

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mohamed KHIDER de Biskra  
Faculté des sciences et des sciences de l'ingénieur  
Département d'Hydraulique

Mémoire présenté par :

**LAKEHAL Moussa**

Ingénieur d'état en génie civil  
En vue de l'obtention du diplôme de Magister es sciences hydrauliques  
Option : Ouvrages hydrauliques

Intitulé du Mémoire

**RELATIONS THEORIQUES DE L'ECOULEMENT  
UNIFORME EN CONDUITES CIRCULAIRES**

## INTRODUCTION GENERALE

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 hauteur normale; 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.

Les relations de calcul de la profondeur normale dans les canaux expriment de manière approximative la vitesse moyenne  $V$  sous l'hypothèse d'un régime turbulent. Ce régime doit être considéré non seulement comme étant turbulent, mais aussi comme étant rugueux en raison du fait que l'effet des forces dues à la viscosité est laissé hors considération. Les relations appliquées se présentent, en règle générale, sous la forme  $V = CR_h^\beta J^\gamma$ , où  $R_h$  est le rayon hydraulique,  $J$  est la pente de la ligne de charge,  $C$  est un paramètre qui traduit la résistance de l'écoulement et dépend de la vitesse moyenne  $V$ , de  $R_h$ , de la rugosité absolue  $\varepsilon$  des parois du canal, de la viscosité du liquide et de beaucoup d'autres facteurs. L'une des premières formules destinées au calcul de l'écoulement uniforme est probablement celle de *Chézy*, correspondant à  $\beta = \gamma = 1/2$ . Le coefficient  $C$  de *Chézy* a été estimé par plusieurs auteurs (*Ganguillet et Kutter*, 1869; *Bazin*, 1897; *Powell*, 1950). Mais, la relation la plus largement utilisée pour les écoulements uniformes dans les canaux ouverts est celle de *Manning* (1891) en raison de sa forme simplifiée et aux résultats satisfaisants auxquels elle aboutit. Dans cette relation,  $\beta = 2/3$  et  $\gamma = 1/2$  tandis que  $C = k = 1/n$  où  $n$  est le coefficient de rugosité appelé aussi coefficient de *Manning*. La même forme de la relation ayant été introduite indépendamment par *Strickler* (1923), cette relation est souvent appelée formule de *Manning-Strickler*. Il n'existe aucune méthode exacte qui permet d'évaluer  $n$ . Évaluer  $n$  revient à estimer la résistance de l'écoulement dans un canal donné, ce qui nécessite

beaucoup d'expérience et de pratique. Notons cependant que *Hager* (1987) a pu lier, à travers une relation fortement intéressante, le coefficient  $k$  et la rugosité absolue  $\varepsilon$ . Une autre relation qui servira de base à notre étude est celle de *Darcy-Weisbach*, initialement formulée par *Weisbach* (1845) et reprise par *Darcy* (1854) dans ses recherches expérimentales. Cette relation, développée pour les écoulements en conduites, se présente sous la forme  $J=fV^2/(2gD)$  où  $f$  est le coefficient de frottement,  $D$  est le diamètre de la conduite et  $g$  est l'accélération de la pesanteur. Le coefficient de frottement  $f$  dépend à la fois de la rugosité relative  $\varepsilon/D$  et du nombre de *Reynolds*  $R$ . La nature du régime d'écoulement dans la conduite peut être examinée à travers la variation de  $f=\phi(R,\varepsilon/D)$ . Le graphique obtenu est communément appelé diagramme de *Stanton* (1914).

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 *Nikuradse* sera utilisée lors de notre développement théorique.

Bien que la relation de *Darcy-Weisbach* (1854, 1845) ait été développée pour le cas des conduites, elle est également applicable aux canaux ouverts, en remplaçant  $D$  par le diamètre hydraulique  $D_h$ .

Dans le cas le plus général, l'écoulement est régi par une fonction de six paramètres que l'on peut écrire sous la forme  $\varphi(a,Q,J,\varepsilon,w,\nu)=0$ , où :

- $a$  est une dimension linéaire quelconque liée à l'écoulement ou au profil géométrique du canal considéré. Cette dimension linéaire peut être à titre d'exemple la profondeur  $h$  de l'écoulement, la largeur  $b$  d'un canal rectangulaire ou la petite base d'un trapèze, le diamètre  $D$  d'une conduite circulaire,...
- $w$  est le paramètre de forme ou rapport d'aspect du profil liquide en écoulement, correspondant à  $w=\eta=b/h$  pour le cas du canal rectangulaire ou trapézoïdal, à  $w=\xi=h/D$  pour le cas du profil circulaire,...
- $\nu$  est la viscosité cinématique du liquide en écoulement.

En pratique, trois catégories de problèmes peuvent se poser. La première catégorie répond à un besoin de dimensionnement et consiste à rechercher la dimension linéaire  $a$  à partir des valeurs connues des cinq autres paramètres régissant l'écoulement. La relation fonctionnelle  $\varphi$  devient  $a=\phi_a(Q,J,\varepsilon,w,\nu)$ . A l'exception de la méthode dite "méthode *Larhyss*", la bibliographie montre qu'il n'existe aucune relation explicite susceptible de répondre à cette catégorie de

problème lorsque l'écoulement est de nature lisse ou de transition. Ceci s'explique par l'impossibilité d'évaluer le nombre de *Reynolds*  $R$ , puisque celui-ci dépend de la dimension linéaire  $a$  recherchée. Le problème peut être résolu en s'appuyant sur un procédé itératif.

La méthode *Larhyss* (2002), développée par le laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface, sera particulièrement exposée dans le chapitre III de la première partie.

Dans le domaine rugueux, pour lequel la dimension linéaire  $a$  est indépendante de  $R$ , l'application des relations de type *Manning-Strickler* (1891, 1923) donnent des résultats satisfaisants.

La deuxième catégorie de problème consiste à rechercher la valeur du débit volume  $Q$  tel que  $Q=\varphi_Q(a,J,\varepsilon,w,\nu)$ . Ce problème trouve sa solution, et de manière explicite, en combinant les relations de *Colebrook-White* et de *Darcy-Weisbach*, et ce quelle que soit la nature du régime d'écoulement.

La troisième catégorie de problème est celle qui consiste à évaluer le gradient de la perte de charge  $J$  tel que  $J=\varphi_J(a,Q,\varepsilon,w,\nu)$ . Pour ce cas, l'application des relations de type *Darcy-Weisbach* (1854, 1845) est suffisante.

Notre modeste contribution sera exclusivement consacrée à l'étude du régime d'écoulement permanent uniforme turbulent rugueux.

Dans cette étude, nous proposons d'établir une relation généralisée susceptible de répondre à la première catégorie de problème ci-dessus exposé. Il s'agit en fait d'exprimer de manière pratique la relation fonctionnelle  $\varphi_a$ . Cette généralisation est possible par la combinaison des relations de *Darcy-Weisbach* et de *Nikuradse*.

Pour atteindre cet objectif, nous proposons de subdiviser notre étude en deux parties principales.

- La première partie, intitulée *Formules usuelles et nouvelles de l'écoulement uniforme et leur corrélation*, se compose de trois chapitres qui présentent un état de connaissances sur les formules usuelles de l'écoulement uniforme, leur développement théorique et leur limite d'applicabilité avec une présentation particulière de la méthode *Larhyss* (2002). Une attention particulière est accordée à l'application de ces relations au cas de la conduite circulaire, profil largement utilisé dans la pratique de l'ingénieur hydraulicien.
- La seconde partie, intitulée *Approche théorique au calcul de l'écoulement uniforme*, constitue notre modeste contribution au sujet traité. Cette partie est également composée de deux chapitres principaux, présentant respectivement notre développement théorique et sa vérification expérimentale. Celle-ci vise à étayer les relations théoriques que nous

avons proposé et dont les résultats ont été comparés aux données de la littérature (*Dupont, 1988; Gali, 2002*).

## I. APPROCHE THEORIQUE AU CALCUL DE L'ÉCOULEMENT UNIFORME

### I.1. Introduction

Dans cette partie de notre mémoire, un développement théorique sera proposé au calcul de l'écoulement uniforme en régime turbulent rugueux. Notre approche s'appuiera sur la relation de *Nikuradse* exprimant le coefficient de frottement.

Par une approche nouvelle, une relation généralisée, applicable à tout profil de canaux, sera proposée et discutée. Elle exprimera notamment la variation de la conductivité du canal en fonction de divers paramètres hydrauliques caractérisant l'écoulement. L'attention portera plus particulièrement sur son application aux conduites circulaires, faisant l'objet de notre recherche. Nous déduirons ainsi la relation régissant l'écoulement uniforme en conduites circulaires aussi bien lorsque celles-ci sont en charges et à surface libre.

Des facteurs liés à la dimension linéaire des conduites seront introduits et leur rôle sera clairement défini. Nous montrerons la variation de ces paramètres de dimension en fonction du paramètre de forme de l'écoulement dont il dépend exclusivement. Nous indiquerons aussi leur valeur optimale ainsi que l'intervalle dans lequel ils évoluent.

En outre, le développement théorique nous permettra de déduire la relation  $k - \varepsilon$  dont les valeurs seront confrontées à celles données par la bibliographie.

Les relations obtenues seront en règle générale implicite et nous proposerons de les remplacer, dans une excellente approximation, par des relations plus simples et plus pratiques.

Enfin, nous terminerons cette partie de l'étude par une présentation de quelques applications dans le but de mieux apprécier la fiabilité, la simplicité et la rapidité des relations théoriques que nous aurons proposées.

### I.2. Relation théorique au calcul des conduites dans le domaine d'écoulement turbulent rugueux

#### I.2.1. Transformation de la formule de *Nikuradse*

La représentation graphique de la relation (55) de *Nikuradse* dans un système de coordonnées à divisions logarithmiques est indiquée sur la figure 8 et 9. Nous reportons sur l'axe des ordonnées les valeurs de  $f^{-1/2}$  et sur l'axe des abscisses les valeurs du diamètre hydraulique  $D_h$ . La courbe a été tracée pour une valeur arbitrairement choisie de la rugosité absolue  $\varepsilon = \varepsilon_1$ .

Nous préconisons dans notre approche de remplacer la courbe de *Nikuradse* par une infinité de droites parallèles ou sécantes équilibrées de même pente, comme indiqué sur la figure 8. Ces droites sont donc de type puissance et peuvent s'écrire sous la forme :

$$y = \beta x^\theta \quad (162)$$

où  $y = f^{-1/2}$  et  $x = D_h$

Notre approche diffère de celle de *Strickler* qui suggère le remplacement de la courbe de *Nikuradse* par une seule droite sécante équilibrée de pente  $\theta = 1/6$  (figure 9). Selon cette approche, le coefficient de résistance de *Strickler* et de *Nikuradse* ne seront égaux que pour deux valeurs seulement du diamètre hydraulique  $D_h$ . Par contre, le balayage de l'ensemble des points de la courbe de *Nikuradse* par une infinité de droites sécantes équilibrées permet d'égaliser les coefficients de résistance pour toute la gamme des diamètres hydrauliques considérés. Ceci permet de définir avec la plus grande précision possible tout diamètre hydraulique correspondant à l'égalité des coefficients de résistance pour une valeur donnée de la rugosité absolue.

Dans un premier temps, nous affectons à l'exposant  $\theta$ , figurant dans la relation (162), la valeur  $1/6$  de *Strickler* et l'on peut alors écrire :

$$y = \beta x^{1/6} \quad (163)$$

Or, dans le domaine d'écoulement turbulent rugueux, le coefficient de frottement  $f$  selon *Nikuradse* est donnée par la relation (55), soit :

$$f^{-1/2} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} \right) \quad (55)$$

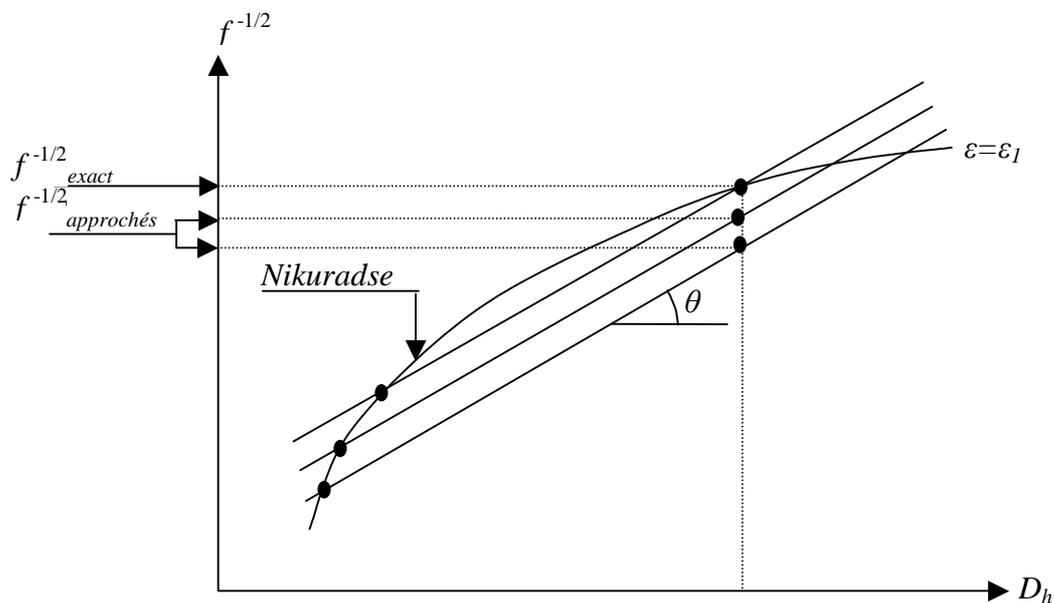


Figure 8 : Droites sécantes équilibrant la courbe de *Nikuradse* en régime turbulent rugueux, selon une approche nouvelle.

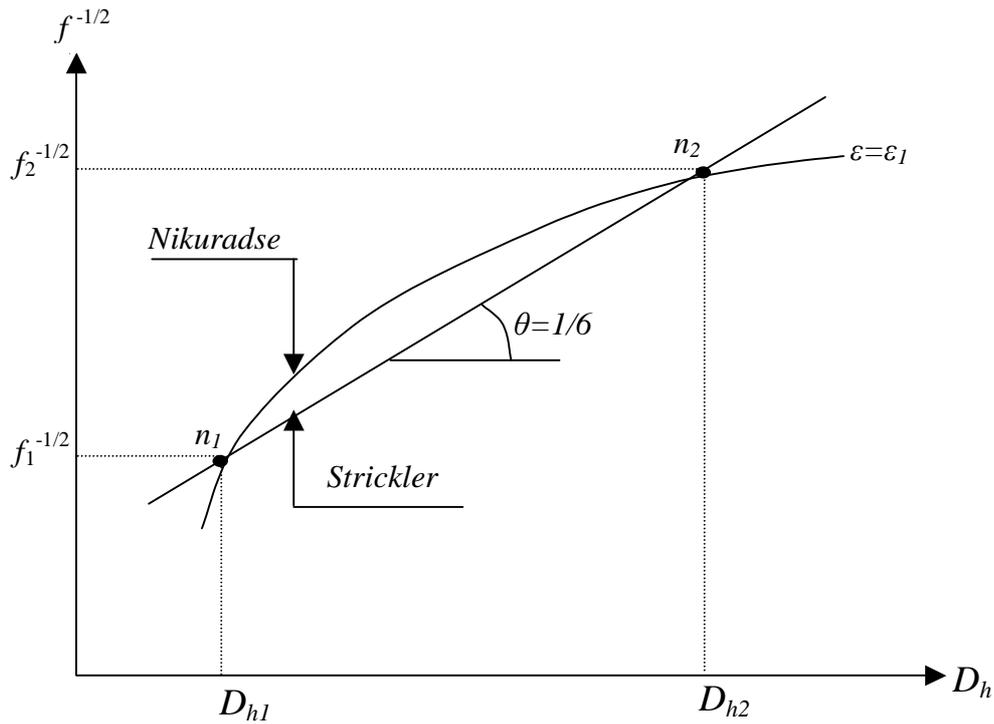


Figure 9 : Droite sécante équilibrant la courbe de *Nikuradse* en régime turbulent rugueux, selon l'approche de *Strickler*

En tenant compte de (163), la relation (55) s'écrit :

$$f^{-1/2} = \beta D_h^{1/6} \quad (164)$$

Ou bien :

$$\beta = \frac{1}{f^{1/2} D_h^{1/6}} \quad (165)$$

Ainsi, le coefficient  $\beta$  dépend à la fois du coefficient de frottement  $f$  ainsi que du diamètre hydraulique  $D_h$ , pour une valeur donnée de la rugosité absolue caractérisant la paroi de la conduite considérée. Notons que la relation (165) est applicable à toute conduite circulaire partiellement ou entièrement occupée par l'écoulement.

Le coefficient de frottement  $f$  et le diamètre hydraulique  $D_h$  sont liés par la formule de *Darcy – Weisbach* et représentée par la relation (53), soit :

$$J = \frac{f}{D_h} \frac{V^2}{2g} \quad (53)$$

Cette relation peut également s'écrire :

$$V = \sqrt{\frac{2g}{f}} \sqrt{D_h} \sqrt{J} \quad (166)$$

De plus :

$$D_h = 4R_h \quad (167)$$

En tenant compte de (164) et (167), la relation (166) devient :

$$V = 4^{2/3} \sqrt{2g} \beta R_h^{2/3} \sqrt{J} \quad (168)$$

Rappelons que la formule de *Manning - Strickler* s'écrit :

$$V = k R_h^{2/3} J^{1/2} \quad (10)$$

En comparant les relations (10) et (168) :

$$k = 4^{2/3} \sqrt{2g} \beta \quad (169)$$

La relation (169) montre clairement que le coefficient de résistance  $k$  de l'écoulement en régime turbulent rugueux et au sens de *Strickler*, s'exprime non seulement en fonction de la rugosité absolue  $\varepsilon$  mais aussi du diamètre hydraulique  $D_h$ . Ces deux derniers paramètres étant implicitement représentés par le facteur  $\beta$  selon les relations (55) et (165).

La relation (168) s'exprime, en tenant compte de la relation (169) :

$$V = k R_h^{2/3} \sqrt{J} \quad (170)$$

Etant donné que la vitesse moyenne  $V$  d'un écoulement est telle que  $V = Q/A$ , la relation (170) s'écrit :

$$\frac{Q}{k \sqrt{J}} = A R_h^{2/3} \quad (171)$$

En définissant le paramètre de cambrure  $\mu = \frac{R_h}{P}$ , le périmètre mouillé  $P$  est alors :

$$P = \frac{R_h}{\mu} \quad (172)$$

De plus, le rayon hydraulique s'écrit :

$$R_h = \frac{A}{P}$$

Soit :

$$A = P R_h \quad (173)$$

En vertu de (172), la relation (173) devient :

$$A = \frac{R_h^2}{\mu} \quad (174)$$

En tenant compte de (174), la relation (171) peut s'écrire :

$$\frac{Q}{k \sqrt{J}} = \frac{R_h^{8/3}}{\mu} \quad (175)$$

Le terme figurant dans le membre droit de la relation (175) représente le facteur de section qui dépend à la fois de l'aire de la section mouillée  $A$  et du périmètre mouillé  $P$ . Ces derniers paramètres dépendent à leur tour de la dimension linéaire  $a$ . Au cours du chapitre III de la 1<sup>ère</sup> partie, nous avons montré que, quelle que soit la forme du profil géométrique considéré :

$$A = a^2 A_1 \quad (90)$$

$$P = a P_1 \quad (91)$$

Rappelons que les paramètres  $A_1$  et  $P_1$  sont adimensionnels et correspondent respectivement à l'aire de la section mouillée et au périmètre mouillé lorsque la dimension linéaire  $a$  est égale à l'unité.

