001	0,13	0,03114	0,07557992	0,07549639	0,03659081	0,03505164	0,07549562
0,001	0,13	0,03194	0,07949981	0,07941192	0,03849503	0,03673758	0,07941115
0,001	0,13	0,03226	0,0810955	0,08100585	0,03927024	0,03742214	0,08100508
0,001	0,13	0,03311	0,08541107	0,08531663	0,04136692	0,03926871	0,08531585
0,001	0,13	0,03446	0,09249511	0,09239283	0,04480901	0,04228537	0,09239204
0,001	0,13	0,03541	0,09764933	0,09754134	0,04731367	0,04446963	0,09754054
0,001	0,13	0,03743	0,10907327	0,10895261	0,05286576	0,04928167	0,1089518
0,001	0,13	0,0383	0,11418812	0,1140618	0,05535188	0,05142406	0,11406097
0,001	0,13	0,03909	0,11893416	0,11880258	0,05765887	0,05340573	0,11880175
0,001	0,13	0,03999	0,12445881	0,12432108	0,06034449	0,05570527	0,12432025
0,001	0,13	0,04088	0,13004537	0,12990147	0,06306038	0,05802303	0,12990063
0,001	0,13	0,04192	0,1367289	0,13657757	0,06630975	0,06078641	0,13657673
0,001	0,13	0,04265	0,14152023	0,14136361	0,06863931	0,06276136	0,14136275
0,001	0,13	0,04342	0,14666352	0,1465012	0,0711401	0,06487596	0,14650034
0,001	0,13	0,04395	0,15025707	0,15009074	0,07288742	0,06635018	0,15008988

**Tableau 2.16** : Ecart sur le gradient hydraulique  $J$  pour  $D=49/50$  mm

$\varepsilon$ m (m)	D (m) m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	J exp m/m	J		
				Selon Darcy- Manning- Strickler	Selon Darcy- Williams- Hazen	Selon Darcy- Achour- Bedjaoui
0,001	0,049	0,003114	0,140516	61,34	0,00	31,92
0,001	0,049	0,003538	0,181203	62,02	0,00	31,85
0,001	0,049	0,003857	0,215209	62,47	0,00	31,80
0,001	0,049	0,00432	0,269775	63,07	0,00	31,74
0,001	0,049	0,004535	0,297119	63,32	0,00	31,72
0,001	0,049	0,004839	0,338204	63,65	0,00	31,69
0,001	0,049	0,005032	0,365636	63,86	0,00	31,68
0,001	0,049	0,005309	0,406839	64,13	0,00	31,65
0,001	0,049	0,005529	0,441222	64,34	0,00	31,64
0,001	0,049	0,005824	0,489424	64,60	0,00	31,62
0,001	0,049	0,006027	0,523898	64,77	0,00	31,61
0,001	0,049	0,006337	0,579127	65,03	0,00	31,59
0,001	0,049	0,006524	0,613685	65,17	0,00	31,58
0,001	0,049	0,006741	0,655193	65,33	0,00	31,57
0,001	0,049	0,007157	0,738326	65,63	0,00	31,56
0,001	0,049	0,007389	0,786887	65,79	0,00	31,55
0,001	0,049	0,007709	0,856339	66,00	0,00	31,53
0,001	0,049	0,008107	0,946752	66,24	0,00	31,52
0,001	0,049	0,008166	0,960674	66,28	0,00	31,52
0,001	0,049	0,008458	1,030328	66,45	0,00	31,51
0,001	0,049	0,008515	1,044267	66,48	0,00	31,51
0,001	0,049	0,00874	1,100054	66,61	0,00	31,50
0,001	0,049	0,009279	1,239705	66,90	0,00	31,49
0,001	0,049	0,009409	1,274657	66,96	0,00	31,49
0,001	0,049	0,009664	1,344605	67,09	0,00	31,48
0,001	0,049	0,009913	1,414608	67,21	0,00	31,48
0,001	0,049	0,010156	1,484664	67,33	0,00	31,47
0,001	0,049	0,010393	1,554772	67,43	0,00	31,47
0,001	0,049	0,010625	1,624929	67,54	0,00	31,46
0,001	0,049	0,01074	1,660024	67,59	0,00	31,46
0,001	0,049	0,011076	1,76538	67,73	0,00	31,45
0,001	0,049	0,011185	1,800521	67,78	0,00	31,45
0,001	0,049	0,011402	1,870833	67,87	0,00	31,45
0,001	0,049	0,01172	1,976378	68,00	0,00	31,44
0,001	0,049	0,011927	2,046791	68,08	0,00	31,44