La relation (175) peut s'écrire :

$$\frac{\mu Q}{k \sqrt{J}} = R_h^{8/3} \quad (176)$$

Ou bien :

$$R_h = \mu^{3/8} \left[ \frac{Q}{k \sqrt{J}} \right]^{3/8} \quad (177)$$

Selon la méthode préconisée par le laboratoire *Larhyss* (2002), toute dimension linéaire en régime turbulent rugueux s'écrit :

$$a = \Lambda a_0 \quad (95)$$

La fonction  $\Lambda$  dépend de  $Q$ ,  $J$  et  $\varepsilon$  et sa dimension et celle d'une longueur :

$$\Lambda = \left[ \frac{Q \varepsilon^{1/6}}{8,2 \sqrt{gJ}} \right]^{3/8} \quad (93)$$

Le paramètre sans dimension  $a_0$  dépend exclusivement du profil liquide de l'écoulement, c'est à dire du paramètre de forme. L'expression de  $a_0$  s'écrit :

$$a_0 = \frac{P_1^{1/4}}{A_1^{5/8}} \quad (94)$$

Par analogie à la relation (95), le rayon hydraulique  $R_h$  peut s'écrire :

$$R_h = \Lambda R_{h0} \quad (178)$$

Soit :

$$R_{h0} = \mu^{3/8} \quad (179)$$

et :

$$\Lambda = \left[ \frac{Q}{k \sqrt{J}} \right]^{3/8} \quad (180)$$

La relation (180) peut prendre la forme suivante :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = k \Lambda^{8/3} \quad (181)$$

En tenant compte de (169), la relation (181) devient :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = 4^{2/3} \sqrt{2g} \beta \Lambda^{8/3} \quad (182)$$

En vertu de (165), la relation (182) s'écrit :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = \frac{4^{2/3} \sqrt{2g}}{f^{1/2} D_h^{1/6}} \Lambda^{8/3} \quad (183)$$

En tenant compte de (55), la relation (183) devient :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = -2 \frac{4^{2/3} \sqrt{2g}}{D_h^{1/6}} \Lambda^{8/3} \log \left( \frac{\varepsilon / D_h}{3,7} \right) \quad (184)$$

De plus :

$$D_h = \Lambda D_{h0} \quad (185)$$

Soit :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = \frac{4^{2/3} \sqrt{8g}}{D_{h0}^{1/6}} \Lambda^{5/2} \log \left( \frac{3,7 \Lambda D_{h0}}{\varepsilon} \right) \quad (186)$$

Ou bien :

$$\frac{Q}{\sqrt{g J \varepsilon^5}} = \frac{4^{2/3} \sqrt{8}}{D_{h0}^{1/6}} \left( \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right)^{5/2} \log \left( 3,7 D_{h0} \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right) \quad (187)$$

La relation (187) représente l'équation générale permettant le calcul de la longueur  $\Lambda$  dite longueur fluïdo-dynamique de l'écoulement dans le domaine turbulent rugueux. Cependant cette relation est implicite vis-à-vis de  $\Lambda$ , ce qui nécessite l'utilisation d'un procédé itératif lors de son application. La connaissance de la longueur fluïdo-dynamique  $\Lambda$  permet le calcul de la dimension linéaire du profil géométrique par la relation (95). Le paramètre de dimension  $a_0$  est défini par la relation (94).

### I.2.2. Application à la conduite circulaire

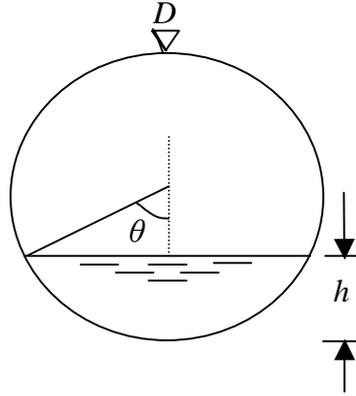


Figure 10: Schéma de définition du profil circulaire partiellement occupé par un écoulement

La figure 10 montre un profil circulaire de diamètre  $D$  partiellement occupé par un écoulement de profondeur  $h$ . Le segment circulaire est défini par le paramètre de forme  $\xi=h/D$ . Celui-ci est lié au demi angle au centre  $\theta$  par la relation (101).

Ce profil est donc défini par deux dimensions linéaires  $h$  et  $D$ . L'aire de la section mouillée  $A$  ainsi que le périmètre mouillé  $P$  s'écrivent respectivement :

$$A = \frac{D^2}{4}(\theta - \sin\theta\cos\theta) \quad (97)$$

$$P = D\theta \quad (98)$$

Où  $\theta$  est en radians. En considérant pour dimension linéaire  $a=D$ , on peut écrire que :

$$A_1 = \frac{1}{4}(\theta - \sin\theta\cos\theta) \quad (99)$$

$$P_1 = \theta \quad (100)$$

Le paramètre de dimension  $D_0$  du diamètre  $D$  est :

$$D_0 = \frac{P_1^{1/4}}{A_1^{5/8}} = \frac{\theta^{1/4}}{[(\theta - \sin\theta\cos\theta)/4]^{5/8}} \quad (102)$$

Le paramètre de dimension  $h_0$  de la profondeur  $h$  est :

$$h_0 = \xi D_0 = \frac{\xi\theta^{1/4}}{[(\theta - \sin\theta\cos\theta)/4]^{5/8}} \quad (188)$$

En tenant compte de la relation (116), le paramètre de dimension  $D_{h0}$  est :

$$D_{h0} = 2^{5/4} \left( \frac{\sqrt{\theta - \sin\theta\cos\theta}}{\theta} \right)^{3/4} \quad (189)$$

En tenant compte de la relation (189), la relation (186) peut s'écrire :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = 6,169 \sqrt{g} \frac{\theta^{1/8}}{(\theta - \sin\theta \cos\theta)^{1/16}} A^{5/2} \log \left[ 8,8 \left( \frac{\sqrt{\theta - \sin\theta \cos\theta}}{\theta} \right)^{3/4} \frac{A}{\varepsilon} \right] \quad (190)$$

La relation (190) représente la formule générale visant à calculer la longueur fluïdo-dynamique  $A$  pour les conduites circulaires partiellement occupées par l'écoulement.

Pour le cas particulier de la conduite circulaire entièrement occupée par l'écoulement, le demi angle au centre  $\theta$  égale à  $\pi$  et le paramètre de dimension  $D_{h0}$  devient alors constant selon la relation (189) :

$$D_{h0} = 2^{5/4} \left( \frac{\sqrt{\theta - \sin\theta \cos\theta}}{\theta} \right)^{3/4} = 1,548$$

En tenant compte de ces considérations, la relation (186) devient :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = 6,626 \sqrt{g} A^{5/2} \log \left( 5,729 \frac{A}{\varepsilon} \right) \quad (191)$$

Ou bien, selon la relation (187) :

$$\frac{Q}{\sqrt{g J \varepsilon^5}} = 6,626 \left( \frac{A}{\varepsilon} \right)^{5/2} \log \left( 5,729 \frac{A}{\varepsilon} \right) \quad (192)$$

En posant  $\varphi = Q / \sqrt{g J \varepsilon^5}$ , la relation (192) s'écrit :

$$\varphi = 6,626 \left( \frac{A}{\varepsilon} \right)^{5/2} \log \left( 5,729 \frac{A}{\varepsilon} \right) \quad (193)$$

Pour faciliter l'emploi de cette dernière relation, nous avons proposé un tableau de valeurs inséré en annexe de ce mémoire (Tableau A1).

La relation (193) étant implicite vis-à-vis de  $A$ , nous proposons de la remplacer par une relation explicite obtenue par ajustement statistique (voir figure 11):

$$\frac{A}{\varepsilon} = 0,4089 \varphi^{0,3814} \quad (194)$$

Notons que cette dernière formule (194) est applicable pour  $A/\varepsilon \geq 50$ , avec une erreur relative maximale inférieure à 1,3 %.

En ce qui concerne les faibles valeurs de  $A/\varepsilon$  ( $A/\varepsilon < 50$ ), il faut appliquer, en utilisant un procédé itératif, la relation (191) ou (192).

Après avoir déterminé  $A$ , le diamètre de la conduite peut être aisément calculé par application de la relation (96) :

$$D = A D_0 \quad (96)$$

Le paramètre de dimension  $D_0$  est donné par la relation (102).

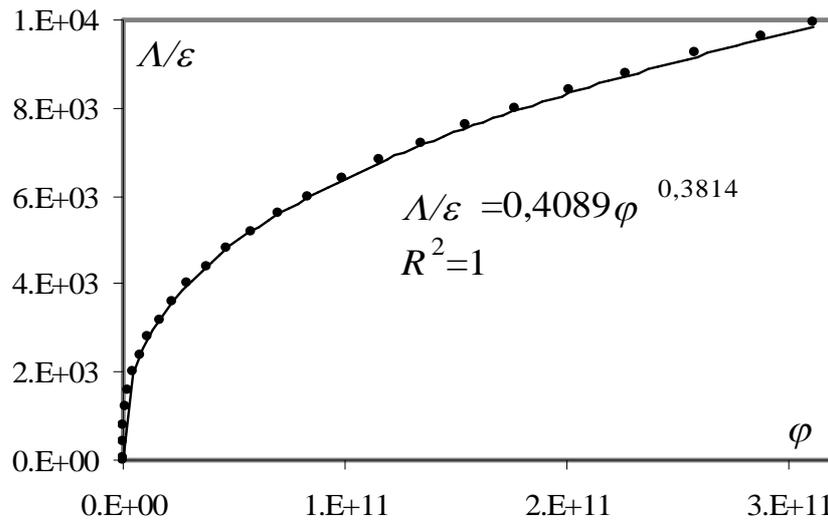


Figure 11: (—) Courbe tracée suivant la relation (194), (●●●●) Points obtenus selon la relation (193)

### Application

Soit à déterminer, sous un gradient de perte de charge  $J=9.10^{-3}$ , le diamètre  $D$  d'une conduite circulaire entièrement occupée par un écoulement d'eau, en régime turbulent rugueux, de débit  $Q=400$  l/s. La rugosité absolue de la paroi est  $\varepsilon=0,75$  mm et l'accélération de la pesanteur est  $g=9,81$  m/s<sup>2</sup>.

L'application de la relation (96) permet le calcul du diamètre de la conduite circulaire  $D$ . Dans le cas de la conduite circulaire pleine  $D_0=D_{h0}=1,548$ .

En utilisant un procédé itératif, la longueur fluïdo-dynamique  $\Lambda$  est calculée par la relation implicite (191), soit  $\Lambda=0,324$  m. Ainsi, le diamètre est  $D=\Lambda D_0 =0,502$  m.

Pour bien examiner l'exactitude de la relation implicite (191) nous avons vérifié le gradient de la perte de charge  $J$  par la relation (53) de *Darcy-Weisbach*.

Etant donné que  $V=\frac{Q}{A}$ ,  $D_h=D$ ,  $A=\frac{\pi D^2}{4}$ , la relation (53) s'écrit :

$$J=\frac{8 f}{\pi^2 g} \frac{Q^2}{D^5} \quad (195)$$

Le coefficient de frottement  $f$  peut être calculé par la relation de *Nikuradse* :

$$f^{-1/2}=-2\log\left(\frac{\varepsilon/D_h}{3,7}\right)$$

soit  $f=0,0217$ . Selon la relation (195), nous obtenons  $J=8,99999.10^{-3} \approx 9.10^{-3}$  et ceci confirme la validité du calcul.

### I.3. Modification de l'exposant de *Strickler*

#### I.3.1. Conductivité

Dans ce paragraphe, nous modifions la pente de la droite sécante équilibrée de *Strickler* en affectant à l'exposant  $\theta$  la valeur 0,15. La relation (164) devient alors :

$$f^{-1/2} = \beta D_h^{0,15} \quad (196)$$

Ou bien :

$$\beta = \frac{1}{f^{1/2} D_h^{0,15}} \quad (197)$$

La valeur de la pente  $\theta=0,15$  a été choisie après plusieurs ajustements basés sur la relation implicite (191) et applicable à la conduite circulaire entièrement occupée par l'écoulement dans le domaine turbulent rugueux.

En vertu des relations (196) et (167), la relation (53) devient :

$$V = 2\sqrt{2g} 4^{0,15} \beta R_h^{0,65} \sqrt{J} \quad (198)$$

Le coefficient de résistance de l'écoulement  $k$  est tel que :

$$k = 2\sqrt{2g} 4^{0,15} \beta \quad (199)$$

La relation (198) devient :

$$V = k R_h^{0,65} \sqrt{J} \quad (200)$$

La relation (200) représente la formule générale régissant l'écoulement dans le domaine turbulent rugueux.

Le coefficient de résistance de l'écoulement  $k$  s'exprime, en tenant compte de la relation (197):

$$k = 2\sqrt{2g} 4^{0,15} \frac{1}{f^{1/2} D_h^{0,15}} \quad (201)$$

Cette relation peut s'écrire, en tenant compte de la formule de *Nikuradse* :

$$k = \frac{2^{2,8} \sqrt{g}}{D_h^{0,15}} \log \left( \frac{3,7}{\varepsilon / D_h} \right) \quad (202)$$

La relation (202) permet le calcul du coefficient de résistance de l'écoulement  $k$  en fonction de la rugosité absolue  $\varepsilon$  et du diamètre hydraulique  $D_h$ .

Les figures 12,13 et 14, montrent la variation de  $k$  calculé selon la relation (202) et  $k$  calculé selon la relation (14) de *Hager* (1987), en fonction du diamètre hydraulique  $D_h$ .

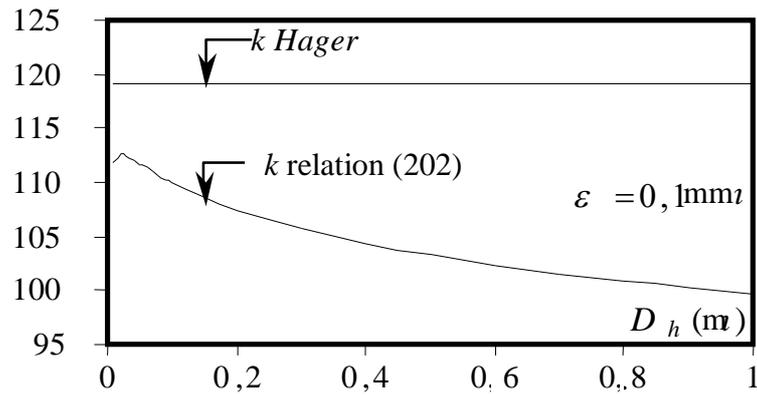


Figure 12 : Variation de  $k$  (relation 202) et  $k$  (relation (14) de Hager) en fonction de  $D_h$  (m) pour  $\varepsilon = 0,1\text{mm}$

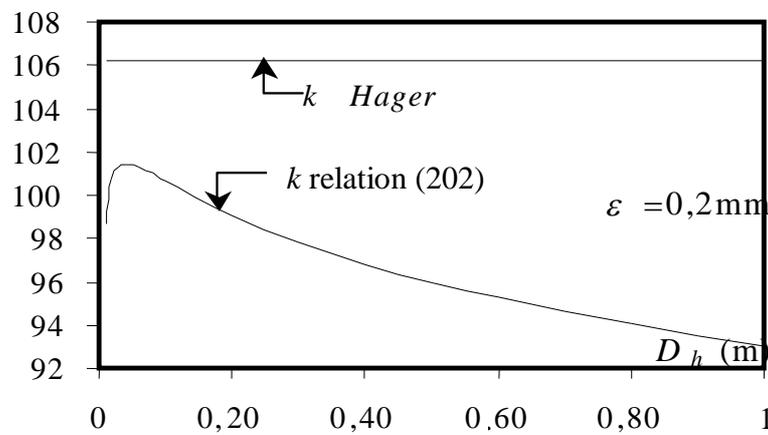


Figure 13 : Variation de  $k$  (relation 202) et  $k$  (relation (14) de Hager) en fonction de  $D_h$  (m) pour  $\varepsilon = 0,2\text{mm}$

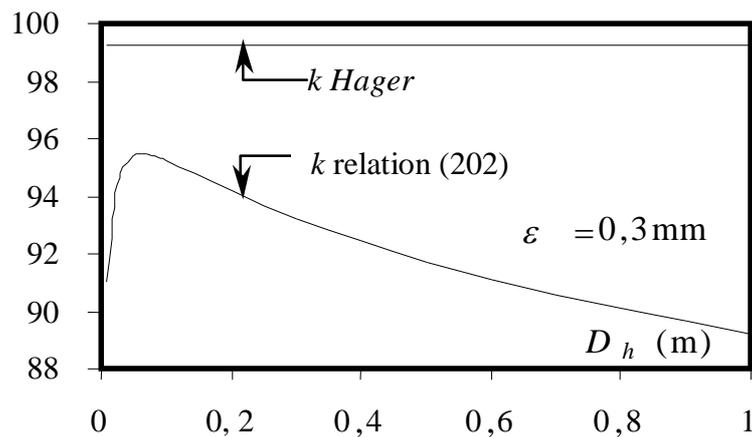


Figure 14 : Variation de  $k$  (relation 202) et  $k$  (relation (14) de Hager) en fonction de  $D_h$  (m) pour  $\varepsilon = 0,3\text{mm}$

Nous pouvons constater que le coefficient de résistance  $k$  présente un maximum pour chaque valeur de  $\varepsilon$ . Ce maximum peut être aisément déterminé en égalant à zéro la dérivée de la relation (202) par rapport à  $D_h$ , soit :

$$\frac{dk}{dD_h} = 2^{2,8} \sqrt{g} D_h^{-1,15} \left[ \frac{1}{2,3} - 0,15 \log \left( 3,7 \frac{D_h}{\varepsilon} \right) \right] = 0$$

soit :

$$D_h = 213,97 \varepsilon$$

On obtient ainsi que :

$$k_{\max} = \frac{9,026}{\varepsilon^{0,15}} \sqrt{g}$$

soit :

$$\frac{k_{\max} \varepsilon^{0,15}}{\sqrt{g}} = 9,026 \quad (203)$$

Les valeurs de  $k_{\max}$  sont regroupées dans le tableau 2, pour les trois valeurs considérées de la rugosité absolue  $\varepsilon$ .

Tableau 2 : calcul de  $k_{\max}$  par la relation (203)

$\varepsilon$ (m)	$D_h$ (m)	$k_{\max}$
0,0001	0,021	112,55
0,0002	0,042	101,44
0,0003	0,064	95,45

Notons que le coefficient de résistance de l'écoulement  $k$  doit être, selon la relation (200), exprimé en  $\text{m}^{0,35}/\text{s}$ .

La vitesse moyenne dans une section transversale, d'après l'équation de continuité, s'écrit  $V=Q/A$  et le rayon hydraulique par définition est  $R_h=A/P$ . En tenant compte de ces considérations, la relation (198) devient :

$$Q = 2 \sqrt{2g} 4^{0,15} \beta \frac{A^{1,65}}{P^{0,65}} \sqrt{J} \quad (204)$$

En tenant compte de (90) et (91), la relation (204) peut s'écrire :

$$Q = 2 \sqrt{2g} 4^{0,15} \beta a^{2,65} \frac{A_1^{1,65}}{P_1^{0,65}} \sqrt{J} \quad (205)$$

Ou bien :

$$a = \left[ \frac{Q}{2\sqrt{2g} 4^{0,15} \beta \sqrt{J}} \right]^{2,65} \frac{P_1^{0,65}}{A_1^{1,65}} \quad (206)$$

Par analogie à la relation (95), la relation (206) s'écrit sous la forme suivante :

$$\Lambda = \left[ \frac{Q}{2\sqrt{2g} 4^{0,15} \beta \sqrt{J}} \right]^{2,65} \quad (207)$$

et :

$$a_0 = \frac{P_1^{0,65}}{A_1^{1,65}} \quad (208)$$

Ou bien :

$$a_0 = \frac{P_1^{0,245}}{A_1^{0,623}} \quad (209)$$

En vertu de la relation (197), la relation (207) devient :

$$\Lambda = \left[ \frac{Q D_h^{0,15}}{2\sqrt{2g} 4^{0,15} f^{-1/2} \sqrt{J}} \right]^{2,65} \quad (210)$$

En tenant compte de (55), la relation (210) doit prendre la forme suivante :

$$\Lambda = \left[ \frac{Q D_h^{0,15}}{2\sqrt{2g} 4^{0,15} \sqrt{J} 2 \log \left( \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} \right)} \right]^{2,65} \quad (211)$$

En vertu de (185), la relation (211) devient :

$$\Lambda^{2,65} = \frac{Q \Lambda^{0,15} D_{h0}^{0,15}}{4^{1,15} \sqrt{2g} \sqrt{J} \log \left( \frac{\Lambda D_{h0} 3,7}{\varepsilon} \right)} \quad (212)$$

Ou bien :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = \frac{2^{2,8} \sqrt{g}}{D_{h0}^{0,15}} \Lambda^{5/2} \log \left( 3,7 D_{h0} \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right) \quad (213)$$

La relation (213) exprime ainsi la conductivité de la conduite. Cette relation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{Q}{\sqrt{gJ\varepsilon^5}} = \frac{2^{2,8}}{D_{h0}^{0,15}} \left(\frac{\Lambda}{\varepsilon}\right)^{5/2} \log\left(3,7D_{h0}\frac{\Lambda}{\varepsilon}\right) \quad (214)$$

### I.3.2. Expression du paramètre de dimension $D_{h0}$

Le diamètre hydraulique s'écrit d'après la relation (114) comme suit :

$$D_h = 4\Lambda a_0 \frac{A_1}{P_1} \quad (114)$$

La relation (114) permet d'écrire, en tenant compte de la relation (185) :

$$D_{h0} = 4a_0 \frac{A_1}{P_1}$$

En tenant compte de (208), la relation (214) devient :

$$D_{h0} = 4 \left( \frac{\sqrt{A_1}}{P_1} \right)^{0,755} \quad (215)$$

La relation (215) permet le calcul du paramètre de dimension  $D_{h0}$  pour tout profil géométrique et ne dépend que du paramètre de forme  $\omega$ .