**Tableau 2.17** Ecart sur le gradient hydraulique J pour  $D=86/90$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	J exp m/m	J		
				Selon Darcy-Manning-Strickler	Selon Darcy-Williams-Hazen	Selon Darcy-Achour-Bedjaoui
0,001	0,086	0,00755095	0,04050163	51,90	55,31	0,00
0,001	0,086	0,00845768	0,05074768	51,84	55,99	0,00
0,001	0,086	0,00953727	0,06445197	51,78	56,72	0,00
0,001	0,086	0,00966401	0,06616802	51,78	56,80	0,00
0,001	0,086	0,01050973	0,07819672	51,74	57,30	0,00
0,001	0,086	0,01182367	0,09887612	51,69	58,00	0,00
0,001	0,086	0,01202914	0,10232905	51,69	58,10	0,00
0,001	0,086	0,01202914	0,10232905	51,69	58,10	0,00
0,001	0,086	0,01223127	0,10578364	51,68	58,19	0,00
0,001	0,086	0,01319698	0,12307982	51,66	58,64	0,00
0,001	0,086	0,01338202	0,12654343	51,65	58,72	0,00
0,001	0,086	0,01392286	0,13694233	51,64	58,95	0,00
0,001	0,086	0,01427239	0,14388138	51,63	59,10	0,00
0,001	0,086	0,01543545	0,16820502	51,61	59,55	0,00
0,001	0,086	0,01621676	0,1856112	51,59	59,83	0,00
0,001	0,086	0,01636869	0,18909541	51,59	59,88	0,00
0,001	0,086	0,01725306	0,21001995	51,58	60,18	0,00
0,001	0,086	0,01767918	0,22049401	51,57	60,32	0,00
0,001	0,086	0,01795783	0,22748085	51,57	60,41	0,00
0,001	0,086	0,01823235	0,23447089	51,56	60,50	0,00
0,001	0,086	0,01863679	0,24496173	51,56	60,62	0,00
0,001	0,086	0,01903291	0,2554593	51,55	60,74	0,00
0,001	0,086	0,0194212	0,26596332	51,55	60,85	0,00
0,001	0,086	0,01980213	0,27647354	51,54	60,96	0,00
0,001	0,086	0,02017609	0,28698976	51,54	61,06	0,00
0,001	0,086	0,02078489	0,30452957	51,53	61,23	0,00
0,001	0,086	0,02090459	0,3080394	51,53	61,26	0,00
0,001	0,086	0,02137689	0,3220846	51,53	61,39	0,00
0,001	0,086	0,02183931	0,33613905	51,52	61,51	0,00
0,001	0,086	0,0225157	0,3572373	51,52	61,67	0,00
0,001	0,086	0,02284662	0,3677935	51,51	61,75	0,00
0,001	0,086	0,02328077	0,38187563	51,51	61,86	0,00
0,001	0,086	0,02370722	0,39596564	51,51	61,96	0,00
0,001	0,086	0,02433333	0,4171149	51,50	62,10	0,00
0,001	0,086	0,02474221	0,43122347	51,50	62,19	0,00

**Tableau 2.18** : Ecart sur le gradient hydraulique  $J$  pour  $D=60/63\text{mm}$

$\varepsilon$	D	$Q_{\text{exp}}$	J exp	J		
				Selon Darcy-Manning-Strickler	Selon Darcy-Williams-Hazen	Selon Darcy-Achour-Bedjaoui
m	m	$\text{m}^3/\text{s}$	m/m			
0,001	0,06	0,003733	0,06811326	52,38	56,25	0,00
0,001	0,06	0,004037	0,07959597	52,34	56,72	0,00
0,001	0,06	0,00432	0,09110099	52,31	57,12	0,00
0,001	0,06	0,004587	0,10262582	52,28	57,47	0,00
0,001	0,06	0,004839	0,11416848	52,26	57,79	0,00
0,001	0,06	0,005079	0,12572736	52,23	58,07	0,00
0,001	0,06	0,005529	0,14888861	52,20	58,56	0,00
0,001	0,06	0,005947	0,17210113	52,17	58,98	0,00
0,001	0,06	0,006883	0,23031842	52,13	59,82	0,00
0,001	0,06	0,007056	0,24198944	52,12	59,96	0,00
0,001	0,06	0,007709	0,28875239	52,09	60,46	0,00
0,001	0,06	0,008166	0,32389906	52,08	60,78	0,00
0,001	0,06	0,008313	0,33562744	52,07	60,88	0,00
0,001	0,06	0,008877	0,38259993	52,06	61,25	0,00
0,001	0,06	0,009013	0,39435684	52,05	61,33	0,00
0,001	0,06	0,009147	0,40611907	52,05	61,41	0,00
0,001	0,06	0,009537	0,4414357	52,04	61,64	0,00
0,001	0,06	0,009913	0,47679467	52,03	61,86	0,00
0,001	0,06	0,010035	0,4885899	52,03	61,92	0,00
0,001	0,06	0,010156	0,5003895	52,02	61,99	0,00
0,001	0,06	0,01051	0,53581278	52,02	62,18	0,00
0,001	0,06	0,010965	0,58309859	52,01	62,41	0,00
0,001	0,06	0,011294	0,61860134	52,00	62,57	0,00
0,001	0,06	0,011402	0,63044255	52,00	62,62	0,00
0,001	0,06	0,011615	0,65413508	52,00	62,72	0,00
0,001	0,06	0,011927	0,68969817	51,99	62,86	0,00
0,001	0,06	0,012131	0,71342242	51,99	62,95	0,00
0,001	0,06	0,012231	0,72528909	51,99	62,99	0,00
0,001	0,06	0,01243	0,74903117	51,99	63,08	0,00
0,001	0,06	0,012529	0,76090672	51,98	63,12	0,00
0,001	0,06	0,012626	0,77278491	51,98	63,16	0,00
0,001	0,06	0,012723	0,78466604	51,98	63,20	0,00
0,001	0,06	0,012915	0,80843619	51,98	63,28	0,00
0,001	0,06	0,013104	0,83221719	51,98	63,36	0,00
0,001	0,06	0,01329	0,85600855	51,97	63,43	0,00
0,001	0,06	0,01338202	0,86790797	51,97	63,47	0,00