### I.3.3. Application à la conduite circulaire

#### I.3.3.1. Paramètres de dimension des conduites circulaires

Dans le cas de la conduite circulaire (Figure 10) les paramètres  $A_1$  et  $P_1$ , si on considère le diamètre  $D$  comme dimension linéaire à recherchée, sont donnés par les relations (99) et (100) respectivement.

En tenant compte des relations (99) et (100), la relation (215) s'écrit :

$$D_{h0} = 2^{1,245} \left( \frac{\sqrt{\theta - \sin\theta \cos\theta}}{\theta} \right)^{0,755} \quad (216)$$

La relation (216) représente le paramètre de dimension  $D_{h0}$  du diamètre hydraulique  $D_h$ .

Le paramètre de dimension  $D_0$  du diamètre  $D$  est :

$$D_0 = \frac{P_1^{0,245}}{A_1^{0,623}} = \frac{\theta^{0,245}}{[(\theta - \sin\theta \cos\theta)/4]^{0,623}} \quad (217)$$

Le paramètre de dimension  $h_0$  de la profondeur  $h$  est :

$$h_0 = \xi D_0 = \frac{\xi \theta^{0,245}}{[(\theta - \sin\theta \cos\theta)/4]^{0,623}} \quad (218)$$

Pour la section mouillée  $A$ , le paramètre de dimension  $A_0$  est :

$$A_0 = a_0^2 A_1 = \frac{P_1^{0,491}}{A_1^{0,245}} = \frac{\theta^{0,491}}{[(\theta - \sin\theta \cos\theta)/4]^{0,245}} \quad (219)$$

Pour le périmètre mouillé  $P$ , le paramètre de dimension  $P_0$  est :

$$P_0 = a_0 P_1 = \left( \frac{P_1}{\sqrt{A_1}} \right)^{1,245} = \left( \frac{2\theta}{\sqrt{\theta - \sin\theta \cos\theta}} \right)^{1,245} \quad (220)$$

### I.3.3.2. Conditions optimales

La représentation graphique (figure 15) des relations (216), (219) montre que le paramètre de dimension  $D_{h0}$  présente un maximum, tandis que  $A_0$  présente un minimum pour une valeur optimale du paramètre de forme  $\xi = \xi_{opt}$ . Cette valeur peut être aisément déterminée en égalant à zéro les dérivées  $dD_{h0}/d\xi$  et  $dA_0/d\xi$ , soit :

$$\xi = \xi_{opt} = 1/2 \quad (221)$$

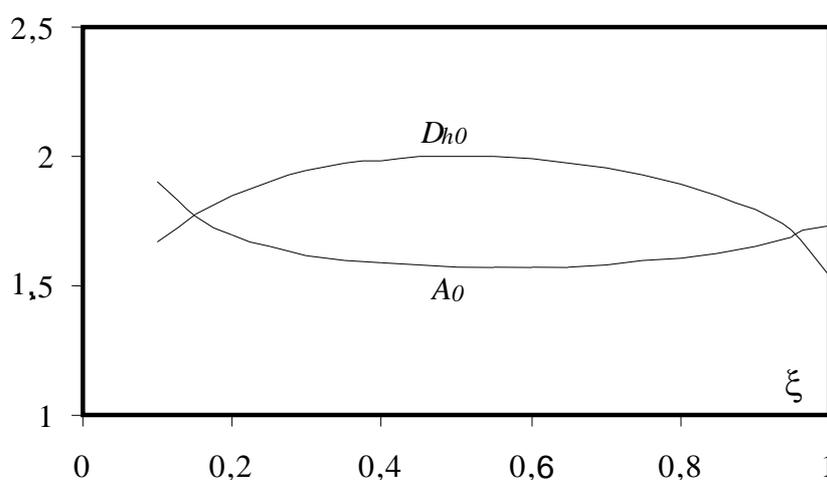


Figure 15 : Variation de  $D_{h0}$  et  $A_0$  en fonction du paramètre de forme  $\xi$  selon les relations (216) et (219).

La figure 16 montre la variation de  $D_0$ ,  $h_0$  et  $P_0$  en fonction du paramètre de forme  $\xi$ . On peut observer que  $D_0$  et  $P_0$  présentent un minimum. Le calcul indique que le minimum de  $D_0$  est atteint pour  $\xi = \xi_{opt} = 0,939$ . Cette valeur peut être déterminée en égalant à zéro la dérivée  $dD_0/d\xi$ .

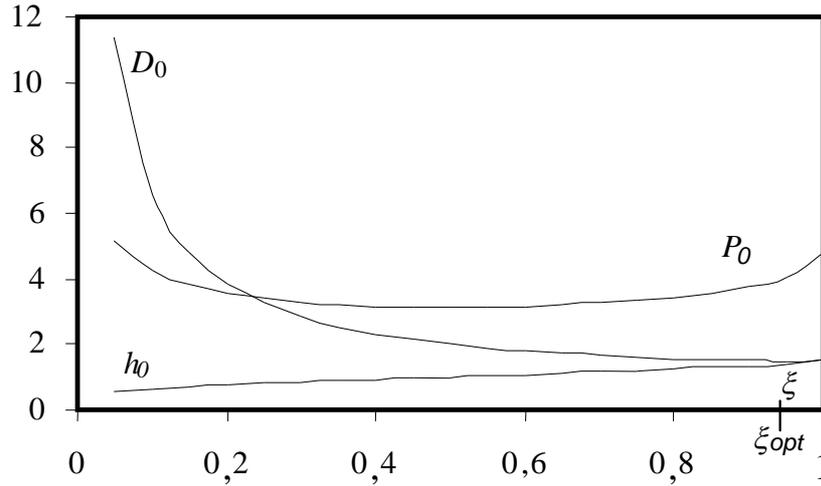


Figure 16: Variation de  $D_0$ ,  $h_0$  et  $P_0$  en fonction du paramètre de forme  $\xi$  selon les relations (217), (218) et (220).

La relation (217) permet d'écrire que  $dD_0/d\xi = d(P_1^{0,245}/A_1^{0,623})/d\xi = 0$ , ou bien, en tenant compte de (99) et (100) :

$$0,65A_1 \frac{dP_1}{d\xi} - 1,65P_1 \frac{dA_1}{d\xi} = 0 \Leftrightarrow 0,65A_1 \frac{d\theta}{d\xi} - \frac{1,65}{4} P_1 \frac{d\theta}{d\xi} (1 - \cos 2\theta) = 0$$

Soit :

$$2,6A_1 = 1,65P_1 (1 - \cos 2\theta)$$

Ainsi :

$$\frac{1}{0,65} \theta (1,65 \cos 2\theta - 1) = \sin \theta \cos \theta \quad (222)$$

La solution de la relation (222) correspond à  $\theta = 2,6435$  radians ou bien à  $\xi = (1 - \cos \theta)/2 \approx 0,939$ .

En ce qui concerne le minimum de  $P_0$ , la relation (220) indique que  $dP_0/d\xi = 0$ , soit

$$\frac{d}{d\xi} \left[ \left( P_1 / \sqrt{A_1} \right)^{1,245} \right] = 0. \text{ En tenant compte des relations (99) et (100), on peut aisément montrer que :}$$

$$4A_1 = \frac{\theta}{2} (1 - \cos 2\theta), \text{ ou bien :}$$

$$\frac{\theta}{2} (1 + \cos 2\theta) = \sin \theta \cos \theta \quad (223)$$

La solution de la relation (223) correspond à  $\theta = 1,5708$  radians, soit  $\xi = 1/2$ .

Le calcul montre également que :

$$P_0 (\xi = 1/2) = P_0 \text{ min.} = 3,14, D_{h_0} (\xi = 1/2) = D_{h_0} \text{ max.} = 1,999,$$

$$A_0 (\xi = 1/2) = A_0 \text{ min.} = 1,57, D_0 (\xi = 0,939) = D_0 \text{ min.} = 1,499.$$

La longueur fluïdo-dynamique  $\Lambda$  s'écrit, en tenant compte des relations (213) et (216) :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = 6,119 \sqrt{g} \frac{\theta^{0,113}}{(\theta - \sin\theta \cos\theta)^{0,057}} \Lambda^{5/2} \log \left[ 8,77 \left( \frac{\sqrt{\theta - \sin\theta \cos\theta}}{\theta} \right)^{0,755} \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right] \quad (224)$$

Ou bien :

$$\frac{Q}{\sqrt{Jg\varepsilon^5}} = 6,119 \frac{\theta^{0,113}}{(\theta - \sin\theta \cos\theta)^{0,057}} \left( \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right)^{5/2} \log \left[ 8,77 \left( \frac{\sqrt{\theta - \sin\theta \cos\theta}}{\theta} \right)^{0,755} \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right] \quad (225)$$

### I.3.4. Cas de la conduite circulaire entièrement occupée par l'écoulement

Pour le cas particulier de la conduite circulaire entièrement occupée par l'écoulement ( $\theta$  est égal à  $\pi$ ), le paramètre de dimension du diamètre hydraulique  $D_{h0}$  peut être calculé par application de la relation (216) :

$$D_{h0} = 2^{1,245} \left( \frac{\sqrt{\theta - \sin\theta \cos\theta}}{\theta} \right)^{0,755} = 1,539 \quad (216)$$

En tenant compte de cette considération, la relation (224) devient :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = 6,528 \sqrt{g} \Lambda^{5/2} \log \left( 5,695 \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right) \quad (226)$$

Ou bien, selon la relation (225) :

$$\frac{Q}{\sqrt{gJ\varepsilon^5}} = 6,528 \left( \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right)^{5/2} \log \left( 5,695 \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right) \quad (227)$$

Afin de faciliter l'utilisation de cette relation, nous avons proposé en annexe un tableau de valeurs (Tableau A2) permettant l'estimation de la longueur fluïdo-dynamique  $\Lambda$  ( $Q/\sqrt{gJ\varepsilon^5} = f(\Lambda/\varepsilon)$ ).

En posant  $\varphi = Q/\sqrt{gJ\varepsilon^5}$ , la relation (227) peut s'écrire :

$$\varphi = 6,528 \left( \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right)^{5/2} \log \left( 5,695 \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right) \quad (228)$$

La relation (228) se présente sous une forme implicite vis-à-vis de  $\Lambda$ . Un ajustement a permis de proposer, avec une excellente corrélation, une relation explicite (figure 17):

$$\frac{\Lambda}{\varepsilon} = 0,4115 \varphi^{0,3814} \quad (229)$$

Notons que la formule explicite (229) est applicable pour  $\Lambda/\varepsilon \geq 50$ , avec une erreur relative maximale inférieure à 1,3 %.

En ce qui concerne les faibles valeurs de  $\Lambda/\varepsilon$  ( $\Lambda/\varepsilon < 50$ ), il faut appliquer la relation (226) ou (227), en s'appuyant sur un procédé itératif.

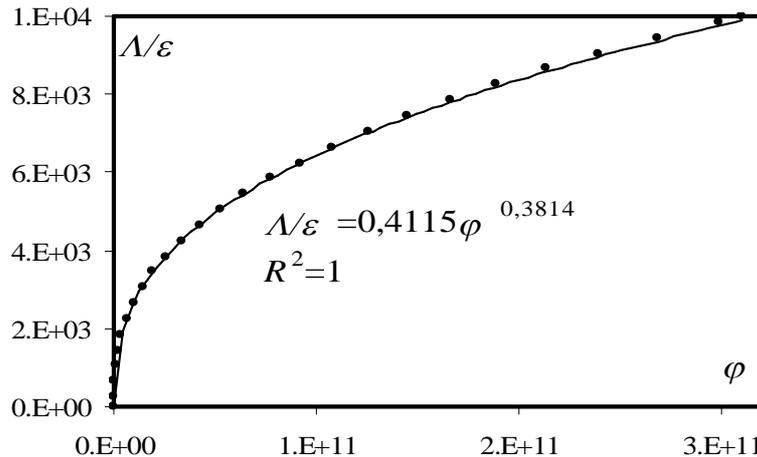


Figure 17: (—) Courbe tracée suivant la relation (229), (●●●●) Points obtenus selon la relation (228)

### Application

Soit à déterminer, sous un gradient de perte de charge  $J=9.10^{-3}$ , le diamètre  $D$  d'une conduite circulaire entièrement occupée par un écoulement d'eau de débit  $Q=400$  l/s. La rugosité absolue de la paroi est  $\varepsilon=0,75$ mm et l'accélération de la pesanteur  $g=9,81$ m/s<sup>2</sup>.

L'application de la relation (96) permet le calcul du diamètre de la conduite circulaire  $D$ .

Dans le cas de la conduite circulaire pleine on a  $D_0=D_{h0}=1,539$ .

En utilisant un procédé itératif, la longueur fluïdo-dynamique  $\Lambda$  est calculée par la relation implicite (226), soit  $\Lambda=0,326$  m et par suite  $D=\Lambda D_0 =0,502$  m.

La vérification du gradient de perte de charge  $J$  s'effectue par l'application de la relation (195).

Le coefficient de frottement  $f$  peut être calculé par application de la relation de *Nikuradse* dans le domaine turbulent rugueux :

$$f^{-1/2} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} \right)$$

soit  $f = 0,0217$ .

Selon la relation (195), le gradient  $J$  de la perte de charge est :  $J=9,000001.10^{-3}$ , ce qui montre la validité du calcul du diamètre  $D$ .

Afin de montrer la fiabilité et la simplicité de la relation explicite (229), nous procédons comme suit :

- Calculons le paramètre sans dimension  $\varphi$  par la relation suivante :  $\varphi = Q / \sqrt{gJ\varepsilon^5}$ .

$$\varphi = \frac{0,4}{\sqrt{9,81 \cdot 0,009 \cdot 0,00075^5}} = 87387852$$

- Calculons le nombre  $\frac{\Lambda}{\varepsilon}$  par la relation (229) :

$$\frac{\Lambda}{\varepsilon} = 0,4115 \varphi^{0,3814} = 0,4115 \cdot 87387852^{0,3814} = 439,78$$

Comme nous l'avons indiquée précédemment, la formule (229) est applicable pour  $\Lambda/\varepsilon \geq 50$ .

$$\frac{\Lambda}{\varepsilon} = 439,78 > 50 \rightarrow \text{condition vérifiée.}$$

- Calculons la valeur de  $\Lambda$  :

$$\Lambda = 439,78 \varepsilon = 439,78 \cdot 0,00075 = 0,3298 \text{ m}$$

L'écart relatif entre  $\Lambda$  calculée par la relation implicite (226) et celle calculée par la relation explicite (229) est :  $\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = 1,12\%$ , cette écart est inférieur à l'écart relatif maximal (1,3%).

- Le diamètre  $D$  est évalué par la relation (96) :

$$D = \Lambda D_0 = 0,3298 \cdot 1,539 = 0,508 \text{ m.}$$

### I.3.5. Cas de la conduite circulaire partiellement occupée par l'écoulement

Dans le cas de la conduite circulaire partiellement occupée par l'écoulement nous avons choisi une série de valeurs variant entre 0,1 et 0,9 pour le taux de remplissage (paramètre de forme)  $\xi$ .

La relation (213) peut s'écrire :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = C_1 \Lambda^{5/2} \log \left( C_2 \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right) \quad (230)$$

Avec :

$$C_1 = \frac{2^{2,8} \sqrt{g}}{D_{h0}^{0,15}} \quad (231)$$

et :

$$C_2 = 3,7 D_{h0} \quad (232)$$

Nous avons calculé les constantes  $C_1$  et  $C_2$ , pour chaque valeur du taux de remplissage  $\xi$ ; les résultats sont regroupés dans le tableau 3.

Le demi-angle au centre  $\theta$  et le paramètre de dimension  $D_{h0}$  sont calculés respectivement par les relations (101) et (216).

Tableau 3 : calcul des constantes  $C_1$  et  $C_2$  par les relations (231) et (232).

$\xi$	$\theta$ (rad)	$D_{h0}$	$C_1$	$C_2$
0,1	0,644	1,669	20,199	6,177
0,2	0,927	1,852	19,886	6,854
0,3	1,159	1,942	19,745	7,187
0,4	1,369	1,986	19,679	7,349
0,5	1,571	1,999	19,660	7,397
0,6	1,772	1,987	19,678	7,353
0,7	1,982	1,952	19,730	7,223
0,8	2,214	1,891	19,825	6,998
0,9	2,498	1,793	19,984	6,635

Nous avons proposé en annexe de ce mémoire (tableaux A3 à A11) quelques valeurs exactes du paramètre  $\Lambda$ , calculées en utilisant un procédé itératif. La rugosité absolue  $\varepsilon$  et la conductivité  $Q/\sqrt{J}$  ont été variées respectivement entre 0,1 mm - 0,5 mm et 0,001 m<sup>3</sup>/s - 9 m<sup>3</sup>/s.

### Application

Soit à déterminer, sous un gradient de perte de charge  $J=9.10^{-3}$ , les diamètres  $D$  correspondants aux différents taux de remplissage  $\xi=0,1\div 0,9$  d'une conduite circulaire partiellement occupée par un écoulement d'eau de débit  $Q=400$  l/s. La rugosité absolue de la paroi est  $\varepsilon=0,75$  mm et l'accélération de la pesanteur est  $g=9,81$  m/s<sup>2</sup>.

L'application de la relation (96) permet le calcul du diamètre de la conduite circulaire  $D$ .

Vérification du gradient de perte de charge  $J$  :

La relation de *Darcy-Weisbach* peut s'écrire sous la forme suivante :

$$J = \frac{f}{8g} \frac{PQ^2}{A^3} \quad (233)$$

Les résultats de calcul sont regroupés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Calcul de  $D$  et  $J$  pour le cas de la conduite partiellement remplie.

1	2	3	4	5	6	7
$\xi$	$\theta$ (rad)	$D_{h0}$	$D_0$	$\Lambda$ (m)	$D$ (m)	$D_h$ (m)
0,1	0,644	1,669	6,571	0,32640919	2,14	0,545
0,2	0,927	1,852	3,840	0,3267223	1,26	0,605
0,3	1,159	1,942	2,841	0,32686433	0,93	0,635
0,4	1,369	1,986	2,318	0,32693643	0,76	0,649
0,5	1,571	1,999	1,999	0,32695764	0,65	0,654
0,6	1,772	1,987	1,790	0,32693828	0,59	0,650
0,7	1,982	1,952	1,648	0,32688055	0,54	0,638
0,8	2,214	1,891	1,554	0,3267793	0,51	0,618
0,9	2,498	1,793	1,504	0,32661417	0,49	0,586

Tableau 4 (suite et fin): Calcul de  $D$  et  $J$  pour le cas de la conduite partiellement remplie.

8	9	10	11	12	13
$f^{1/2}$	$f$	$A$ (m <sup>2</sup> )	$P$ (m)	$J$	Observation
6,859	0,0213	0,188	1,380	0,008998861	Vérifié
6,950	0,0207	0,176	1,164	0,008998861	Vérifié
6,992	0,0205	0,171	1,076	0,009000001	Vérifié
7,011	0,0203	0,168	1,038	0,009000001	Vérifié
7,017	0,0203	0,168	1,027	0,009000001	Vérifié
7,012	0,0203	0,168	1,037	0,009000001	Vérifié
6,996	0,0204	0,170	1,068	0,009000001	Vérifié
6,968	0,0206	0,174	1,125	0,009000001	Vérifié
6,922	0,0209	0,180	1,227	0,009000001	Vérifié

Nous avons procédé aux différentes étapes de calcul en utilisant les relations suivantes :

- $\xi=0,1$  à  $0,9$
- $\theta = \cos^{-1}(1-2\xi)$  (101)

- $D_{h0} = 2^{1,245} \left( \frac{\sqrt{\theta - \sin\theta \cos\theta}}{\theta} \right)^{0,755}$  (216)

$$4. \quad D_0 = \frac{\theta^{0,245}}{[(\theta - \sin\theta \cos\theta)/4]^{0,623}} \quad (217)$$

$$5. \quad \frac{Q}{\sqrt{J}} = C_1 A^{5/2} \log\left(C_2 \frac{\Lambda}{\varepsilon}\right) \quad (230)$$

$$6. \quad D = \Lambda D_0 \quad (96)$$

$$7. \quad D_h = \Lambda D_{h0} \quad (185)$$

$$8. \quad f^{-1/2} = -2 \log\left(\frac{\varepsilon/D_h}{3,7}\right) \quad (55)$$

$$10. \quad A = \frac{D^2}{4} (\theta - \sin\theta \cos\theta) \quad (97)$$

$$11. \quad P = \theta D \quad (98)$$

$$12. \quad J = \frac{f}{8g} \frac{PQ^2}{A^3} \quad (233)$$

### I.3.6. Relation générale au calcul des conduites en charge et à surface libre

Afin d'établir une formule générale unique au calcul de l'écoulement uniforme turbulent rugueux, pour les conduites en charge et à surface libre, nous avons affecté au paramètre de dimension  $D_{h0}$  la moyenne géométrique calculée dans son domaine de variation [ 1,4 ; 2 ] :

$$D_{h0} = \sqrt{1,4 \times 2} = 1,673 \approx \frac{5}{3}$$

A la valeur minimale  $D_{ho \min} = 1,4$  correspond la valeur  $\theta \approx 0,383$  radians et  $\xi \approx 0,036$ . Par contre, à la valeur maximale  $D_{ho \max} = 2$  correspond  $\theta \approx 1,5708$  radians et  $\xi = 1/2$ .