**Tableau 2.19** Ecart sur le gradient hydraulique  $J$  pour  $D=69/80$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	$J$		
				Selon Darcy- Manning- Strickler	Selon Darcy- Williams- Hazen	Selon Darcy- Achour- Bedjaoui
0,001	0,069	0,00705554	0,11455294	30,84	59,26	0,00
0,001	0,069	0,00840018	0,16216018	30,75	60,25	0,00
0,001	0,069	0,01015563	0,23672987	30,66	61,30	0,00
0,001	0,069	0,01161468	0,30941112	30,61	62,04	0,00
0,001	0,069	0,01252855	0,35988269	30,58	62,44	0,00
0,001	0,069	0,01328981	0,40483608	30,57	62,76	0,00
0,001	0,069	0,0145292	0,48368152	30,54	63,24	0,00
0,001	0,069	0,01461384	0,48932113	30,54	63,27	0,00
0,001	0,069	0,01478169	0,50060351	30,53	63,33	0,00
0,001	0,069	0,01519348	0,52882582	30,53	63,47	0,00
0,001	0,069	0,01590869	0,57968296	30,51	63,71	0,00
0,001	0,069	0,01606344	0,59099395	30,51	63,76	0,00
0,001	0,069	0,01636869	0,6136259	30,51	63,86	0,00
0,001	0,069	0,01651926	0,62494664	30,50	63,91	0,00
0,001	0,069	0,01666852	0,63627049	30,50	63,96	0,00
0,001	0,069	0,0168165	0,64759743	30,50	64,00	0,00
0,001	0,069	0,01725306	0,68159635	30,49	64,14	0,00
0,001	0,069	0,01739622	0,69293503	30,49	64,18	0,00
0,001	0,069	0,01753826	0,70427662	30,49	64,22	0,00
0,001	0,069	0,01809559	0,74967074	30,48	64,38	0,00
0,001	0,069	0,01836812	0,7723836	30,48	64,46	0,00
0,001	0,069	0,01876973	0,80647223	30,47	64,57	0,00
0,001	0,069	0,01890176	0,81784006	30,47	64,61	0,00
0,001	0,069	0,01935701	0,85764644	30,47	64,73	0,00
0,001	0,069	0,01967595	0,88609699	30,46	64,81	0,00
0,001	0,069	0,02005219	0,92025617	30,46	64,91	0,00
0,001	0,069	0,02017609	0,931647	30,46	64,94	0,00
0,001	0,069	0,02048268	0,96013319	30,46	65,02	0,00
0,001	0,069	0,02060408	0,97153152	30,45	65,05	0,00



**Tableau 2.20** : Ecart sur le gradient hydraulique J pour  $D=77/80$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J		
				Selon Darcy- Manning- Strickler	Selon Darcy- Williams- Hazen	Selon Darcy- Achour- Bedjaoui
0,001	0,077	0,00614486	0,04844845	52,00	54,06	0,00
0,001	0,077	0,0065239	0,0545726	51,97	54,43	0,00
0,001	0,077	0,00705554	0,06377581	51,93	54,92	0,00
0,001	0,077	0,00722433	0,06684769	51,92	55,06	0,00
0,001	0,077	0,00770923	0,07607457	51,89	55,47	0,00
0,001	0,077	0,00786444	0,07915371	51,88	55,59	0,00
0,001	0,077	0,00816627	0,08531691	51,86	55,82	0,00
0,001	0,077	0,00887742	0,10075126	51,83	56,33	0,00
0,001	0,077	0,00927878	0,11002822	51,81	56,60	0,00
0,001	0,077	0,00953727	0,11621909	51,80	56,77	0,00
0,001	0,077	0,01003491	0,12861472	51,78	57,08	0,00
0,001	0,077	0,01096465	0,15345607	51,75	57,61	0,00
0,001	0,077	0,01107555	0,15656551	51,75	57,67	0,00
0,001	0,077	0,01161468	0,17212595	51,74	57,95	0,00
0,001	0,077	0,01243022	0,19706474	51,72	58,36	0,00
0,001	0,077	0,01262613	0,2033069	51,71	58,45	0,00
0,001	0,077	0,01300939	0,21579962	51,70	58,63	0,00
0,001	0,077	0,01328981	0,22517623	51,70	58,75	0,00
0,001	0,077	0,01374487	0,24081656	51,69	58,95	0,00
0,001	0,077	0,01409868	0,2533397	51,68	59,10	0,00
0,001	0,077	0,01444409	0,26587206	51,68	59,24	0,00
0,001	0,077	0,01486493	0,28154985	51,67	59,41	0,00
0,001	0,077	0,01527455	0,29724071	51,66	59,56	0,00
0,001	0,077	0,01543545	0,30352053	51,66	59,62	0,00
0,001	0,077	0,01590869	0,32237158	51,65	59,80	0,00
0,001	0,077	0,01606344	0,32865898	51,65	59,85	0,00
0,001	0,077	0,01651926	0,34753185	51,64	60,01	0,00
0,001	0,077	0,0168165	0,36012242	51,64	60,12	0,00
0,001	0,077	0,01718105	0,3758699	51,64	60,24	0,00
0,001	0,077	0,01725306	0,37902064	51,63	60,26	0,00
0,001	0,077	0,01739622	0,38532316	51,63	60,31	0,00
0,001	0,077	0,01760886	0,39477999	51,63	60,38	0,00
0,001	0,077	0,01788856	0,40739434	51,63	60,47	0,00
0,001	0,077	0,01802684	0,41370376	51,63	60,51	0,00
0,001	0,077	0,01823235	0,4231706	51,62	60,58	0,00
0,001	0,077	0,01850292	0,43579806	51,62	60,66	0,00
0,001	0,077	0,01863679	0,44211386	51,62	60,70	0,00

**Tableau 2.21** : Ecart sur le gradient hydraulique  $J D=87/90$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J		
				Selon Darcy- Manning- Strickler	Selon Darcy- Williams- Hazen	Selon Darcy- Achour- Bedjaoui
0,001	0,087	0,0065239	0,0284833	8,02	2,89	0,00
0,001	0,087	0,0065239	0,0284833	8,02	2,89	0,00
0,001	0,087	0,00670565	0,03008096	8,06	3,24	0,00
0,001	0,087	0,00722433	0,03488019	8,17	4,21	0,00
0,001	0,087	0,00845768	0,04771772	8,37	6,25	0,00
0,001	0,087	0,00914689	0,05576563	8,46	7,25	0,00
0,001	0,087	0,00966401	0,06221548	8,52	7,95	0,00
0,001	0,087	0,00978915	0,06382942	8,53	8,12	0,00
0,001	0,087	0,01027497	0,07029066	8,58	8,73	0,00
0,001	0,087	0,01062523	0,07514204	8,61	9,16	0,00
0,001	0,087	0,01118539	0,08323731	8,66	9,80	0,00
0,001	0,087	0,01129419	0,08485773	8,67	9,93	0,00
0,001	0,087	0,01171963	0,09134366	8,70	10,39	0,00
0,001	0,087	0,01233113	0,10108469	8,75	11,03	0,00
0,001	0,087	0,01310351	0,11409343	8,79	11,78	0,00
0,001	0,087	0,01338202	0,11897732	8,81	12,05	0,00
0,001	0,087	0,01383414	0,12712354	8,84	12,46	0,00
0,001	0,087	0,01409868	0,13201491	8,85	12,69	0,00
0,001	0,087	0,01444409	0,13854081	8,87	12,99	0,00
0,001	0,087	0,01486493	0,14670449	8,89	13,34	0,00
0,001	0,087	0,01543545	0,15814466	8,91	13,80	0,00
0,001	0,087	0,0156738	0,16305136	8,92	13,99	0,00
0,001	0,087	0,01575247	0,16468739	8,93	14,05	0,00
0,001	0,087	0,01590869	0,16796022	8,93	14,17	0,00
0,001	0,087	0,01598625	0,16959698	8,93	14,23	0,00
0,001	0,087	0,01636869	0,17778422	8,95	14,52	0,00
0,001	0,087	0,01689002	0,1892556	8,97	14,90	0,00
0,001	0,087	0,01753826	0,20401958	8,99	15,36	0,00
0,001	0,087	0,01802684	0,21551368	9,01	15,69	0,00
0,001	0,087	0,01823235	0,22044254	9,01	15,82	0,00
0,001	0,087	0,01876973	0,23359408	9,03	16,17	0,00
0,001	0,087	0,01916318	0,24346502	9,04	16,42	0,00
0,001	0,087	0,01935701	0,24840278	9,05	16,54	0,00
0,001	0,087	0,01954898	0,25334197	9,05	16,66	0,00
0,001	0,087	0,01992754	0,26322464	9,06	16,89	0,00
0,001	0,087	0,02023777	0,27146444	9,07	17,07	0,00