En remplaçant  $D_{ho}$  par sa valeur moyenne géométrique  $D_{h0} = 1,673$  dans la relation générale (214), il ressort que :

$$\varphi = \frac{Q}{\sqrt{g J \varepsilon^5}} = 6,447 \left(\frac{\Lambda}{\varepsilon}\right)^{5/2} \log\left(6,2 \frac{\Lambda}{\varepsilon}\right) \quad (234)$$

Cependant, il faut noter que l'introduction d'une valeur moyenne géométrique peut impliquer des erreurs sur le calcul de  $\Lambda$  et de la conductivité  $Q/\sqrt{J}$ . Pour examiner l'importance des écarts obtenus lors du calcul de ce dernier paramètre, nous avons évalué dans ce qui suit l'erreur relative maximale sur la valeur calculée de la conductivité  $Q/\sqrt{J}$ .

### I.3.6.1. Calcul de l'erreur relative maximale commise sur le calcul de la conductivité

Afin de calculer l'erreur relative maximale commise sur le calcul de la conductivité, nous devons faire appel à la relation (213) :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = \frac{2^{2,8} \sqrt{g}}{D_{h0}^{0,15}} A^{5/2} \log\left(\frac{\Lambda D_{h0} 3,7}{\varepsilon}\right) \quad (213)$$

Nous procédons alors à la dérivée de la conductivité  $Q/\sqrt{J}$  par rapport à  $D_{h0}$  :

$$\delta\left(\frac{Q}{\sqrt{J}}\right) = \frac{\Delta\left(\frac{Q}{\sqrt{J}}\right)}{\frac{Q}{\sqrt{J}}} = \frac{\frac{\delta}{\delta D_{h0}}\left(\frac{Q}{\sqrt{J}}\right)}{\frac{Q}{\sqrt{J}}} \Delta D_{h0} \quad (235)$$

Soit :

$$\delta\left(\frac{Q}{\sqrt{J}}\right) = \frac{\Delta D_{h0}}{D_{h0}} \left[ \frac{0,434}{\log\left(\frac{3,7}{\varepsilon/D_h}\right)} - 0,15 \right] \quad (236)$$

$D_{h0} = \frac{5}{3}$ , correspondant à la moyenne géométrique de l'intervalle [1,4 ; 2].

$\Delta D_{h0}$ , est l'écart maximal, soit  $\Delta D_{h0} = (2 - \frac{5}{3}) = \frac{1}{3}$ .

En tenant compte de ces considérations, la relation (236) s'écrit :

$$\delta\left(\frac{Q}{\sqrt{J}}\right) = \frac{3}{5} \left[ \frac{0,434}{\log\left(\frac{3,7}{\varepsilon/D_h}\right)} - 0,15 \right] \Delta D_{h0} \quad (237)$$

Ou bien :

$$\delta\left(\frac{Q}{\sqrt{J}}\right) = f(\varepsilon/D_h) \Delta D_{h0} \quad (238)$$

Avec :

$$f(\varepsilon/D_h) = \frac{3}{5} \left[ \frac{0,434}{\log\left(\frac{3,7}{\varepsilon/D_h}\right)} - 0,15 \right]$$

La relation (238) montre que l'erreur relative commise sur le calcul de la conductivité  $Q/\sqrt{J}$  est fonction de la rugosité relative  $\varepsilon/D_h$ . Pour calculer  $\delta\left(\frac{Q}{\sqrt{J}}\right)$ , nous avons considéré toutes les

valeurs de  $\varepsilon/D_h$  qui ont servies au tracé du diagramme de *Moody*. Les résultats sont regroupés dans le tableau 5, ce tableau montre que l'erreur relative maximale est égale à 1,65 %, correspondant à la rugosité relative maximale  $\varepsilon/D_h = 5 \cdot 10^{-2}$ . Ainsi, la valeur calculée de l'erreur relative maximale n'a pas une influence importante sur le calcul de la conductivité, ce qui permet d'adopter la moyenne géométrique du paramètre de dimension  $D_{h0}$  pour le calcul des conduites circulaires en charge et à surface libre lorsque l'écoulement est dans le domaine turbulent rugueux.

Tableau 5 : Calcul de  $\delta(Q/\sqrt{J})$  selon la relation (238).

$\varepsilon/D_h$	$f(\varepsilon/D_h)$	$\Delta D_{h0}$	$\delta(Q/\sqrt{J})$	$\delta(Q/\sqrt{J})$ en (%)
$5 \cdot 10^{-2}$	0,0494	1/3	0,0165	1,65
$4 \cdot 10^{-2}$	0,0425	1/3	0,0142	1,42
$3 \cdot 10^{-2}$	0,0346	1/3	0,0115	1,15
$2,5 \cdot 10^{-2}$	0,0301	1/3	0,01	1
$2 \cdot 10^{-2}$	0,0249	1/3	0,00831	0,83
$1,5 \cdot 10^{-2}$	0,0189	1/3	0,00631	0,63
$10^{-2}$	0,0115	1/3	0,00382	0,38
$8 \cdot 10^{-3}$	0,0078	1/3	0,00259	0,26
$6 \cdot 10^{-3}$	0,0034	1/3	0,00113	0,11
$4 \cdot 10^{-3}$	-0,0021	1/3	-0,000717	0,07
$3 \cdot 10^{-3}$	-0,0058	1/3	-0,0019	0,19
$2 \cdot 10^{-3}$	-0,0102	1/3	-0,00341	0,34
$1,5 \cdot 10^{-3}$	-0,0132	1/3	-0,00439	0,44
$1 \cdot 10^{-3}$	-0,0170	1/3	-0,00566	0,57
$8 \cdot 10^{-4}$	-0,0189	1/3	-0,0063	0,63
$6 \cdot 10^{-4}$	-0,0212	1/3	-0,00708	0,71
$4 \cdot 10^{-4}$	-0,0243	1/3	-0,0081	0,81
$2 \cdot 10^{-4}$	-0,0289	1/3	-0,00964	0,96
$10^{-4}$	-0,033	1/3	-0,011	1,1
$6 \cdot 10^{-5}$	-0,0356	1/3	-0,0119	1,19
$4 \cdot 10^{-5}$	-0,0375	1/3	-0,0125	1,25

La figure 18 montre la variation de l'erreur relative  $\delta(Q/\sqrt{J})$  en pourcentage en fonction de la rugosité relative  $\varepsilon/D_h$ .

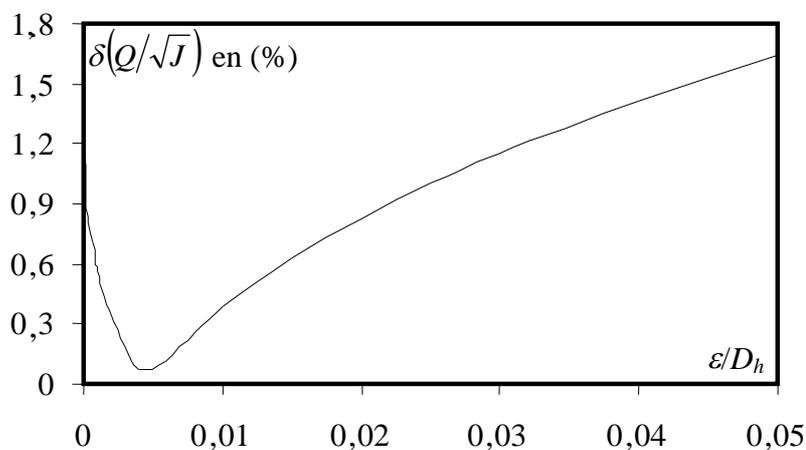


Figure 18: Variation de  $\delta(Q/\sqrt{J})$  en pourcentage en fonction de  $\varepsilon/D_h$  selon le tableau 5

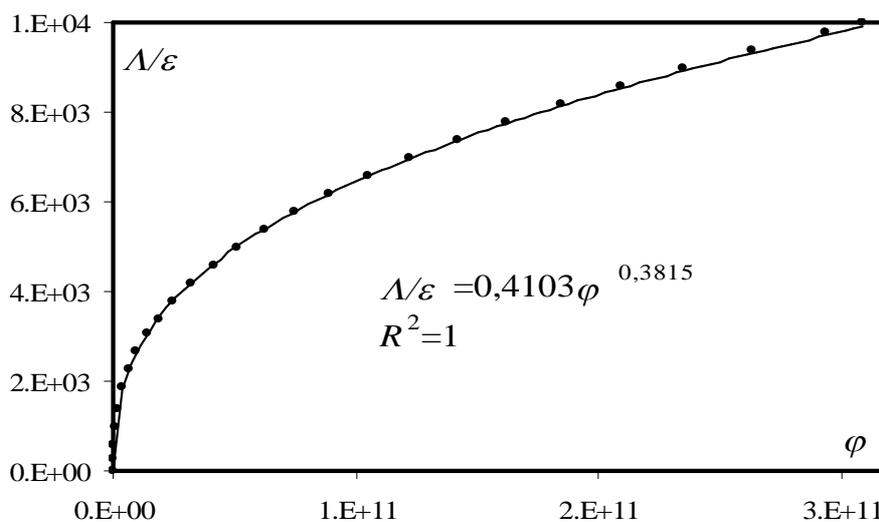


Figure 19: (—) Courbe tracée suivant la relation (239), (••••) Points obtenus selon la relation (234)

Le tableau A12 représenté en annexe, donne quelques valeurs de  $\Lambda/\varepsilon$  selon la relation (234).

L'ajustement, de type puissance, de la relation (234) nous a donné une formule simple et explicite (figure 19) applicable pour  $\Lambda/\varepsilon \geq 50$  avec une erreur relative maximale  $< 1,3\%$  :

$$\frac{\Lambda}{\varepsilon} = 0,4103 \varphi^{0,3815} \quad (239)$$

### Application

Soit à déterminer, sous un gradient de perte de charge  $J=9.10^{-3}$ , le diamètre  $D$  d'une conduite circulaire entièrement occupée par un écoulement d'eau de débit  $Q=400$  l/s. La rugosité absolue de la paroi est  $\varepsilon=0,75$  mm et l'accélération de la pesanteur  $g=9,81\text{m/s}^2$ .

L'application de la relation (96) permet le calcul du diamètre de la conduite circulaire  $D$ .

En utilisant un procédé itératif, la longueur fluïdo-dynamique  $\Lambda$  est calculée par la relation implicite (234)  $\Rightarrow \Lambda=0,326$  m et par suite,  $D=0,502$  m.

Vérification de  $J$  :

La vérification du gradient de perte de charge  $J$  s'effectue par l'application de la relation (195).

Le coefficient de frottement  $f$  peut être calculé par la relation de *Nikuradse* :

$$f^{-1/2} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} \right) \Rightarrow f = 0,0217$$

Selon la relation (195) :  $J=8,965941.10^{-3} \approx 9.10^{-3}$  et l'écart est donc de 0,38%. Ce qui peut être considéré comme étant très satisfaisant.

### I.4. Conclusion

L'objectif principal du chapitre précédent a été de proposer, par une approche nouvelle, un développement théorique au calcul de l'écoulement uniforme.

Nous nous sommes intéressés exclusivement au domaine d'écoulement turbulent rugueux qui demeure, selon plusieurs auteurs, l'écoulement le plus répandu dans la pratique.

Bien que le but premier de notre recherche soit l'approfondissement des connaissances de l'écoulement uniforme dans les conduites circulaires, notre développement théorique demeure valable pour tout profil géométrique de canaux.

Lors de notre développement théorique, nous nous sommes fixés pour but d'établir la relation exprimant la conductivité d'un canal ou d'une conduite. La bibliographie a montré que cette relation a déjà été établie, mais nous avons discuté le contexte et les hypothèses ayant servis à son établissement.

Afin d'atteindre notre objectif, nous avons considéré la relation de *Nikuradse*, établie en conduite circulaire, et que nous avons voulu généraliser à tout profil géométrique. Le tracé graphique du coefficient de frottement  $f$  de *Nikuradse* en fonction du diamètre hydraulique et pour une rugosité absolue donnée des parois du canal ou de la conduite considéré, indique une courbe relativement plate. En raison de cette particularité, nous avons suggéré de la remplacer et de l'équilibrer par une série de droites sécantes. Nous avons suggéré, dans un premier temps, d'affecter à ces droites une

penne unique correspondant à celle proposée par *Strickler*, soit 1/6. Dans un second temps, notre calcul a montré que la valeur moyenne de la pente des droites sécantes était de 0,15, valeur proche en définitive de celle de *Strickler*.

En tenant compte de ces considérations, le développement théorique a abouti à l'établissement de la relation exprimant la vitesse moyenne de l'écoulement. La relation obtenue pouvait, par sa forme, se rapprocher de celle proposée par *Strickler*. Cependant, une différence notable a été observée dans l'expression du coefficient de résistance de l'écoulement qui, selon *Strickler*, prend une valeur unique pour un canal donné. Or, notre développement théorique a montré que le coefficient de résistance dépendait à la fois de la rugosité absolue des parois du canal ainsi que du diamètre hydraulique de l'écoulement. Ce résultat nous paraît physiquement justifié puisque le coefficient de résistance devrait varier en fonction de la nature de la paroi du canal mais aussi et surtout en fonction de la profondeur de l'écoulement. Il nous paraît donc inadmissible de suggérer, que le coefficient de résistance de l'écoulement soit identique pour différentes profondeurs d'écoulement dans un canal donné.

Ainsi, notre développement théorique a pu mener à l'établissement de la relation (214) liant trois

paramètres composés qui sont la conductivité relative  $\frac{Q}{\sqrt{gJ\varepsilon^5}}$ , le paramètre de dimension  $D_{h0}$

dépendant du paramètre de forme de l'écoulement et la longueur  $\Lambda$ . Lorsque l'écoulement s'effectue dans une conduite circulaire en charge, le paramètre de dimension prend une valeur constante et la relation (214) se réduit à une relation fonctionnelle de deux paramètres composés seulement.

Nous avons montré que la relation (214) pouvait servir à évaluer le diamètre de conduites à surface libre ou en charge, à partir de la valeur généralement connue de la conductivité. La relation (214) est donc destinée à répondre à un besoin de dimensionnement.

Dans le cas des conduites à surface libre, notre étude a montré que le paramètre de dimension  $D_{h0}$  variait dans un intervalle de valeurs relativement restreint. En suggérant de remplacer cet intervalle de valeurs par sa moyenne géométrique, il a été possible d'établir une relation généralisée applicable à la fois aux cas des écoulement à surface libre et en charge en conduites circulaires.

Le caractère implicite de la relation obtenue nous a conduit, par un ajustement adéquat, à la remplacer par une équation simplifiée et pratique.

## I. FORMULES USUELLES DE L'ÉCOULEMENT UNIFORME ET LEUR CORRELATION

### I.1. Introduction

Le présent chapitre propose une synthèse des principales relations usuelles régissant l'écoulement uniforme.

Après avoir défini l'écoulement uniforme et les règles qui gouvernent son établissement, les relations de *Chézy*, de *Manning-Strickler* et de *Darcy-Weisbach* sont développées. Compte tenu de leur emploi pratique et aux résultats satisfaisants auxquels elles aboutissent, ce chapitre est exclusivement consacré à ces relations.

Les coefficients de résistance liés à ces formules sont particulièrement discutés et les relations permettant leur estimation sont présentées et commentées.

### I.2. Etablissement de l'écoulement uniforme

L'écoulement uniforme peut être soit en régime laminaire soit en régime turbulent, mais il se produit sous de grandes vitesses. A vitesse élevée, l'écoulement uniforme est instable et il est le siège d'un fort entraînement d'air.

Dans les canaux ouverts, l'écoulement uniforme se développe lorsque les forces de résistance s'opposant à l'écoulement sont équilibrées par les forces de gravité. Les forces de résistance sont proportionnelles au carré de la vitesse moyenne  $V$ .

Lorsqu'un écoulement entrant dans un canal s'effectue de façon lente, la vitesse et par conséquent la résistance à l'écoulement sont faibles. Les forces de gravité sont alors prédominantes et l'écoulement subit alors une accélération depuis l'amont. La vitesse ainsi que la résistance augmentent au fur et à mesure que l'on se déplace vers l'aval, jusqu'à ce que les forces de gravité soient équilibrées. A cet instant, l'écoulement uniforme apparaît. La zone sur laquelle s'étend l'écoulement accéléré et au-delà de laquelle l'écoulement uniforme apparaît est dite zone de transition. Si la longueur du canal est inférieure à la longueur de la zone transitoire, l'écoulement uniforme ne peut être atteint.

Plus à l'aval de l'écoulement uniforme, les forces de gravité deviennent de plus en plus prédominantes en raison de l'accélération que subit l'écoulement. L'écoulement uniforme disparaît alors en laissant place à un écoulement varié.

La figure 1 montre l'état d'un écoulement à l'entrée et l'intérieur d'un canal de grande longueur et de différentes pentes géométriques  $J_s$ . La pente  $J_s$  est comparée à la pente critique  $J_c$ .

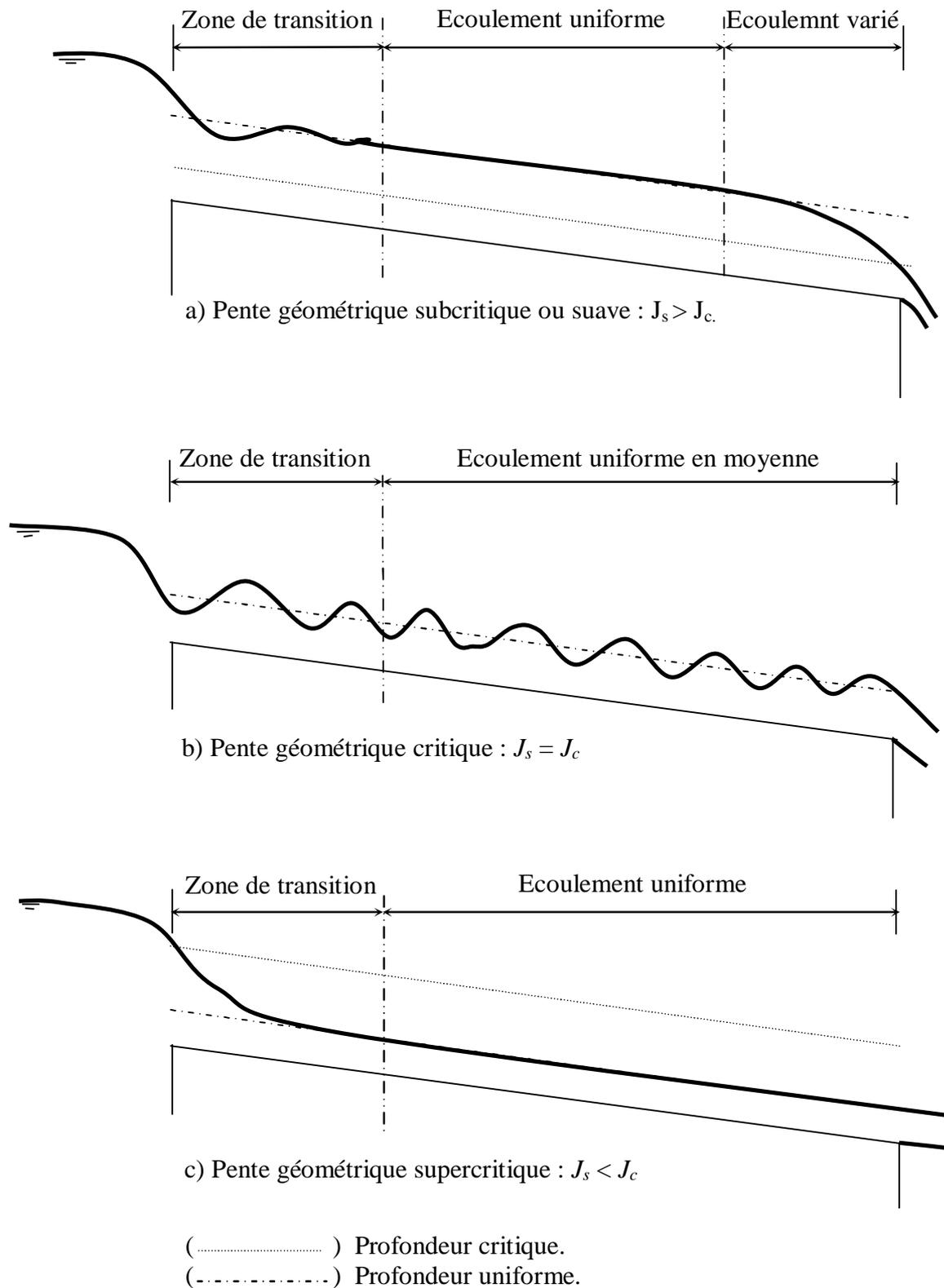


Figure 1: Etablissement de l'écoulement uniforme dans un canal de grande longueur

Lorsque la pente  $J_s$  est suave (figure 1.a), la zone de transition se présente sous l'aspect d'ondulations. L'écoulement est uniforme au milieu du canal mais varié aux extrémités de celui-ci. D'un point de vue théorique, l'écoulement varié tend vers l'écoulement uniforme de manière graduelle et asymptotique. On considère généralement dans la pratique que la profondeur de l'écoulement reste constante si la variation qu'elle subit n'excède pas 1% à 1,5% de la valeur moyenne de la profondeur normale.

Lorsque la pente  $J_s$  correspond à la pente critique  $J_c$  (figure 1.b), la surface libre de l'écoulement critique est instable. Des ondulations peuvent se produire au milieu du canal, mais la profondeur oscille autour d'une valeur moyenne et l'écoulement est alors considéré comme étant uniforme.

Lorsque la pente  $J_s$  est supercritique ou prononcée (figure 1.c), la surface libre dans la zone de transition chute de manière graduelle d'un niveau subcritique ou suave à un niveau supercritique ou prononcé. Au-delà de la zone de transition, l'écoulement devient uniforme.

La longueur sur laquelle s'étend la zone transitoire dépend essentiellement du débit volume  $Q$  entrant dans le canal ainsi que des caractéristiques de celui-ci telles que la rugosité absolue, la pente et la géométrie d'entrée. D'un point de vue hydrodynamique, la longueur de la zone de transition ne doit pas être inférieure à la longueur pour laquelle, sous des conditions données de l'écoulement, la couche limite est pleinement développée.

Le calcul de la profondeur d'un écoulement uniforme, appelée hauteur normale de l'écoulement est très importante. Le classement des profils géométriques par exemple est tributaire de la valeur de la profondeur normale. Comme le montre la figure (1.c), la profondeur normale est inférieure à la profondeur critique et c'est cette inégalité qui permet de conclure sur le caractère prononcé ou supercritique de la pente géométrique du canal.

Le calcul de la profondeur normale dans les canaux se base sur les relations dites « relations de l'écoulement normal ». Celles-ci expriment, de manière approximative, la vitesse moyenne  $V$  de l'écoulement sous l'hypothèse d'un régime turbulent. Les formules pratiques de l'écoulement uniforme s'expriment généralement sous la forme  $V = C R_h^\beta J^\gamma$  où  $R_h$  est le rayon hydraulique et  $J$  est la pente de la ligne de charge. Comme nous l'avons déjà indiqué,  $J$  correspond également à la pente  $J_s$ . Le paramètre  $C$  traduit la résistance de l'écoulement et dépend de  $V$ , de  $R_h$ , de la rugosité absolue  $\varepsilon$  caractérisant les parois du canal, de la viscosité du liquide  $\nu$  et de beaucoup d'autres facteurs.

La distinction doit être faite entre l'écoulement uniforme se produisant dans les canaux artificiels et dans les canaux naturels. Dans la pratique, l'écoulement dans les canaux naturels est considéré comme étant uniforme lorsque la profondeur de l'écoulement ne subit pas de variation brusque pouvant être causée par les irrégularités des parois du canal.

L'application des relations de l'écoulement uniforme aux canaux naturels mène à des résultats plutôt approximatifs, en raison du fait que l'écoulement dépend en réalité d'un plus grand nombre de facteurs que ceux qui influencent l'écoulement dans les canaux artificiels. Selon *Schnackenberg* (1951), une bonne relation de l'écoulement uniforme dans un canal naturel, sans transport de sédiments, est celle qui devrait tenir compte d'au moins 10 paramètres qui sont  $A$ ,  $V$ ,  $V_{ms}$  qui correspond à la vitesse maximale à la surface, le périmètre mouillé  $P$ ,  $R_h$ , la profondeur maximale  $y$  de l'écoulement, la pente  $S_w$  de la surface libre, le coefficient  $n$  qui caractérise la rugosité du canal, la viscosité dynamique  $\mu$  du liquide et la température  $T$  de celui-ci.

Lorsque l'on se réfère à la bibliographie (*Houk*, 1918; *Lindquist*, 1933; *Forchheimer*, 1930; *Vladislavljevitch*, 1951), on peut s'apercevoir que de très nombreuses relations ont été proposées au calcul de l'écoulement uniforme. Cependant, aucune d'entre elles ne répond au qualificatif de "bonne relation" selon la conception de *Schnackenberg* (1951).

Différentes approches ont été également présentées au calcul de la vitesse de l'écoulement dans les canaux naturels, telle que celle de *Toebe* (1955). Dans cette approche, une analyse par corrélation multiple est appliquée aux différents facteurs qui influencent la vitesse de l'écoulement dans un canal naturel. Ces facteurs, selon *Toebe* (1955) sont  $A$ ,  $V_{ms}$ ,  $S_w$ ,  $n$  et  $T$ . Par cette approche, il est possible d'estimer l'influence de chacun des dits facteurs sur la vitesse  $V$  et la valeur de celle-ci est égale à la somme algébrique des diverses contributions de chacun des paramètres en question. Cependant, la méthode de *Toebe* (1955) ne peut être appliquée que dans la région géographique pour laquelle a été faite l'analyse de l'influence des facteurs ci-dessus cités, ce qui malheureusement exclu toute généralisation de cette méthode.

A travers de nombreux exemples pratiques concernant l'écoulement uniforme, on peut s'apercevoir que les formules dites de *Chézy* et de *Manning* (ou de *Manning-Strickler*) sont les plus largement utilisées. La forme de leur expression est telle que nous l'avons déjà indiqué  $V = CR_h^\beta J^\gamma$  où les exposants  $\beta$  et  $\gamma$  ont des valeurs bien déterminées. En raison de leur utilisation fiable et très répandue, ces relations seront développées aussi clairement que possible, en tentant d'éclaircir leur limite et leur domaine d'applicabilité. D'autres relations seront également exposées, telle que la formule de *Darcy-Weisbach* (1854, 1845) dont l'application est universelle. Cette relation joue un rôle important dans le calcul des écoulements évoluant dans les conduites, et sa généralisation aux canaux ouverts connaît un grand succès.

### I.3. Formule de Chézy

La formule de Chézy est probablement la première formule destinée au calcul de l'écoulement uniforme. La vitesse moyenne  $V$  de l'écoulement s'exprime par :

$$V = CR_h^{1/2} J^{1/2} \quad (1)$$

Où  $R_h$  est le rayon hydraulique,  $J$  la pente de la ligne de charge totale ou gradient de perte de charge ( $J$  étant également la pente du canal) et  $C$  est le facteur caractérisant la résistance de l'écoulement, habituellement appelé coefficient de Chézy.

Chézy stipule que la force de résistance s'opposant à l'écoulement et par unité de surface de canal est proportionnelle au carré de la vitesse moyenne  $V$ . Cette force peut donc s'écrire :

$F_r(1m^2) = KV^2$ , où  $K$  est le facteur de proportionnalité. Comme le montre la figure 2, la surface du canal en contact avec le liquide est égale au produit du périmètre mouillé  $P$  par la longueur  $L$  du canal. La force totale  $F_r$  mise en jeu s'écrit ainsi :

$$F_r = KV^2 PL \quad (2)$$

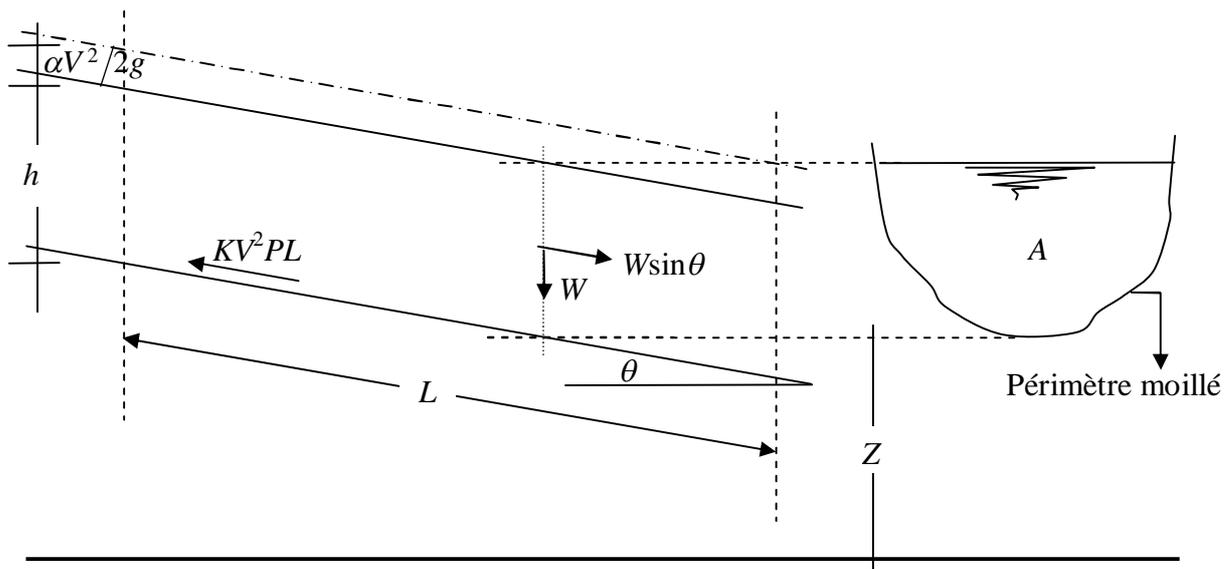


Figure 2: Schéma de définition ayant servi de base à l'élaboration de la formule de Chézy

Nous avons déjà indiqué que l'écoulement uniforme s'établissait lorsque les forces de gravité sont équilibrées par les forces de résistances  $F_r$ . La quantité  $(W \sin \theta)$  représentée sur la figure 2 correspond à la composante tangentielle du poids propre  $W$  du liquide. C'est cette composante qui intervient dans l'écoulement et qui doit être équilibrée par la force  $F_r$ . Le poids propre  $W$  peut s'écrire.  $W = \rho g A L$  où  $\rho$  est la masse volumique du liquide et  $g$  est l'accélération de la pesanteur. Le produit  $A.L$  désigne le volume de liquide sur toute la longueur  $L$ . Ainsi nous pouvons écrire :

$$\rho g A L \sin \theta = K V^2 P L$$

soit :

$$V^2 = \left( \frac{\rho g}{K} \right) \left( \frac{A}{P} \sin \theta \right)$$

La quantité  $A/P$  représente par définition le rayon hydraulique  $R_h$ .

En désignant par  $C^2 = (\rho g / K)$  et par  $J = \sin \theta$ , il ressort que :

$$V = C R_h^{1/2} J^{1/2} \quad (3)$$

Comme l'exige la relation (3), le coefficient  $C$  de Chézy doit avoir pour unité  $[L^{1/2} \cdot T^{-1}]$ .

Plusieurs relations ont été proposées au calcul du coefficient  $C$  de Chézy. Nous verrons dans ce qui suit, les plus importantes d'entre elles.

### I.3.1. Détermination du coefficient $C$ de Chézy par la formule de Ganguillet-Kutter

La formule de Ganguillet-Kutter (1869) exprime le coefficient  $C$  de Chézy en fonction de la pente  $J$  du canal, du rayon hydraulique  $R_h$  et du coefficient de rugosité  $n$ . Elle a été élaborée à partir de mesures expérimentales, effectuées sur divers types de canaux et rivières naturelles.

$$C = \frac{23 + \frac{0,00155}{J} + \frac{1}{n}}{1 + \frac{n}{\sqrt{R_h}} \left( 23 + \frac{0,00155}{J} \right)} \quad (4)$$

Le coefficient  $n$  figurant dans la relation (4) est connu sous le nom « coefficient  $n$  de Kutter ».

Bien que la relation (4) apparaisse quelque peu encombrante, elle donne néanmoins des résultats assez satisfaisants. De nombreux auteurs proposent d'éliminer le terme contenant la pente  $J$ , afin de simplifier la forme de l'équation (4). On peut en effet s'apercevoir que le terme  $(0,00155 / J)$  n'a pas d'effet remarquable sur la valeur du coefficient  $C$ , pour une même valeur du coefficient de rugosité  $n$  et du rayon hydraulique  $R_h$ . A titre indicatif, pour  $n=0,01$  et  $R_h=1,20m$ , le coefficient  $C$  ne subit pratiquement aucun changement dans une large gamme de valeurs de  $J$  :

$$102 \leq C \leq 103 \text{ lorsque } 0,00005 \leq J \leq 0,01.$$

### I.3.2. Détermination du coefficient $C$ de *Chézy* par la formule de *Bazin*

*Bazin* (1897) considère que la valeur du coefficient  $C$  de *Chézy* dépend du rayon hydraulique  $R_h$  mais ne dépend pas de la pente  $J$  du canal. Le coefficient  $C$  peut alors être déterminé par application de la relation :

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R_h}}} \quad (5)$$

$m$  est le coefficient de rugosité dépendant de la nature du matériau constituant le canal considéré et dont la valeur est tabulée. Les valeurs de  $m$  sont sans commune mesure avec celles qui correspondent au coefficient de rugosité  $n$  figurant dans la relation (4) de *Ganguillet–Kutter* (1869) et ceci pour le même matériau. A titre indicatif, pour le cas d'un canal fabriqué en ciment lisse, les tables de valeurs indiquent que  $n=0,01$  et  $m=0,11$ .

La formule de *Bazin* (1897) a été, à l'origine, élaborée pour des petits canaux, bien que sa généralisation ne donne pas d'aussi bons résultats que ceux obtenus par la formule de *Ganguillet–Kutter* (1869).

### I.3.3. Détermination du coefficient $C$ de *Chézy* par la formule de *Powell*

*Powell* (1950) propose une relation de type logarithmique au calcul du coefficient  $C$  de *Chézy*, mais elle se présente sous la forme implicite :

$$C = -23,2 \log \left( 1,811 \frac{C}{R} + \frac{\varepsilon}{R_h} \right) \quad (6)$$

“ log ” désigne le logarithme décimal,  $R$  est le nombre de *Reynolds*,  $\varepsilon$  est la rugosité absolue des parois du canal et  $R_h$  est le rayon hydraulique.

A l'origine, la relation de *Powell* (1950) a été présentée en unité anglaise et les constantes figurant dans la relation (6) sont alors différentes et beaucoup plus simples :

$$C = -42 \log \left( \frac{C}{4R} + \frac{\varepsilon}{R_h} \right) \quad (7)$$

Pour le cas des canaux rugueux, l'écoulement est en général turbulent rugueux correspondant aux valeurs élevées du nombre de *Reynolds*  $R$ , le terme  $C/4R$  tend alors vers zéro et la relation (7) devient :

$$C = -42 \log \left( \frac{\varepsilon}{R_h} \right) \quad (8)$$

Par contre pour les canaux lisses, l'effet de la rugosité est faible et la relation (7) peut s'écrire

$$C = -42 \log \left( \frac{C}{4R} \right) \quad (9)$$

#### I.4. Formule de *Manning-Strickler*

La vitesse moyenne  $V$  de l'écoulement uniforme peut être également évaluée par la formule dite de *Manning-Strickler* (1891, 1923). 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  $k=C$  :

$$V = kR_h^{2/3} J^{1/2} \quad (10)$$

La relation (10) a été ensuite modifiée par plusieurs auteurs pour s'écrire en unité métrique :

$$V = (1/n)R_h^{2/3} J^{1/2} \quad (11)$$

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

La conversion en unité anglaise de la relation (11) donne :

$$V = (1,486/n)R_h^{2/3} J^{1/2} \quad (12)$$

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 (12), le coefficient de rugosité  $n$  doit avoir pour dimension  $T.L^{-1/3}$ . Cependant, il est physiquement injustifié que la dimension de temps  $T$  puisse intervenir dans l'unité d'une rugosité puisque celle-ci ne devrait dépendre que de la nature du matériau constituant les parois du canal considéré. Pour cette raison, certains auteurs suggèrent que le numérateur de la relation (12) devrait contenir le terme ( $g^{1/2}$ ), où  $g$  est l'accélération de la pesanteur. Ceci 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 :

$$n = \left[ \phi \left( \frac{R_h}{\varepsilon} \right) \right] \varepsilon^{1/6} \quad (13)$$

où  $\varepsilon$  est la rugosité absolue. Si la fonction  $\phi \left( \frac{R_h}{\varepsilon} \right)$  doit être 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* (1987) a pu montrer que la rugosité absolue  $\varepsilon$  et le coefficient  $k$  de *Strickler* (1923) sont liés par la relation :

$$\frac{k \varepsilon^{1/6}}{8,2 \sqrt{g}} = 1 \quad (14)$$

D'autre part, il est également possible d'admettre que le terme  $1,486/n$  figurant dans la relation (12) 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  $1\text{ m} = 3,2808\text{ ft}$ .

Si l'on considère que la dimension de  $n$  est  $[L^{1/6}]$ , sa valeur numérique en unité anglaise doit être différente de sa valeur en unité métrique, à moins de tenir compte d'un facteur de correction ou de compensation.

Si  $n$  est la valeur du coefficient de rugosité en unité métrique et  $n'$  en unité anglaise, on peut écrire alors  $n' = (3,2808)^{1/6} n = 1,219 n$ . Lorsque la formule de *Manning* subit la conversion de l'unité métrique vers l'unité anglaise, la constante figurant dans l'expression qui en résulte est égale à  $(3,2808)^{1/3+1/6} = \sqrt{3,2808} = 1,811$  et la dimension de  $n$  est alors  $[L^{1/6}]$ .

En raison de sa forme simplifiée et aux résultats satisfaisants auxquels elle aboutit, la formule de *Manning-Strickler* (1891, 1923) est celle qui est largement utilisée lors du calcul des écoulements uniformes dans les canaux ouverts.

De nombreuses applications ont montré que les valeurs de  $n$  de *Manning* (1891) et  $m$  de *Kutter* (1869) sont pratiquement identiques lorsque la pente du canal est supérieure ou égale à 0,0001, pour un rayon hydraulique variant approximativement entre 0,30 m et 9 m.

En comparant la formule de *Manning* (1891), exprimée en unité métrique, à celle de *Chézy*, on peut écrire.

$$C = \left(\frac{1}{n}\right) R_h^{1/6} \quad (15)$$

Ainsi la formule de *Manning-Strickler* (1891, 1923) est souvent considérée comme une variante de la formule de *Chézy*.

De nombreuses études dont celle de *Bazin* (1897) et qui concernent les canaux artificiels, ont montré que l'exposant de  $R_h$  ne serait pas égal à  $2/3$  comme le suggère *Manning* (1891), mais sa valeur moyenne varie entre 0,6499 et 0,8395 suivant la forme du canal et la rugosité de celui-ci.

Des études telles que celles de *Pavlovski* (1940) suggèrent de prendre la valeur  $3/4$  pour l'exposant de  $R_h$ , tandis que *Blench* (1939) considère le coefficient  $C$  comme une variable qui dépend non seulement du coefficient de rugosité  $n$  mais aussi du rayon hydraulique  $R_h$  dont l'exposant dépend à son tour de  $n$  et de  $R_h$ ; c'est la formule dite de *Pavlovski* (1940) qui s'exprime, en unité métrique, par :

$$C = (1/n) R_h^y \quad (16)$$

où 
$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - \frac{3}{4}\sqrt{R_h}(\sqrt{n} - 0,10)$$

La relation (16) est applicable pour un rayon hydraulique variant entre 0,10 et 3m et pour  $n$  compris entre 0,011 et 0,04. Des relations approchées au calcul de l'exposant  $y$  sont également proposées :

$$y = \frac{3}{2} \sqrt{n} \quad \text{pour } R_h < 1,0\text{m}$$

$$y = 1,3 \sqrt{n} \quad \text{pour } R_h > 1,0\text{m}$$

L'application de la formule de *Manning* (1891) comme d'ailleurs celle de *Ganguillet-Kutter* (1869), est tributaire de la valeur du coefficient de rugosité  $n$ . Il n'existe aucune méthode exacte qui permet d'évaluer  $n$ . Evaluer le coefficient  $n$  revient en fait à estimer la résistance de l'écoulement dans un canal donné, ce qui nécessite beaucoup d'expérience et de pratique. En se référant à la bibliographie, plusieurs auteurs concluent que pour estimer  $n$  les étapes suivantes sont nécessaires.