**Tableau 2.22** : Ecart sur le gradient hydraulique J pour  $D=107/110$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	J exp m/m	J		
				Selon Darcy- Manning- Strickler	Selon Darcy- Williams-Hazen	Selon Darcy- Achour- Bedjaoui
0,001	0,107	0,00940889	0,01963537	51,93	49,74	0,00
0,001	0,107	0,01050973	0,02446126	51,86	50,48	0,00
0,001	0,107	0,01161468	0,02983767	51,80	51,15	0,00
0,001	0,107	0,01262613	0,03522687	51,75	51,70	0,00
0,001	0,107	0,01374487	0,04170841	51,71	52,26	0,00
0,001	0,107	0,01478169	0,04820369	51,67	52,74	0,00
0,001	0,107	0,01503007	0,04982947	51,67	52,85	0,00
0,001	0,107	0,0156738	0,05416837	51,65	53,12	0,00
0,001	0,107	0,01689002	0,06286039	51,62	53,61	0,00
0,001	0,107	0,01823235	0,07320404	51,59	54,10	0,00
0,001	0,107	0,01909815	0,08029346	51,57	54,40	0,00
0,001	0,107	0,01992754	0,08739186	51,56	54,67	0,00
0,001	0,107	0,02060408	0,0934047	51,54	54,88	0,00
0,001	0,107	0,0210829	0,09778121	51,54	55,03	0,00
0,001	0,107	0,0214934	0,101613	51,53	55,15	0,00
0,001	0,107	0,02183931	0,10489904	51,52	55,25	0,00
0,001	0,107	0,02240434	0,1103791	51,52	55,41	0,00
0,001	0,107	0,02284662	0,11476601	51,51	55,54	0,00
0,001	0,107	0,02338809	0,12025308	51,50	55,69	0,00
0,001	0,107	0,0236013	0,12244896	51,50	55,74	0,00
0,001	0,107	0,02402225	0,12684241	51,50	55,85	0,00
0,001	0,107	0,02474221	0,13453628	51,49	56,04	0,00
0,001	0,107	0,02544244	0,14223667	51,48	56,21	0,00
0,001	0,107	0,02602813	0,14884186	51,47	56,35	0,00
0,001	0,107	0,02678976	0,15765556	51,47	56,53	0,00
0,001	0,107	0,0272091	0,16261649	51,46	56,63	0,00
0,001	0,107	0,0279846	0,17199323	51,46	56,80	0,00
0,001	0,107	0,02834243	0,17640848	51,45	56,88	0,00
0,001	0,107	0,02900184	0,18469147	51,45	57,02	0,00
0,001	0,107	0,02964706	0,19298003	51,44	57,16	0,00
0,001	0,107	0,03048677	0,20403967	51,44	57,33	0,00
0,001	0,107	0,03102079	0,21123326	51,43	57,44	0,00
0,001	0,107	0,03194441	0,22396937	51,42	57,61	0,00
0,001	0,107	0,03295833	0,23837983	51,42	57,80	0,00
0,001	0,107	0,03349197	0,24614475	51,41	57,90	0,00
0,001	0,107	0,03409195	0,25502354	51,41	58,01	0,00

**Tableau 2.23** : Ecart sur le gradient hydraulique  $J$  pour  $D=49/50$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J		
				Selon Darcy- Manning- Strickler	Selon Darcy- Williams-Hazen	Selon Darcy- Achour- Bedjaoui
0,001	0,049	0,00172	0,04319695	38,72	45,39	0,01
0,001	0,049	0,00191	0,05317857	38,62	46,14	0,01
0,001	0,049	0,00202	0,05943103	38,57	46,54	0,00
0,001	0,049	0,00234	0,07959492	38,45	47,59	0,00
0,001	0,049	0,00244	0,08649893	38,41	47,89	0,00
0,001	0,049	0,00253	0,09295795	38,39	48,14	0,00
0,001	0,049	0,00262	0,0996495	38,36	48,39	0,00
0,001	0,049	0,00296	0,12702696	38,28	49,25	0,00
0,001	0,049	0,00311	0,14016014	38,25	49,59	0,00
0,001	0,049	0,00319	0,14742858	38,24	49,77	0,00
0,001	0,049	0,00333	0,16059042	38,21	50,07	0,00
0,001	0,049	0,0034	0,16738232	38,20	50,21	0,00
0,001	0,049	0,00347	0,17431484	38,19	50,36	0,00
0,001	0,049	0,00354	0,18138808	38,18	50,49	0,00
0,001	0,049	0,00367	0,19489716	38,16	50,74	0,00
0,001	0,049	0,00386	0,21551385	38,14	51,09	0,00
0,001	0,049	0,00404	0,23600129	38,12	51,40	0,00
0,001	0,049	0,0041	0,24303711	38,11	51,50	0,00
0,001	0,049	0,00464	0,31100975	38,06	52,34	0,00
0,001	0,049	0,00469	0,31772685	38,05	52,41	0,00
0,001	0,049	0,00479	0,33137647	38,05	52,56	0,00
0,001	0,049	0,00503	0,36530663	38,03	52,88	0,00
0,001	0,049	0,00513	0,37993213	38,02	53,02	0,00
0,001	0,049	0,0054	0,42085487	38,00	53,36	0,00
0,001	0,049	0,00566	0,46223973	37,99	53,67	0,00
0,001	0,049	0,0057	0,46877888	37,98	53,72	0,00
0,001	0,049	0,00574	0,47536392	37,98	53,76	0,00
0,001	0,049	0,00578	0,48199483	37,98	53,81	0,00
0,001	0,049	0,00603	0,52447899	37,97	54,09	0,00
0,001	0,049	0,00611	0,53845285	37,96	54,17	0,00
0,001	0,049	0,00645	0,59989118	37,95	54,53	0,00
0,001	0,049	0,00649	0,6073374	37,95	54,57	0,00
0,001	0,049	0,00688	0,68234454	37,93	54,95	0,00
0,001	0,049	0,00692	0,69028445	37,93	54,98	0,00
0,001	0,049	0,00709	0,72454136	37,92	55,14	0,00
0,001	0,049	0,00712	0,73067286	37,92	55,17	0,00
0,001	0,049	0,00722	0,75129761	37,92	55,26	0,00