- 1- recenser puis apprécier l'influence des paramètres pouvant affecter le coefficient  $n$ , tels que la présence de végétation dans le canal, la dimension moyenne des grains du matériau constituant les parois du canal, l'irrégularité du canal par la présence de courbures ou de variation même réduite de la section transversale de l'écoulement, etc...
- 2- Consulter les tables de valeurs de  $n$  déjà évalué pour des canaux de différents types.
- 3- Examiner et s'informer de l'état physique caractérisant les canaux existants et dont la valeur de  $n$  a déjà été déterminée.
- 4- Déterminer la valeur de  $n$  par une approche analytique basée sur la répartition théorique de la vitesse dans les sections transversales de l'écoulement.

Ce dernier point nous paraît intéressant et sera développé dans ce qui suit, après avoir donné un bref rappel sur les relations théoriques se rapportant à l'écoulement uniforme.

## I.5. Équation théorique de l'écoulement uniforme

### I.5.1. Distribution de la vitesse dans un écoulement turbulent

La distribution de la vitesse dans un écoulement turbulent demeure quasi uniforme lorsque la couche limite est pleinement développée. La distribution des vitesses suit approximativement une loi logarithmique. La contrainte de cisaillement ou tangentielle en n'importe quel point de l'écoulement turbulent, se produisant au-dessus d'une paroi solide, est donnée par la relation de *Prandtl* (1926):

$$\tau = \rho l^2 \left( \frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (17)$$

$\rho$  est la masse volumique du liquide en écoulement,  $l$  est une longueur caractéristique dite longueur de mélange,  $dv/dy$  est le gradient de vitesse à la hauteur  $y$  de la paroi solide et

normale à celle-ci. La longueur de mélange peut être interprétée par la longueur au-delà de laquelle la particule liquide voit sa quantité de mouvement diminuée.

Dans la région proche de la paroi solide, *Prandtl* (1926) utilise deux approches :

1- La longueur de mélange est proportionnelle à  $y$ , soit  $l = K.y$  où  $K$  est le facteur de proportionnalité entre  $l$  et  $y$  et dont la valeur a été estimée à 0,40 environ.

2- La contrainte tangentielle est constante.

Puisque la contrainte tangentielle à la surface est égale à la force tractrice unitaire  $\tau_0$ , la constance de la contrainte implique que  $\tau = \tau_0$ .

La relation (17) devient :

$$dv = (1/K)(\tau_0/\rho)^{1/2}(dy/y) \quad (18)$$

L'intégration de la relation (18) mène à :

$$V = 2,5(\tau_0/\rho)^{1/2} \text{Ln}(y/y_0) \quad (19)$$

« Ln » désigne le logarithme népérien et  $y_0$  représente la constante d'intégration. La force tractrice  $\tau_0$  s'exprime par la relation  $\tau_0 = \varpi R_h J$  où  $\varpi = \rho g$  est le poids spécifique du liquide,  $R_h$  est le rayon hydraulique et  $J$  la pente du canal. On peut alors écrire que :

$$(\tau_0/\rho)^{1/2} = (g R_h J)^{1/2} = V_f$$

où  $V_f$  a la dimension d'une vitesse et elle est connue sous le nom de vitesse de frottement. La relation (19) devient alors :

$$V = 2,5 V_f \text{Ln}(y/y_0) \quad (20)$$

La relation (20) indique que la vitesse dans un écoulement turbulent est une fonction logarithmique de la distance  $y$ . Elle est connue sous le nom de loi universelle de *Prandtl-Von-Karman* de la distribution des vitesses. Cette loi a été vérifiée par plusieurs expériences et les résultats ont montré une remarquable similitude entre la distribution des vitesses observée expérimentalement et celle issue de la théorie.

Lorsque la surface solide est lisse, la constante  $y_0$  ne dépend que de la vitesse de frottement  $V_f$  et de la viscosité cinématique  $\nu$  du liquide :

$$y_0 = m_0 \frac{\nu}{V_f} \quad (21)$$

$m_0$  est une constante égale à 1/9 lorsque la surface solide est lisse. Cette constante a été déduite des essais de *Nikuradse* concernant les conduites lisses. La combinaison des relations (20) et (21) donne ainsi, pour les surfaces lisses, la répartition de la vitesse dans un écoulement turbulent :

$$V = 2,5 V_f \text{Ln}(9y V_f / \nu) \quad (22)$$

Lorsque la surface est rugueuse, la constante  $y_0$  dépend de la rugosité absolue  $\varepsilon$  :

$$y_0 = m_0 \varepsilon \quad (23)$$

La constante  $m_0$  est approximativement égale à 1/30 et la relation (19) devient alors :

$$V = 2,5 V_f \operatorname{Ln}(30y/\varepsilon) \quad (24)$$

### I.5.2. Équation de Keulegan

En utilisant la loi universelle de *Prandtl-Von-Karman* de la distribution des vitesses, *Keulegan* (1938) aboutit à des équations donnant la vitesse moyenne d'un écoulement turbulent dans les canaux ouverts par une approche théorique simple. En se basant sur l'équation de continuité, le débit volume  $Q$  passant par une section quelconque de l'écoulement peut être écrit :

$$Q = VA = \int_{\delta_0=0}^{y=h} v B dy \quad (25)$$

$V$  est la vitesse moyenne de l'écoulement,  $h$  est la profondeur de l'écoulement,  $A$  est l'aire de la section mouillée,  $B$  est la longueur de la courbe d'égale vitesse (figure 3) et  $y$  est la profondeur verticale comptée à partir de la surface jusqu'à la courbe d'égale vitesse. La sous couche limite laminaire d'épaisseur  $\delta_0$  est considérée comme étant très mince ( $\delta_0 = 0$ ).

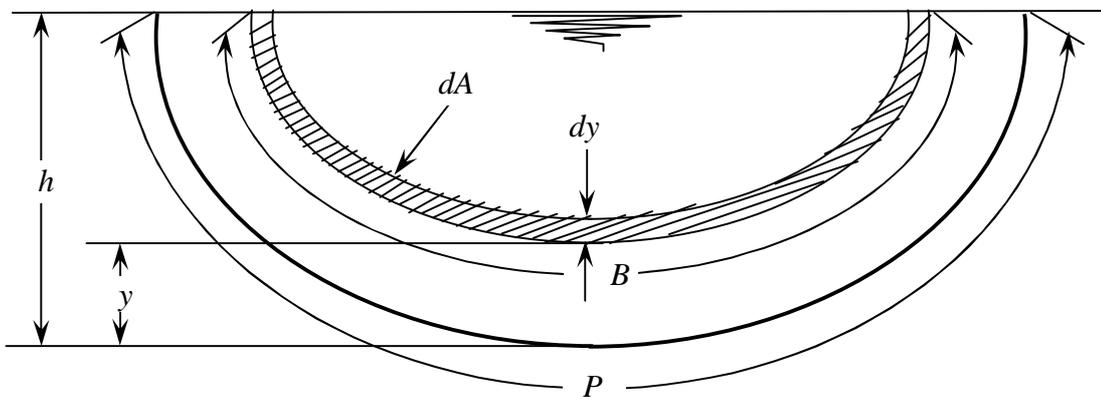


Figure 3: Schéma de définition ayant servi de base à l'établissement de l'équation de *Keulegan*

Le maximum de vitesse est supposé être à la surface et que la longueur  $B$  est proportionnelle à la distance verticale  $y$ . Ceci permet d'écrire :

$$B = P - \gamma y \quad (26)$$

$P$  est le périmètre mouillé de la surface considérée et  $\gamma$  est une fonction dépendant de la forme de la section. Ainsi, l'aire de la section mouillée  $A$  est :

$$A = \int_0^h B dy = Ph - \frac{1}{2} \gamma h^2 \quad (27)$$

La combinaison des relations (20), (25) et (27) permet d'écrire, après intégration :

$$V = 2,5 V_f \operatorname{Ln} \left[ \frac{R_h}{y_0} \frac{h}{R_h} \exp \left( -1 - \frac{\gamma h^2}{4A} \right) \right]$$

$$V = V_f \left[ 5,75 \log \left[ \frac{h}{m_0 R_h} \exp \left( -1 - \frac{\gamma h^2}{4A} \right) \right] + 5,75 \log \frac{m_0 R_h}{y_0} \right] \quad (28)$$

“log “ désigne le logarithme décimal.

Le premier terme du membre droit de l'équation (28), figurant entre les crochets, est une fonction de la forme de la section du canal considéré. Cependant, la variation que subit ce terme pour différentes formes de canaux est relativement faible et il a été remplacé par une constante désignée par  $A_0$ . La relation (28) prend alors une forme plus simplifiée et s'écrit :

$$V = V_f \left[ A_0 + 5,75 \log \left( \frac{m_0 R_h}{y_0} \right) \right] \quad (29)$$

La relation exprimée par (29) représente l'équation théorique générale de la vitesse moyenne de l'écoulement dans les canaux ouverts.

Pour les canaux à paroi lisse, l'étude de *Keulegan* (1938), basée sur les valeurs expérimentales de *Nikuradse*, montre que  $A_0 \approx 3,25$ . Ainsi, l'équation théorique générale de la vitesse moyenne de l'écoulement uniforme dans les canaux ouverts à paroi lisse est, en tenant compte de (21) :

$$V = V_f \left( 3,25 + 5,75 \log \left( \frac{R_h V_f}{\nu} \right) \right) \quad (30)$$

En ce qui concerne les canaux ouverts à paroi rugueuse, *Keulegan* (1938) montre, après avoir analysé les mesures de *Bazin*, que la constante  $A_0$  varie dans une large gamme en fonction de la forme de la section du canal ( $3,23 \leq A_0 \leq 16,92$ ), et la valeur  $A_0 = 6,25$  est alors adoptée. Ainsi, l'expression théorique générale de la vitesse moyenne de l'écoulement uniforme dans les canaux ouverts à parois rugueuses est, en tenant compte de (23) :

$$V = V_f (6,25 + 5,75 \log(R_h/\varepsilon)) \quad (31)$$

En combinant les expressions  $V = CR_h^{1/2} J^{1/2}$  de *Chézy* et  $\sqrt{gR_h J} = V_f$  de la vitesse de frottement, on peut écrire :

$$V/V_f = C/\sqrt{g} \quad (32)$$

ou bien, en faisant appel à la relation liant le coefficient de *Chézy*  $C$  au coefficient de résistance  $f$  et à l'accélération de la pesanteur  $g$ , la relation (32) devient :

$$\frac{V}{V_f} = \sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{f}} \quad (33)$$

En tenant compte de la relation (32) et de la définition du nombre de *Reynolds* modifié tel que  $R=R_h V/\nu$ , les relations (30) et (31) permettent alors d'exprimer le coefficient  $C$  et  $f$ , respectivement pour un canal à paroi lisse et rugueuse :

$$C/\sqrt{g} = 3,25 + 5,75 \log \left( \frac{R\sqrt{g}}{C} \right) \quad (34)$$

$$C/\sqrt{g} = 6,25 + 5,75 \log \left( \frac{R_h}{\varepsilon} \right) \quad (35)$$

ou bien :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0,231 + 2,033 \log (R\sqrt{f}) \quad (36)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,210 + 2,033 \log \left( \frac{R_h}{\varepsilon} \right) \quad (37)$$

### I.6. Interprétation théorique du coefficient de rugosité de *Manning*

En éliminant le coefficient  $C$  de *Chézy* entre les relations (15) et (35), le coefficient  $n$  de *Manning* peut alors s'écrire :

$$n = \varepsilon^{1/6} \phi \left( \frac{R_h}{\varepsilon} \right) \quad (38)$$

avec :

$$\phi \left( \frac{R_h}{\varepsilon} \right) = \frac{\left( R_h / \varepsilon \right)^{1/6}}{\sqrt{g} \left[ 6,25 + 5,75 \log \left( R_h / \varepsilon \right) \right]} \quad (39)$$

La représentation graphique de (39), pour une large gamme de valeurs de la rugosité relative  $(R_h / \varepsilon)$ , se traduit par une courbe plate presque horizontale. La fonction  $\phi(R_h / \varepsilon)$  peut alors être remplacée par une constante dont la valeur est approximativement égale 0,0342.

Si l'on admet que la fonction  $\phi(R_h / \varepsilon)$  est constante, la relation (38) indique alors que le coefficient  $n$  de *Manning* varie en fonction de la puissance 1/6 de la rugosité absolue. En d'autres termes, lorsque  $\varepsilon$  subit une variation de 1/1000<sup>ème</sup>, le coefficient  $n$  de *Manning* ne varie que de 1/3 environ. Ainsi,  $\varepsilon$  est donc plus sensible que le coefficient  $n$ . En conséquence, l'application de la relation (38) n'entraîne qu'une erreur relativement faible sur le calcul du coefficient  $n$  de *Manning*.

L'étude comparative de *Bakhmeteff* et *Feodorof* (1943) entre les formules de *Manning* (1891), de *Ganguillet-Kutter* (1869) et de *Prandtl-Von-Karman* (1926) mise sous une forme identique à celle de la relation (38), montre que la formule de *Manning* (1891) est la plus adaptée.

### I.7. Méthode de détermination du coefficient $n$ de *Manning*

Deux méthodes de détermination du coefficient  $n$  de *Manning*, basées sur la répartition théorique des vitesses dans un canal à parois rugueuses, ont été développées. La première méthode, dite « méthode liée à la mesure de la rugosité », admet la validité de la relation (39). Ainsi, la valeur de  $n$  peut être calculée en application de la relation (38) pour la valeur connue de la rugosité absolue  $\varepsilon$ .

La seconde méthode est dite « méthode liée à la mesure de la vitesse ». En se référant à la loi logarithmique de la répartition de la vitesse exprimée par la relation (24), on peut s'apercevoir que cette répartition dépend de la rugosité absolue  $\varepsilon$  liée au coefficient  $n$  de *Manning* par la relation (38). En d'autres termes, la rugosité dans le sens du coefficient  $n$  de *Manning* peut être considérée comme un facteur prédominant affectant la répartition de la vitesse. Si celle-ci était connue, le coefficient  $n$  de *Manning* peut alors être évalué.

On définit  $V_{0,2}$  la vitesse aux deux dixièmes de la profondeur ou à la distance  $0,8y$  comptée à partir du fond du canal de grande largeur et à parois rugueuses;  $y$  représentant la profondeur de l'écoulement. En vertu de la relation (24), on peut écrire :

$$V_{0,2} = 2,5 V_f \operatorname{Ln} \left( \frac{24y}{\varepsilon} \right) \quad (40)$$

De manière identique, nous pouvons écrire que :

$$V_{0,8} = 2,5 V_f \operatorname{Ln} \left( \frac{6y}{\varepsilon} \right) \quad (41)$$

En éliminant la vitesse  $V_f$  entre les relations (40) et (41), on peut écrire, en posant  $X = V_{0,2}/V_{0,8}$  :

$$(1 - X) \operatorname{Ln} \left( \frac{y}{\varepsilon} \right) = X \operatorname{Ln} (6) - \operatorname{Ln} (24)$$

ou bien :

$$\operatorname{Ln} \left( \frac{y}{\varepsilon} \right) = \frac{(1,792X - 3,178)}{(1 - X)} \quad (42)$$

L'équation (31) qui exprime la vitesse moyenne de l'écoulement dans un canal à parois rugueuses, devient alors pour un canal de grande largeur ( $R_h = y$ ) :

$$\frac{V}{V_f} = \frac{1,775(X + 0,95)}{X - 1} \quad (43)$$

En outre, la combinaison des relations (15) et (31), pour ( $R_h = y$ ), donne :

$$\frac{V}{V_f} = \frac{y^{1/6}}{n\sqrt{g}} \quad (44)$$

Ainsi, le coefficient  $n$  de *Manning* peut être évalué à partir de l'égalité des relations (43) et (44), soit :

$$n = \frac{y^{1/6}(X-1)}{1,775\sqrt{g}(X+0,95)} \quad (45)$$

La relation (45) permet ainsi d'évaluer le coefficient  $n$  de *Manning* pour le cas d'un canal de grande largeur à parois rugueuses et dans l'hypothèse que la distribution de la vitesse suit une loi logarithmique.

### I.8. Formule de *Darcy-Weisbach*

Considérons un écoulement en régime permanent de débit  $Q$  dans un canal rectiligne de section transversale constante.

Proposons-nous d'établir l'expression de la perte de charge  $\Delta H$  correspondant à l'écoulement sur une distance  $L$ , représentant la longueur du tronçon rectiligne de la canalisation considérée.

Les paramètres physiques qui interviennent dans le problème ainsi posé sont :

$\Delta p$  perte de pression,  $L$  longueur du tronçon d'écoulement considéré,  $D_h$  diamètre hydraulique,  $\varepsilon$  la rugosité absolue des parois,  $V$  la vitesse moyenne de l'écoulement,  $\rho$  la masse volumique du liquide et  $\nu$  la viscosité cinématique du liquide.

Sept grandeurs physiques caractérisent ainsi le phénomène ( $n=7$ ) ainsi que trois grandeurs fondamentales (M, L et T), soit  $r = 3$ .

En application du théorème de *vaschy-buckingham*, la relation physique recherchée doit s'exprimer par une relation entre  $n-r = 4$  produits sans dimension indépendants formés avec les sept grandeurs considérées :

$$\left(\frac{\Delta p}{\rho V^2/2}\right) = \varphi(L/D_h, VD_h/\nu, \varepsilon/D_h) \quad (46)$$

$\Delta p$  est proportionnel à  $L$  puisque l'écoulement est identique dans toutes les sections transversales. La relation (46) devient :

$$\left(\frac{\Delta p}{\rho V^2/2}\right) = \frac{L}{D_h} F\left(\frac{VD_h}{\nu}, \frac{\varepsilon}{D_h}\right) \quad (47)$$

Posons :

$$f = F\left(\frac{VD_h}{\nu}, \frac{\varepsilon}{D_h}\right) \quad (48)$$

$f$  est le coefficient de frottement. Il ressort que :

$$\frac{\Delta p}{\rho} = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2} \quad (49)$$

Si l'on exprime  $\Delta p$  en hauteur d'eau, c'est à dire

$$\Delta p = \Delta H \rho g \quad (50)$$

$\Delta H$  est la perte de charge le long de la canalisation considérée,  $\rho$  est la masse volumique du liquide et  $g$  est l'accélération de la pesanteur. Les relations (49) et (50) montrent que :

$$\Delta H = f \frac{L}{D_h} \frac{V^2}{2g} \quad (51)$$

Par définition, le gradient de la perte de charge  $J$  s'exprime par :

$$J = \frac{\Delta H}{L} \quad (52)$$

En remplaçant (51) dans (52), on obtient la formule de *Darcy-Weisbach* (1854, 1845):

$$J = \frac{f}{D_h} \frac{V^2}{2g} \quad (53)$$

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  $V$ .

La formule (53) est aussi 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.

### 1.8.1. Détermination du coefficient de frottement par la formule de *Colebrook-White*

*Colebrook* propose une relation de type logarithmique au calcul du coefficient de frottement, mais elle se présente sous une forme implicite.

$$f^{-1/2} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} + \frac{2,51}{R\sqrt{f}} \right) \quad (54)$$

$\varepsilon/D_h$  est la rugosité relative et  $R$  est le nombre de *Reynolds*.

« log » désigne le logarithme décimal.

La formule de *Colebrook* est d'une applicabilité générale, car elle englobe tous les régimes d'écoulement ( régime lisse, régime turbulent rugueux et régime de transition ).

Dans le cas où le régime d'écoulement serait de transition, le coefficient de frottement  $f$  dépend à la fois de la rugosité relative  $\varepsilon/D_h$  et du nombre de *Reynolds*  $R$ . Pour des valeurs données de  $\varepsilon/D_h$  et de  $R$ , l'évaluation du coefficient de frottement  $f$ , par application de la relation (54), donne des résultats proches de la réalité. Compte tenu de sa forme implicite, son utilisation est facilitée par l'emploi des tables et abaques ou par des procédés itératifs.

A partir d'une valeur  $R = R_{lim}$  dépendant de la valeur de  $\varepsilon/D_h$ , le coefficient de frottement demeure pratiquement inchangé avec l'augmentation de  $R$ . Cette particularité caractérise la nature de

l'écoulement dans la zone de pleine turbulence ou domaine rugueux. Dans ce domaine, le coefficient de frottement  $f$  peut être évalué par la relation explicite de *Nikuradse*.

$$f^{-1/2} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} \right) \quad (55)$$

La relation (55) peut être obtenue à partir de la relation (54), en écrivant que  $R$  tend vers l'infini. Ceci correspond en pratique à des valeurs élevées de  $R$ .

Dans le domaine pratiquement lisse correspondant à la rugosité relative  $\varepsilon/D_h$  tendant vers zéro, ( $\varepsilon/D_h \rightarrow 0$ ), la relation (54) mène à écrire que:

$$f^{-1/2} = -2 \log \left( \frac{2,51}{R\sqrt{f}} \right) \quad (56)$$

L'évaluation de  $f$  nécessite également un procédé itératif.

### 1.8.2. Détermination du coefficient de frottement par la formule de *Achour* :

*Achour* (1997) propose une relation explicite de type logarithmique au calcul du coefficient de frottement  $f$  :

$$f^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} + \frac{4,5}{R} \log \left( \frac{R}{6,97} \right) \right] \quad (57)$$

“log” désigne le logarithme décimal,  $R$  est le nombre de *Reynolds*,  $\varepsilon$  est la rugosité absolue des parois de la canalisation et  $D_h$  est le diamètre hydraulique.

La formule de *Achour* (1997) englobe les différents régimes d'écoulement (lisse, rugueux et de transition). Pour le cas de l'écoulement en régime turbulent rugueux, le premier terme de l'équation (57) l'emporte sur le second terme, car,  $\frac{4,5}{R} \log \left( \frac{R}{6,97} \right)$  tend vers zéro. L'équation (57) devient :

$$f^{-1/2} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} \right) \quad (58)$$

La relation (55) est alors reproduite.

Dans le domaine pratiquement lisse, le second membre de l'équation (57) l'emporte sur le premier terme puisque  $\varepsilon/D_h$  tend vers zéro. L'équation (57) devient alors :

$$f^{-1/2} = -2 \log \left( \frac{4,5}{R} \log \frac{R}{6,97} \right) \quad (59)$$

L'application de la relation (59) occasionne un écart relatif inférieur à 0,6% par rapport à la relation (55) et pour  $R \geq 2350$ . La formule de *Swamee* (1976) permet également d'évaluer  $f$  de manière explicite dans le domaine pratiquement lisse :

$$f = \left[ 2 \log \left( \frac{5,74}{R^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (60)$$

Mais, la relation (60) occasionne un écart de 1,5% par rapport à (59) pour  $5.10^3 < R < 10^8$ .

### 1.8.3. Corrélation entre le coefficient de Chézy et de Darcy-Weisbach

Nous devons savoir dans quelle mesure les formules universelles des pertes de charge applicables aux écoulements en charge pourraient s'appliquer aux écoulements à surface libre. Rappelons au préalable la formule générale de l'écoulement à partir de la formule de Darcy-Weisbach (1854, 1845) :

$$J = \frac{f V^2}{D_h 2g} \quad (53)$$

Nous savons que dans le cas d'une conduite de section circulaire pleine, le rayon hydraulique est donné par :  $R_h = D_h/4$ , ou bien  $D_h = 4R_h$ . La relation (53) devient alors :

$$J = \frac{f V^2}{4R_h 2g} = \frac{f V^2}{8R_h g} \quad (61)$$

D'où

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{R_h J} \quad (62)$$

En comparant les relations (1) et (62), on peut écrire; pour le coefficient  $C$  de Chézy :

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (63)$$

### 1.8.4. Corrélation entre les formules de Darcy-Weisbach et de Manning-Strickler

Manning (1891) et Strickler (1923) ont établi et confirmé une forme simple reliant la vitesse moyenne  $V$  avec la pente du frottement  $J_f$  et le rayon hydraulique  $R_h$  par l'équation suivante :

$$V = k R_h^{2/3} J_f^{1/2} \quad (64)$$

Avec  $k$  coefficient de rugosité, appelé aussi coefficient de Strickler ( $m^{1/3}/s$ ).

Cette formule est très utilisée et s'applique encore de nos jours. L'équation de Manning-Strickler (1891, 1923) s'applique uniquement si l'équation suivante est satisfaite Hager (1987) :

$$\varepsilon / D_h > 1050 / R \quad (65)$$

Ce qui correspond à :

$$\varepsilon > 1050\nu/V \quad (66)$$

Avec :  $R = VD_h/\nu$

La rugosité absolue (rugosité équivalente du sable)  $\varepsilon$  est indépendante du diamètre  $D_h$  de la canalisation et donc du rayon hydraulique  $R_h$ .

La relation entre la rugosité équivalente du sable et le coefficient de rugosité  $k$  d'après *Strickler* (1923) (ou  $n = \frac{1}{k}$  d'après *Manning*), est selon *Hager* (1987) :

$$k\varepsilon^{1/6}/\sqrt{g} = 8,2 \quad (14)$$

En comparant les relations (64) et (62), on peut écrire; pour le coefficient  $k$  de *Strickler* :

$$kR_h^{1/6} = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (67)$$

## I.9. Conclusion

Le chapitre précédent a montré que la vitesse moyenne d'un écoulement uniforme peut se mettre sous la forme  $V = CR_h^\beta J^\gamma$ . Le paramètre  $C$  traduit la résistance de l'écoulement et peut être désigné par d'autres symboles. Son évaluation ainsi que sa dimension varie d'un auteur à un autre. Les exposants  $\beta$  et  $\gamma$  ont des valeurs qui varient également d'un auteur à un autre.

Selon *Chézy*, le coefficient de résistance  $C$  doit avoir pour unité  $[L^{1/2} T^{-1}]$  et les exposants  $\beta$  et  $\gamma$  sont tels que  $\beta = \gamma = 1/2$ .

Ce coefficient, dit de *Chézy*, peut être évalué de manière approximative en vertu des relations de *Ganguillet–Kutter* (1869), de *Bazin* (1897) et de *Powell* (1950).

Selon *Ganguillet–Kutter* (1869), le coefficient  $C$  dépend à la fois de  $n$ ,  $J$  et de  $R_h$  qui désignent respectivement le coefficient de rugosité traduisant l'état physique des parois du canal, la pente de celui-ci et le rayon hydraulique. Le coefficient  $C$ , selon la relation établie par ces auteurs, est faiblement influencé par la variation de  $J$ .

Selon *Bazin* (1897), le coefficient  $C$  de *Chézy* dépend à la fois de  $m$  et de  $R_h$  où  $m$  est un coefficient qui traduit la nature physique des parois du canal. Il dépend en d'autres termes du matériau constituant ces parois.

Selon *Powell* (1950), le coefficient  $C$  de *Chézy* dépend d'un plus grand nombre de paramètres qui sont  $\varepsilon$ ,  $R_h$  et  $R$ . Le paramètre  $\varepsilon$  est la rugosité absolue des parois du canal, c'est à dire la hauteur moyenne des aspérités de ces parois. Le paramètre  $R$  désigne le nombre de *Reynolds* caractérisant l'écoulement. La formule de *Powell* (1950), contrairement à celle de

*Ganguillet–Kutter* (1869) ou de *Bazin* (1897), est implicite vis-à-vis du coefficient  $C$  et se présente sous une forme logarithmique.

Selon *Manning–Strickler* (1891, 1923), le coefficient  $C$  est remplacé par le symbole  $k = 1/n$  ayant pour dimension  $[L^{1/3} T^{-1}]$ . Les exposants  $\beta$  et  $\gamma$  sont tels que  $\beta=2/3$  et  $\gamma=1/2$ . Le coefficient  $k$ , dit coefficient de *Strickler*, peut être lié à la rugosité  $\varepsilon$  par la relation de *Hager* (1987),  $\frac{k\varepsilon^{1/6}}{(8,2\sqrt{g})}=1$ .

Le coefficient  $n$ , dit de *Manning*, peut être corrélé au coefficient  $C$  de *Chézy* par la relation  $C=\frac{1}{n}R_h^{1/6}$  ou par celle de *Pavlovski* (1940)  $C=\frac{1}{n}R_h^y$ , où  $y$  dépend de  $n$  et de  $R_h$ .

Le chapitre précédent a montré que la loi de distribution de la vitesse dans un écoulement turbulent est de type logarithmique, selon la conception de *Prandtl-Von-Karman*. Elle se présente sous la forme  $V=\frac{5}{2}V_f Ln\left(\frac{y}{y_o}\right)$  où  $V_f=\sqrt{gR_h J}$  est la vitesse dite de frottement,  $y$  est la distance verticale comptée à partir du fond du canal au point considéré,  $y_o$  est une constante qui dépend notamment de la nature lisse ou rugueuse des parois du canal.

La vitesse moyenne  $V$  de l'écoulement peut être également exprimée par la formule de *Darcy–Weisbach* (1854, 1845)  $J=\frac{f}{D_h} \frac{V^2}{2g}$ . Le paramètre  $D_h$  désigne le diamètre hydraulique,  $f$  est le coefficient de frottement traduisant la résistance à l'écoulement et  $J$  est la pente du canal. Le coefficient de frottement  $f$  peut être évalué par la formule implicite de *Colebrook–White* ou par la relation explicite de *Achour* (1997), et ce pour toute nature du régime d'écoulement.

Le coefficient de frottement  $f$  peut être corrélé au coefficient  $C$  de *Chézy* par la relation  $C=\sqrt{\frac{8g}{f}}$ .

Après avoir passé en revue les formules usuelles de l'écoulement uniforme, le chapitre suivant sera consacré au calcul de cet écoulement se produisant notamment dans une conduite circulaire. Notre attention a été portée sur cette forme en raison de son utilisation fréquente dans la pratique.

## II. VERIFICATION DE L'APPROCHE THEORIQUE

### II.1. Introduction

Après avoir exposé, dans le chapitre précédent, notre approche théorique, la présente partie de l'étude se propose de vérifier cette approche par :

- des mesures expérimentales effectuées dans le laboratoire *Larhyss* de l'université de *Biskra*. Ces mesures ont été obtenues à partir d'essais qui ont concerné 5 conduites circulaires de diamètre intérieur respectif 49 mm, 56 mm, 86 mm, 124 mm et 130 mm. Les résultats des essais sont regroupés dans les tableaux A13 à A17 en annexe.

- des résultats de calculs effectués par *Dupont* (1988). Ces résultats, regroupés dans les tableaux A22 à A41 en annexe, présentent les valeurs du gradient de la perte de charge  $J$  obtenues par application combinée des relations de *Darcy – Weisbach* et de *Colebrook – White* et qui concernent 20 conduites circulaires en charge de diamètres différents.

Notre démarche consiste ainsi en une vérification numérique des relations théoriques que nous avons proposées sur la base des résultats obtenus par le laboratoire *Larhyss* (2002) et de ceux de *Dupont* (1988). Cette vérification est faite sur les valeurs des diamètres des conduites et répondant ainsi à un besoin de dimensionnement.

### II.2. Vérification numérique des diamètres des conduites

#### II.2.1. Etude comparative aux données du laboratoire *Larhyss*

Cette partie de l'étude vise à vérifier et à comparer les valeurs réelles et calculées du diamètre  $D$  pour l'ensemble des conduites testées. Cette vérification a concerné tous les régimes d'écoulement observés et c'est ainsi que pour :

1. Le régime d'écoulement turbulent rugueux, le diamètre  $D_r$  calculé ou théorique répond à la relation  $D_r = 1,539\Lambda$ , où la longueur  $\Lambda$  peut être évaluée par la relation implicite :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = \frac{2^{2,8} \sqrt{J}}{D_{h0}^{0,15}} \Lambda^{5/2} \log\left(3,7 D_{h0} \frac{\Lambda}{\varepsilon}\right) \quad (213)$$

Nous rappelons que dans cette dernière relation, le paramètre de dimension  $D_{h0}$  est tel que :

$$D_{h0} = P_1^{0,245} / A_1^{0,623} = 1,539$$

La longueur  $\Lambda$  peut également être évaluée par la relation explicite suivante, sous la condition  $\Lambda/\varepsilon \geq 50$  :

$$\frac{\Lambda}{\varepsilon} = 0,4115 \varphi^{0,3814} \quad (229)$$

En tenant compte des valeurs mesurées des paramètres  $Q$ ,  $J$  et  $\varepsilon$ , le diamètre  $D_r$  a été calculé par

les relations précédemment indiquées. Ce diamètre  $D_r$  a été enfin comparé au diamètre réel  $D$  de la conduite testée. Cette comparaison, figurant sur les tableaux A13, A14 et A16 en annexe, a permis de conclure que tous les diamètres calculés, selon cette démarche, correspondent assez bien aux diamètres réels des conduites testées.

Les valeurs calculées des coefficients de transition  $\lambda$  sont très proches de l'unité et ceci a permis de confirmer que le régime d'écoulement était bien turbulent rugueux. Cependant, une légère correction a été opérée sur les diamètres calculés, en écrivant que  $D$  (réel) =  $\lambda D$  (calculé).

Les tableaux 6 et 7 montrent respectivement les écarts relatifs entre les diamètres calculés par les relations théoriques (213) et (229), et les diamètres réels pour la conduite de diamètre 49 mm, pour une gamme de débit comprise entre 3,67 l/s et 8,88 l/s.

Tableau 6 : Ecart sur  $D$  calculés par la relation (213)

$\Delta D/D$ (%)	0,019	0,021	0,018	0,023	0,026	0,017	0,015	0,015	0,014
$\Delta D/D$ (%)	0,015	0,017	0,013	0,019	0,012	0,01	0,012	0,012	0,012
$\Delta D/D$ (%)	0,012	0,011	0,013	0,012	0,014	0,013	0,013	0,013	0,013
$\Delta D/D$ (%)	0,011	0,01	0,01	0,01	0,01	0,009	0,009	0,011	

Tableau 7 : Ecart sur  $D$  calculés par la relation (229)

$\Delta D/D$ (%)	1,18	0,85	1,24	0,43	0,09	0,92	1,21	1,16	1,36
$\Delta D/D$ (%)	0,92	0,48	1,14	0,20	1,4	1,97	1,28	1,28	1,27
$\Delta D/D$ (%)	1,09	1,28	0,71	0,89	0,47	0,55	0,48	0,56	0,54
$\Delta D/D$ (%)	0,77	1,04	0,98	1,15	1,11	1,28	1,36	0,69	

2. Le régime de transition, la vérification numérique a concerné les conduites de diamètre  $D = 49$  mm, 56 mm et 130 mm. Les résultats les plus significatifs sont ceux obtenus sur la conduite de diamètre  $D = 130$  mm, compte tenu de la large gamme des débits utilisés  $14 \text{ l/s} \leq Q \leq 44 \text{ l/s}$ .

Les diamètres calculés ont obtenus par application de la relation :

$$D \text{ (calculé, régime de transition)} = \lambda D_r \text{ (calculé, régime turbulent rugueux)}$$

Pour l'ensemble des conduites concernées par l'écoulement en régime de transition, les diamètres calculés et corrigés sont regroupés dans les tableaux A13, A14 et A17 en annexe.

La vérification numérique des diamètres des conduites testées a consisté à comparer les diamètres calculés et réels de ces mêmes conduites. Les tableaux 8 et 9 montrent les écarts relatifs issus de cette comparaison, pour le seul cas du diamètre  $D = 130$  mm.

Tableau 8 : Ecart relatifs sur les diamètres calculés (relation 213) et réels en régime de transition

$\Delta D/D$ (%)	0,036	0,039	0,041	0,041	0,037	0,079	0,069	0,046	0,087
$\Delta D/D$ (%)	0,042	0,045	0,043	0,05	0,047	0,042	0,049	0,055	0,064
$\Delta D/D$ (%)	0,074	0,086	0,085	0,071	0,071	0,066	0,065	0,063	0,068
$\Delta D/D$ (%)	0,072	0,076	0,086	0,087	0,097	0,096	0,101	0,096	

Tableau 9 : Ecart relatifs sur les diamètres calculés (relation 229) et réels en régime de transition

$\Delta D/D$ (%)	0,71	0,9	0,97	0,98	0,93	1,09	1,12	1,09	1,02
$\Delta D/D$ (%)	1,06	1,10	1,11	1,12	1,12	1,11	1,12	1,1	1,04
$\Delta D/D$ (%)	0,95	0,82	0,84	0,95	0,94	0,97	0,96	0,97	0,89
$\Delta D/D$ (%)	0,82	0,77	0,63	0,59	0,45	0,44	0,36	0,41	

On peut ainsi constater que l'écart maximal observé sur l'estimation du diamètre réel de la conduite, par application de la relation implicite (213), ne dépasse guère 0,1%. Cet écart est très acceptable. Il reflète la fiabilité de la relation théorique établie pour le calcul de la dimension linéaire  $D$ . Ce résultat peut s'expliquer par le fait que notre développement théorique s'est appuyé sur la combinaison des relations de *Nikuradse* et de *Darcy-Weisbach* dont l'application mène en règle générale, selon la bibliographie, à de bons résultats lorsqu'il s'agit de conduites circulaires en charge.

De même, l'application de la relation explicite (229) mène à un écart maximal de 1,12 % sur l'estimation du diamètre réel de la conduite, ce qui confirme que cette relation constitue une excellente approximation à la formule implicite (213).

Pour mieux apprécier la fiabilité de la relation (213), nous avons comparé les écarts relatifs sur le diamètre calculé, obtenus par application de cette relation à ceux calculés par la méthode *Larhyss* (2002).

Tableau 10 : Ecart relatifs sur les diamètres calculés et réels en régime de transition, sur la base des données expérimentales du laboratoire *Larhyss*

$\Delta D/D$ (%)	0,8	0,5	0,38	0,29	0,43	1,46	1,16	0,21	1,98
$\Delta D/D$ (%)	0,04	0,28	0,64	0,54	0,39	0,43	0,86	1,2	1,75
$\Delta D/D$ (%)	2,26	2,89	2,8	2,28	2,3	2,15	2,2	2,15	2,54
$\Delta D/D$ (%)	2,83	3,05	3,6	3,7	4,23	4,23	4,5	4,3	

Nous pouvons ainsi constater que l'application de la méthode *Larhyss* aux conduites circulaires en charge mène à des écarts relatifs nettement supérieurs à ceux obtenus lors de l'application de notre approche. Cette différence nette des écarts relatifs s'explique par le fait que la méthode

*larhyss* repose sur la formule de *Strickler* dont l'application conduit à des résultats entachés d'erreurs lorsqu'il s'agit de conduites circulaires. La bibliographie indique en effet que la formule de *Strickler* ne donne de bons résultats que lorsqu'elle est appliquée aux canaux ouverts.

En régime de transition, nous pouvons aussi évaluer l'erreur relative maximale commise lors de l'estimation du diamètre de la conduite considérée. Les diamètres sont calculés, dans le cas de ce régime d'écoulement, par la relation  $D = \lambda D_r$ .

Avec :

$$D_r = 1,539 \Lambda$$

et

$$\lambda = \left( \frac{f}{f_r} \right)^{1/5}$$

Nous rappelons que la longueur  $\Lambda$  répond à la relation implicite :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = \frac{2^{2,8} \sqrt{J}}{D_{h0}^{0,15}} \Lambda^{5/2} \log \left( 3,7 D_{h0} \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right) \quad (213)$$

et que le coefficient de frottement  $f$  est évalué par la relation de *Achour (1997,2002)* :

$$f^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} + \frac{4,5}{R} \log \left( \frac{R}{6,97} \right) \right]$$

Où  $R$  est le nombre de *Reynolds* qui s'exprime :  $R = (4Q)/(\pi D v)$

Le coefficient de frottement  $f_r$ , dans l'hypothèse du régime d'écoulement turbulent rugueux, est donné par la relation de *Nikuradse* :

$$f_r^{-1/2} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} \right)$$

En vertu du théorème des erreurs relatives, ces dernières relations permettent d'écrire respectivement:

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} = \frac{\Delta \Lambda}{\Lambda}$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{1}{5} \frac{\Delta f}{f}$$

**Avec, en vertu de la relation (213) :**

$$\frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} = \left( \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{1}{2} \frac{\Delta J}{J} - \frac{\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}}{2,3 \log \left( 3,7 D_{h0} \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right)} \right) \left( \frac{5}{2} + \frac{1}{2,3 \log \left( 3,7 D_{h0} \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right)} \right)^{-1}$$

L'erreur relative  $\Delta f/f$  a été déterminée en vertu de la relation de *Darcy-Weisbach* :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta J}{J} + 2 \frac{\Delta Q}{Q}$$

Soit donc :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{5} \left[ \frac{\Delta J}{J} + 2 \frac{\Delta Q}{Q} \right]$$

Finalement on peut remarquer que l'erreur relative commise sur l'estimation du diamètre réel de la conduite dépend de celles commises sur l'estimation du gradient de perte de charge  $J$ , du débit volume  $Q$  et de la rugosité absolue  $\varepsilon$ .