0,001	0,049	0,00729	0,7659059	37,91	55,32	0,00
0,001	0,049	0,00755	0,82139601	37,90	55,55	0,00
0,001	0,049	0,00765	0,84325509	37,90	55,63	0,00
0,001	0,049	0,00777	0,86986496	37,90	55,73	0,00
0,001	0,049	0,0078	0,87658189	37,90	55,75	0,00
0,001	0,049	0,00783	0,88332489	37,90	55,78	0,00
0,001	0,049	0,00793	0,90598764	37,89	55,86	0,00
0,001	0,049	0,00802	0,92662964	37,89	55,93	0,00
0,001	0,049	0,00817	0,96154942	37,89	56,05	0,00
0,001	0,049	0,00823	0,9756984	37,88	56,09	0,00
0,001	0,049	0,00831	0,99472411	37,88	56,16	0,00
0,001	0,049	0,00888	1,1356007	37,87	56,57	0,00

---

**Tableau 2.24** : Ecart sur le gradient hydraulique  $J$  pour  $D=121/125$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J		
				Selon Darcy- Manning- Strickler	Selon Darcy- Williams- Hazen	Selon Darcy- Achour-Bedjaoui
0,001	0,121	0,01511199	0,02621919	51,77	50,25	0,00
0,001	0,121	0,01606344	0,02960398	51,73	50,66	0,00
0,001	0,121	0,0168165	0,03242862	51,71	50,97	0,00
0,001	0,121	0,01795783	0,03695484	51,68	51,41	0,00
0,001	0,121	0,01863679	0,03978764	51,66	51,66	0,00
0,001	0,121	0,01954898	0,04375818	51,64	51,98	0,00
0,001	0,121	0,02029926	0,04716549	51,62	52,23	0,00
0,001	0,121	0,02090459	0,05000755	51,61	52,42	0,00
0,001	0,121	0,0214934	0,05285187	51,60	52,61	0,00
0,001	0,121	0,0225157	0,057977	51,58	52,92	0,00
0,001	0,121	0,02262653	0,05854687	51,58	52,95	0,00
0,001	0,121	0,02338809	0,06253809	51,56	53,17	0,00
0,001	0,121	0,02349493	0,06310856	51,56	53,20	0,00
0,001	0,121	0,02391768	0,06539119	51,56	53,31	0,00
0,001	0,121	0,02474221	0,06995982	51,54	53,53	0,00
0,001	0,121	0,02529397	0,07310325	51,54	53,68	0,00
0,001	0,121	0,02650663	0,08025452	51,52	53,98	0,00
0,001	0,121	0,0273475	0,0854092	51,51	54,19	0,00
0,001	0,121	0,02793956	0,08913484	51,50	54,32	0,00
0,001	0,121	0,02851972	0,09286275	51,50	54,46	0,00
0,001	0,121	0,02939062	0,09860222	51,49	54,65	0,00
0,001	0,121	0,02990137	0,10204826	51,48	54,76	0,00
0,001	0,121	0,03048677	0,1060708	51,48	54,89	0,00
0,001	0,121	0,03146579	0,11297173	51,47	55,09	0,00
0,001	0,121	0,03225967	0,11872728	51,46	55,25	0,00
0,001	0,121	0,03288141	0,12333468	51,46	55,37	0,00
0,001	0,121	0,03394292	0,13140371	51,45	55,57	0,00
0,001	0,121	0,03482785	0,1383259	51,44	55,73	0,00
0,001	0,121	0,03537005	0,1426549	51,44	55,83	0,00
0,001	0,121	0,03632626	0,15045195	51,43	56,00	0,00
0,001	0,121	0,03708774	0,15680963	51,43	56,13	0,00
0,001	0,121	0,03810239	0,16548531	51,42	56,30	0,00
0,001	0,121	0,038501	0,1689575	51,42	56,36	0,00
0,001	0,121	0,03918912	0,17503643	51,41	56,47	0,00
0,001	0,121	0,03954494	0,17822189	51,41	56,53	0,00
0,001	0,121	0,0401206	0,1834363	51,41	56,62	0,00
0,001	0,121	0,04075099	0,18923268	51,40	56,72	0,00

0,001	0,121	0,0411867	0,19329178	51,40	56,78	0,00
0,001	0,121	0,04167926	0,19793228	51,40	56,86	0,00
0,001	0,121	0,04210568	0,20199408	51,40	56,92	0,00
0,001	0,121	0,04300564	0,21070201	51,39	57,05	0,00
0,001	0,121	0,04359562	0,21651039	51,39	57,13	0,00
0,001	0,121	0,0436542	0,21709131	51,39	57,14	0,00

---

**Tableau 2.25** : Ecart sur le gradient hydraulique J pour  $D=56/60$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J		
				Selon Darcy- Manning- Strickler	Selon Darcy- Williams- Hazen	Selon Darcy- Achour- Bedjaoui
0,001	0,056	0,00178	0,02265392	5,80	5,87	0,01
0,001	0,056	0,00191	0,02604667	5,95	6,71	0,01
0,001	0,056	0,00202	0,0291022	6,07	7,38	0,01
0,001	0,056	0,00214	0,03262864	6,18	8,08	0,01
0,001	0,056	0,00234	0,03895388	6,34	9,15	0,01
0,001	0,056	0,00262	0,04874967	6,52	10,50	0,00
0,001	0,056	0,00319	0,07208139	6,80	12,84	0,00
0,001	0,056	0,00386	0,10531988	7,02	15,09	0,00
0,001	0,056	0,00404	0,11532023	7,07	15,62	0,00
0,001	0,056	0,00432	0,13177761	7,14	16,41	0,00
0,001	0,056	0,00484	0,16525223	7,24	17,72	0,00
0,001	0,056	0,00553	0,21551266	7,35	19,25	0,00
0,001	0,056	0,00595	0,24936815	7,40	20,08	0,00
0,001	0,056	0,00622	0,27243599	7,43	20,58	0,00
0,001	0,056	0,00688	0,33311914	7,49	21,71	0,00
0,001	0,056	0,00802	0,45229423	7,58	23,40	0,00
0,001	0,056	0,00831	0,48551249	7,60	23,79	0,00
0,001	0,056	0,00874	0,53693363	7,62	24,34	0,00
0,001	0,056	0,00888	0,5542338	7,63	24,51	0,00
0,001	0,056	0,00954	0,63948628	7,66	25,29	0,00
0,001	0,056	0,01003	0,70672295	7,69	25,82	0,00
0,001	0,056	0,01096	0,84357601	7,72	26,77	0,00
0,001	0,056	0,01243	1,08457918	7,77	28,09	0,00



**Tableau 2.26** Ecart sur le gradient hydraulique J pour  $D=86/90$  mm

$\varepsilon$	D	$Q_{exp}$	J exp	J		
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Darcy-Weisbach	Selon Darcy-Weisbach
m	m	m <sup>3</sup> /s	m/m			
0,001	0,086	0,00574	0,02349171	52,08	51,25	0,00
0,001	0,086	0,00652	0,0302538	51,99	52,07	0,00
0,001	0,086	0,00755	0,04049151	51,90	53,01	0,00
0,001	0,086	0,00901	0,05755446	51,81	54,14	0,00
0,001	0,086	0,01003	0,07125032	51,76	54,81	0,00
0,001	0,086	0,01119	0,08860064	51,72	55,50	0,00
0,001	0,086	0,01182	0,09881504	51,69	55,84	0,00
0,001	0,086	0,01282	0,11617227	51,66	56,34	0,00
0,001	0,086	0,01392	0,13688629	51,64	56,84	0,00
0,001	0,086	0,01527	0,1646291	51,61	57,41	0,00
0,001	0,086	0,01682	0,19963641	51,58	57,99	0,00
0,001	0,086	0,01796	0,22753578	51,57	58,38	0,00
0,001	0,086	0,0185	0,24138793	51,56	58,55	0,00
0,001	0,086	0,01916	0,2588741	51,55	58,76	0,00
0,001	0,086	0,0203	0,29051751	51,54	59,10	0,00
0,001	0,086	0,02138	0,32217806	51,53	59,41	0,00
0,001	0,086	0,0224	0,35358285	51,52	59,68	0,00
0,001	0,086	0,02317	0,37825762	51,51	59,87	0,00
0,001	0,086	0,02392	0,40309152	51,50	60,06	0,00
0,001	0,086	0,02464	0,42767476	51,50	60,23	0,00
0,001	0,086	0,02534	0,45227277	51,49	60,39	0,00
0,001	0,086	0,02622	0,48417157	51,49	60,58	0,00
0,001	0,086	0,02726	0,5232716	51,48	60,80	0,00
0,001	0,086	0,02843	0,56907358	51,47	61,04	0,00
0,001	0,086	0,02878	0,58314837	51,47	61,11	0,00
0,001	0,086	0,03015	0,63989489	51,46	61,37	0,00

**Tableau 2.27** : Ecart sur le gradient hydraulique  $J$  pour  $D=124/130$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	$J_{exp}$ m/m	J		
				Selon Darcy-Weisbach	Selon Darcy-Weisbach	Selon Darcy-Weisbach
0,001	0,124	0,01955	0,03842772	51,66	51,46	0,00
0,001	0,124	0,02066	0,04289306	51,64	51,83	0,00
0,001	0,124	0,02114	0,04490001	51,63	51,98	0,00
0,001	0,124	0,02149	0,04639233	51,62	52,09	0,00
0,001	0,124	0,02218	0,04940578	51,61	52,30	0,00
0,001	0,124	0,02306	0,05338658	51,59	52,56	0,00
0,001	0,124	0,02349	0,05538782	51,58	52,68	0,00
0,001	0,124	0,02402	0,05790514	51,58	52,83	0,00
0,001	0,124	0,02464	0,0609209	51,57	53,00	0,00
0,001	0,124	0,02554	0,06543483	51,55	53,24	0,00
0,001	0,124	0,02679	0,07197177	51,54	53,55	0,00
0,001	0,124	0,02771	0,07698171	51,53	53,77	0,00
0,001	0,124	0,02789	0,07798164	51,52	53,81	0,00
0,001	0,124	0,02878	0,0830205	51,51	54,02	0,00
0,001	0,124	0,02922	0,08556988	51,51	54,12	0,00
0,001	0,124	0,02948	0,08709446	51,51	54,17	0,00
0,001	0,124	0,03015	0,09108523	51,50	54,32	0,00
0,001	0,124	0,03139	0,0987069	51,49	54,58	0,00
0,001	0,124	0,03417	0,11690693	51,46	55,12	0,00
0,001	0,124	0,03583	0,12850836	51,45	55,43	0,00
0,001	0,124	0,03695	0,13664588	51,44	55,62	0,00
0,001	0,124	0,0381	0,14526123	51,43	55,82	0,00
0,001	0,124	0,03942	0,15547481	51,43	56,03	0,00
0,001	0,124	0,04069	0,16562898	51,42	56,23	0,00

**Tableau 2.28** Ecarts sur le gradient hydraulique J pour  $D=130/140$  mm

$\varepsilon$	m	$Q_{exp}$ m <sup>3</sup> /s	J exp m/m	Ecarts sur J		
				Selon Darcy- Manning- Strickler	Selon Darcy- Williams- Hazen	Selon Darcy- Achour- Bedjaoui
0,001	0,13	0,01478	0,01715146	51,89	48,54	0,00
0,001	0,13	0,01682	0,02217567	51,81	49,43	0,00
0,001	0,13	0,01782	0,02487385	51,77	49,82	0,00
0,001	0,13	0,01823	0,02602486	51,76	49,98	0,00
0,001	0,13	0,01864	0,0272019	51,75	50,13	0,00
0,001	0,13	0,02005	0,03144842	51,71	50,63	0,00
0,001	0,13	0,0209	0,0341571	51,69	50,91	0,00
0,001	0,13	0,02138	0,03573612	51,68	51,06	0,00
0,001	0,13	0,02207	0,03806846	51,67	51,28	0,00
0,001	0,13	0,02272	0,04033302	51,65	51,47	0,00
0,001	0,13	0,02274	0,04040375	51,65	51,48	0,00
0,001	0,13	0,02354	0,04328318	51,64	51,71	0,00
0,001	0,13	0,02392	0,04468562	51,63	51,82	0,00
0,001	0,13	0,02494	0,04856062	51,61	52,10	0,00
0,001	0,13	0,02641	0,05442855	51,59	52,48	0,00
0,001	0,13	0,02744	0,05873941	51,58	52,74	0,00
0,001	0,13	0,02825	0,06224491	51,57	52,93	0,00
0,001	0,13	0,0293	0,06694025	51,55	53,17	0,00
0,001	0,13	0,03024	0,0712885	51,54	53,38	0,00
0,001	0,13	0,03114	0,07557992	51,53	53,57	0,00
0,001	0,13	0,03194	0,07949981	51,52	53,74	0,00
0,001	0,13	0,03226	0,0810955	51,52	53,80	0,00
0,001	0,13	0,03311	0,08541107	51,51	53,97	0,00
0,001	0,13	0,03446	0,09249511	51,50	54,23	0,00
0,001	0,13	0,03541	0,09764933	51,49	54,41	0,00
0,001	0,13	0,03743	0,10907327	51,48	54,77	0,00
0,001	0,13	0,0383	0,11418812	51,47	54,92	0,00
0,001	0,13	0,03909	0,11893416	51,47	55,05	0,00
0,001	0,13	0,03999	0,12445881	51,46	55,19	0,00
0,001	0,13	0,04088	0,13004537	51,46	55,33	0,00
0,001	0,13	0,04192	0,1367289	51,45	55,49	0,00
0,001	0,13	0,04265	0,14152023	51,44	55,60	0,00
0,001	0,13	0,04342	0,14666352	51,44	55,72	0,00
0,001	0,13	0,04395	0,15025707	51,44	55,79	0,00