Comme nous l'avons indiquées dans le troisième chapitre de la première partie, les plus petites valeurs des paramètres  $J$ ,  $Q$  et  $\varepsilon$ , rencontrées au cours de l'expérimentation (Larhyss et Gali, 2002) pour la conduite de diamètre égale à 130 mm, sont respectivement  $J = 0,01333333$ ,  $Q = 14,8$  l/s et  $\varepsilon = 2,2 \cdot 10^{-5}$  m. Cette dernière valeur montre clairement que l'erreur relative commise sur l'estimation de  $\varepsilon$  est insignifiante et nous pouvons écrire que :

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \left( \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{1}{2} \frac{\Delta J}{J} \right) \left( \frac{5}{2} + \frac{1}{2,3 \log \left( 3,7 D_{h0} \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right)} \right)^{-1}$$

Nous avons vu aussi, dans le même chapitre, que  $\Delta J/J = 5\%$  et  $\Delta Q/Q = 3,38\%$ .

La valeur de  $\Lambda/\varepsilon$  qui correspond aux paramètres  $Q$  et  $J$  cités ci-dessus est égale à 205,23. Pour le cas d'une conduite circulaire en charge, le paramètre de dimension du diamètre hydraulique  $D_{h0}$  est égale à 1,539.

En tenant compte de ces considérations, l'erreur relative maximale commise sur l'évaluation du  $\Lambda$  est donc :

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \left( 0,0338 + \frac{1}{2} 0,05 \right) \left( \frac{5}{2} + \frac{1}{2,3 \log (3,7 \cdot 1,539 \cdot 205,23)} \right)^{-1} = 2,23\%$$

Par conséquent l'erreur relative maximale commise sur l'évaluation du diamètre  $D_r$  est :

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = 2,23\%$$

L'écart maximal observé sur l'estimation du diamètre  $D$  réel de la conduite testée est également lié à celui commis sur l'évaluation du facteur de correction de la dimension linéaire  $\lambda$ . En effet,  $D = \lambda D_r$  implique que :

$$\Delta D/D = \Delta\lambda/\lambda + \Delta D_r/D_r$$

En considérant les valeurs maximales observées  $\Delta J/J = 5\%$  et  $\Delta Q/Q = 3,38\%$ , la relation qui exprime l'erreur relative sur l'estimation de  $\lambda$  permet d'écrire que :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{1}{5} (0,05 + 2 \times 0,0338) \approx 2,35\%$$

Ainsi :

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta D_r}{D_r} = 2,35 + 2,23 = 4,58\%$$

C'est ainsi que se justifie amplement l'erreur relative maximale expérimentale sur l'évaluation du diamètre réel  $D$  pour le cas de la conduite de 130mm de diamètre,  $(\Delta D/D)_{\max.} = 0,101\%$  où le diamètre  $D$  est calculé par la relation (213). De même, l'application de la relation (229) mène à une erreur relative maximale acceptable, puisque  $(\Delta D/D)_{\max} = 1,12\%$ .

3. Le régime d'écoulement pratiquement lisse, la vérification numérique a concerné le diamètre  $D = 86$  mm pour la large gamme de débits  $5,7 \text{ l/s} \leq Q \leq 30 \text{ l/s}$ .

L'objectif de l'étude a été de comparer les diamètres calculés, en vertu de la méthode préconisée au cours du développement théorique, et le diamètre réel  $D = 86$  mm de la conduite testée.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3 de la première partie, le calcul du diamètre de la conduite repose sur la détermination du facteur de correction de la dimension linéaire  $\psi$ , applicable au régime d'écoulement pratiquement lisse.

L'évaluation du coefficient  $\psi$  a nécessité dans un premier temps le calcul du coefficient de frottement  $f_r$  dans l'hypothèse d'un régime turbulent rugueux. Ce régime d'écoulement est supposé se produire dans la conduite hypothétique ou fictive de rugosité relative arbitrairement choisie  $\varepsilon/D_r = 8,5 \cdot 10^{-3}$ . Selon la relation de *Nikuradse* la valeur de  $f_r$  correspondant à cette rugosité relative est  $f_r = 0,0359$ .

L'évaluation du coefficient  $\psi$  a nécessité dans un second temps le calcul du coefficient de frottement  $f$  caractérisant l'écoulement pratiquement lisse se produisant dans la conduite réelle testée. Ce coefficient de frottement  $f$  peut être évalué par application de la formule de *Achour* (1997) :

$$f^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{4,5}{R} \log \left( \frac{R}{6,97} \right) \right]$$

Ainsi, et pour chacun des débits utilisés, le coefficient de correction  $\psi$  répond à la relation :

$$\psi = \left( \frac{f}{0,0359} \right)^{1/5}$$

Le diamètre réel calculé a été obtenu par la correction du diamètre de la conduite hypothétique véhiculant un écoulement en régime turbulent rugueux, selon la relation :

$$D \text{ (réel non normalisé)} = \psi D_r \text{ (conduite hypothétique)}$$

Le diamètre de la conduite hypothétique est évalué, par la relation suivante, en tenant compte des valeurs mesurés des débits  $Q$  et du gradient de la perte de charge  $J$  :

$$D_r \text{ (conduite hypothétique)} = 1,539 A$$

Avec :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = \frac{2^{2,8} \sqrt{J}}{D_{h0}^{0,15}} \Lambda^{5/2} \log\left(3,7 D_{h0} \frac{\Lambda}{\varepsilon}\right)$$

Puisque  $D_h = \Lambda D_{h0}$ , il ressort que :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = \frac{2^{2,8} \sqrt{J}}{D_{h0}^{0,15}} \Lambda^{5/2} \log\left(\frac{3,7}{\varepsilon/D_h}\right)$$

Ou bien :

$$\Lambda = \left[ \frac{Q}{\sqrt{gJ}} \frac{1}{\log\left(\frac{3,7}{\varepsilon/D_h}\right)} \frac{D_{h0}^{0,15}}{2^{2,8}} \right]^{2/5}$$

Par conséquent :

$$D_r = 1,539 \left[ \frac{Q}{\sqrt{gJ}} \frac{1}{\log\left(\frac{3,7}{\varepsilon/D_h}\right)} \frac{D_{h0}^{0,15}}{2^{2,8}} \right]^{2/5}$$

Sachant que pour la conduite circulaire pleine  $D_{h0} = 1,539$  et que  $\varepsilon/D_h = 8,5 \cdot 10^{-3}$ , le diamètre  $D_r$  peut simplement s'écrire :

$$D_r (\text{conduite hypothétique}) = \frac{1}{2} \left( \frac{Q}{\sqrt{gJ}} \right)^{2/5}$$

En vertu du théorème des erreurs relatives, l'erreur commise sur le calcul du diamètre  $D_r$  est donc :

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} = \frac{2}{5} \left( \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{1}{2} \frac{\Delta J}{J} \right)$$

Nous avons vu aussi dans le chapitre 3 de la première partie que :  $\Delta Q/Q = 8,77\%$  et  $\Delta J/J = 6,67\%$ .

L'erreur relative maximale affectant le calcul du diamètre  $D_r$  est donc :

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} = \frac{2}{5} \left( 0,0877 + \frac{1}{2} 0,0667 \right) = 4,84\%$$

L'erreur relative commise sur le calcul du diamètre réel de la conduite s'obtient en écrivant que :

$$\Delta D/D = \Delta \psi/\psi + \Delta D_r/D_r$$

Comme dans le cas du coefficient de correction  $\lambda$ , l'erreur relative engendrée sur le calcul du coefficient  $\psi$  s'écrit :

$$\frac{\Delta \psi}{\psi} = \frac{1}{5} \frac{\Delta f}{f}$$

avec :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta J}{J} + 2 \frac{\Delta Q}{Q}$$

soit :

$$\frac{\Delta \psi}{\psi} = \frac{1}{5} \left( \frac{\Delta J}{J} + 2 \frac{\Delta Q}{Q} \right)$$

Cette dernière relation conduit à écrire que :

$$\frac{\Delta \psi}{\psi} = \frac{1}{5} (0,0667 + 2 \times 0,0877) = 4,84\%$$

L'erreur relative occasionnée sur le calcul du diamètre réel de la conduite est donc :

$$\frac{\Delta D}{D} = 4,84 + 4,84 = 9,68\%$$

Il est à noter que les mesures expérimentales sont entachées d'une erreur relative qui demeure dans tous les cas en deçà de l'erreur maximale. Ces mesures montrent que l'erreur relative maximale issue du calcul et de la mesure des diamètres de la conduite testée est égale à 8,37% (voir tableau A15 en annexe). Ceci permet de conclure, à la fiabilité de la démarche théorique proposée.

Tous les résultats de calcul sont regroupés dans les tableaux A13 à A17 figurants en annexe.

Afin d'examiner l'influence de la rugosité absolue  $\varepsilon$  sur le calcul du diamètre  $D$  de la conduite, nous avons suggéré de refaire la vérification précédente en utilisant pour chaque conduite une rugosité moyenne  $\varepsilon_{moy}$ . Les résultats de nos calculs sont regroupés dans les tableaux A18 à A21 figurants en annexe.

En considérant les valeurs regroupées dans le tableau 11, nous pouvons constater que l'idée d'affecter aux conduites une valeur moyenne de la rugosité absolue, n'influe que très peu sur la valeur calculée du diamètre  $D$ . En effet, les écarts relatifs maxima restent dans tous les cas dans des limites très acceptables.

Tableau 11:  $(\Delta D/D)_{max}$  en fonction de  $\varepsilon_{moy}$

$D$ (m)	49	56	<b>124</b>	130
$\varepsilon_{moy}$ (m)	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
$(\Delta D/D)_{max}$ (%)	3,9	2,21	1,82	5,34

### II.2.2. Etude comparative aux données de Dupont

Etant donné le nombre important des valeurs calculées par Dupont (1988), seul le régime d'écoulement turbulent rugueux a été considéré dans cette partie de notre étude. Les valeurs tabulées de Dupont (1988) constituent une sérieuse base de données pouvant permettre la vérification numérique de nos relations théoriques. Cette vérification a consisté à calculer le diamètre  $D$  des conduites considérées, correspondant aux divers gradients de la perte de charge  $J$  préconisés par Dupont. Ceux-ci ont été évalués par la combinaison des relations de Darcy – Weisbach et de Colebrook – White, dont on rappelle les expressions respectives :

$$J = \frac{f V^2}{D_h} = \frac{8f Q^2}{g \pi^2 D^5}$$

$$f^{-1/2} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} + \frac{2,51}{R\sqrt{f}} \right)$$

où  $R$  est le nombre de Reynolds.

Les données ayant servies à notre vérification sont le débit volume  $Q$ , le gradient de perte de charge  $J$ , la rugosité absolue  $\varepsilon$  et la viscosité cinématique du liquide en écoulement  $\nu$ . Ces paramètres sont regroupés dans les tableaux de A22 à A41 figurants en annexe.

En outre, 20 diamètres ont fait l'objet d'une vérification et qui sont : 40 mm, 50 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm, 125 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 350 mm, 400 mm, 450 mm, 500 mm, 600 mm, 800 mm, 1000 mm, 1250 mm, 1500 mm et enfin 1750 mm. Les vitesses moyennes considérées ont été variées entre 0,01 m/s et 4 m/s, ce qui constitue une gamme suffisamment large.

Etant donné que seul le régime d'écoulement rugueux a été considéré, le diamètre théorique  $D$  recherché est tel que  $D = D_r = \Lambda D_o$ . Les paramètres  $\Lambda$  et  $D_o$  sont tels que :

$$\frac{Q}{\sqrt{J}} = \frac{2^{2,8} \sqrt{g}}{D_{h0}^{0,15}} \Lambda^{5/2} \log \left( 3,7 D_{h0} \frac{\Lambda}{\varepsilon} \right)$$

$$D_{h0} = D_o = P_1^{0,245} / \Lambda_1^{0,623} = 1,539$$

Pour chacune des valeurs de ces paramètres, le diamètre  $D$  a été calculé puis comparé au diamètre réel de toutes les conduites considérées. Les résultats sont consignés dans les tableaux A22 à A41 figurants en annexe. Il ressort de notre étude comparative que les diamètres calculés, selon les relations ci-dessus indiquées, correspondent assez bien aux diamètres réels. En effet, nous avons pu constater que l'écart maximal observé ne dépasse guère 0,57 %, pour l'ensemble des diamètres considérés. Ceci permet ainsi de confirmer la fiabilité de la relation implicite (213), tout au moins dans le régime d'écoulement turbulent rugueux considéré dans cette partie de notre étude.

Nous avons poursuivie l'étude comparative aux données fournies par *Dupont* (1988), en s'appuyant sur la relation explicite (229) pour le calcul théorique du diamètre  $D$ .

$$\frac{\Lambda}{\varepsilon} = 0,4115 \varphi^{0,3814} \quad (229)$$

Le paramètre sans dimension  $\varphi$  est tel que  $\varphi = \frac{Q}{\sqrt{gJ\varepsilon^5}}$  et nous rappelons que l'application de la relation (229) est tributaire de la condition  $\frac{\Lambda}{\varepsilon} \geq 50$ .

Le tableau 12 consigne les résultats de cette étude comparative en montrant en particulier les écarts relatifs maxima que peut impliquer l'application explicite de la relation (229). On peut ainsi constater que, compte tenu de la condition  $\frac{\Lambda}{\varepsilon} \geq 50$ , les écarts relatifs obtenus sur le diamètre  $D$  sont acceptables et permettent de conclure à la fiabilité de la relation (229).

Tableau 12 : Diamètres calculés par la relation (229) et comparés aux données de *Dupont* (1988)

$D_{réel}$ (mm)						$(\Delta D/D)_{max}$ (%)
	$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$	$\Lambda$ (m)	$D_{calculé}$ (mm)	$\Delta D/D$ (%)	
40	7,43E+3	12,32	0,0246	37,9	5,47	5,64
50	1,36E+4	15,53	0,031	47,8	4,6	4,96
60	2,24E+4	18,76	0,0375	57,7	3,9	4,31
80	4,87E+4	25,23	0,0505	77,7	3,01	3,39
100	8,89E+4	31,74	0,0635	97,7	2,35	2,74
125	1,62E+5	39,87	0,0797	123	1,85	2,28
150	2,64E+5	48,06	0,0961	148	1,39	1,90
200	5,7E+5	64,48	0,129	198	0,77	1,18
250	1,04E+6	80,98	0,162	249	0,29	0,68
300	1,68E+6	97,4	0,195	298	0,065	0,31
350	2,53E+6	113,87	0,228	350,5	0,15	0,15
400	3,61E+6	130,32	0,261	401	0,29	0,45
450	4,93E+6	146,79	0,294	452	0,41	0,42
500	6,52E+6	163,3	0,327	503	0,53	0,56
600	1,06E+7	196,3	0,393	604	0,71	0,73
800	2,26E+7	262,22	0,524	807	0,89	0,90
1000	4,06E+7	327,87	0,656	1009	0,93	0,96
1250	7,29E+7	410,1	0,82	1262	0,99	1,00
1500	1,17E+8	491,9	0,984	1514	0,94	0,96
1750	1,76E+8	574,14	1,148	1767	0,99	1,00

### II.3. Conclusion

Le chapitre précédent a eu pour objectif la vérification des relations issues du développement théorique destinées à l'évaluation du diamètre  $D$  d'une conduite circulaire pleinement occupée par l'écoulement. La vérification, numérique, a concerné aussi bien la relation implicite (213)

que la relation explicite (229) qui lui est associée. Afin d'affirmer ou d'infirmer la validité de ces relations, une étude comparative a été proposée. Celle-ci a consisté à comparer les diamètres calculés ou théoriques évalués par les relations (213) et (229) à ceux issus d'une part de l'application de la méthode préconisée par le laboratoire "Larhyss" (2002) et ceux calculés par Dupont (1988) d'autre part.

Les données du laboratoire *larhyss* sont issues d'essais expérimentaux obtenus sur 05 conduites circulaires en charge, englobant les régimes d'écoulement turbulent rugueux, de transition et pratiquement lisse. Les données fournies par Dupont proviennent par contre d'un calcul itératif s'appuyant sur la combinaison des relations de *Darcy – Weisbach* et de *Colebrook – White*. Un échantillon de 20 conduites de diamètres pratiques divers a été considéré. L'étude comparative a clairement montré que les valeurs réduites des écarts relatifs commis sur l'évaluation du diamètre  $D$  ont permis de conclure à la fiabilité et à la validité des relations théoriques (213) et (229).

## II. CALCUL DE L'ÉCOULEMENT UNIFORME

### II.1. Introduction

Après avoir passé en revue les formules usuelles de l'écoulement uniforme, le présent chapitre est consacré à la présentation de la méthodologie de calcul de ce type d'écoulement, notamment la détermination de la dimension linéaire. Notre attention porte essentiellement sur la conduite circulaire pleine en raison de son application très répandue dans la pratique. Notons que la méthodologie présentée peut être étendue à tous les autres profils géométriques connus.

Deux principaux paramètres sont définis, à savoir la conductivité d'une section d'un canal ou d'une conduite et le facteur de section. Leur importance est fondamentale dans l'application des relations, régissant l'écoulement uniforme, présentées sous leur forme classique. Ces paramètres sont explicitement définis pour une conduite circulaire faisant l'objet de notre étude.

### II.2. Définitions

#### II.2.1. Conductivité d'une section d'un canal

Le débit volume d'un écoulement uniforme se produisant dans un canal est donné par le produit de la vitesse moyenne de l'écoulement à l'aire de la surface mouillée  $A$ . La vitesse  $V$ , comme nous l'avons déjà indiqué, s'exprime sous la forme générale  $V = CR_h^\beta J^\gamma$ . Le débit s'écrit alors

$$Q = VA = CAR_h^\beta J^\gamma = K J^\gamma \quad (68)$$

où :

$$K = CAR_h^\beta \quad (69)$$

Le terme  $K$  est connu sous le nom de conductivité de la section du canal. Il représente la capacité d'évacuation (conductivité) de la section du canal, proportionnelle au débit volume  $Q$ . Lorsque l'une ou l'autre des formules de *Chézy* et de *Manning* est appliquée, impliquant ainsi que  $\gamma = 1/2$ , le débit volume  $Q$  s'exprime alors :

$$Q = KJ^{1/2} \quad (70)$$

La conductivité est alors :

$$K = Q/J^{1/2} \quad (71)$$

La relation (71) permet ainsi de calculer la conductivité  $K$  lorsque les valeurs du débit volume  $Q$  et la pente  $J$  du canal sont connues.

Lorsque la formule de *Chézy* est appliquée, la relation (69) devient :

$$K = C A R_h^{1/2} \quad (72)$$

$C$  est le coefficient de *Chézy*.

De même, lorsque la formule de *Manning* est appliquée, la conductivité s'écrit :

$$K = (1/n) A R_h^{2/3} \quad (73)$$

Les relations (72) et (73) peuvent être utilisées lorsque la géométrie de la section mouillée  $A$  ainsi que le facteur de résistance ou le coefficient de rugosité sont connus.

### II.2.2. Facteur de section

Le produit  $A R_h^{2/3}$  est appelé facteur de section, ayant une grande importance pour le calcul de l'écoulement uniforme. Le facteur de section peut être déduit de la relation (73) :

$$A R_h^{2/3} = n K \quad (74)$$

En tenant compte de (71), la relation (74) s'écrit :

$$A R_h^{2/3} = n \frac{Q}{\sqrt{J}} \quad (75)$$

La relation (75) est essentiellement applicable au calcul de l'écoulement uniforme. Le membre droit de cette équation est composé des paramètres  $n$ ,  $Q$  et  $J$ , tandis que son membre gauche ne dépend que de la géométrie de la section mouillée. Pour des valeurs données de  $n$ ,  $Q$  et  $J$ , il n'existe qu'une seule valeur de la profondeur correspondant à l'écoulement uniforme. Cette profondeur est appelée « profondeur normale de l'écoulement ».

Lorsque les valeurs de  $n$  et de  $J$ , sont connues, la relation (75) montre qu'il n'existe qu'un seul débit volume  $Q$  assurant l'écoulement uniforme; ce débit est appelé « débit normal ».

L'unicité de la profondeur normale et du débit normal est assurée à condition que le facteur de section  $A R_h^{2/3}$  varie dans le même sens que la profondeur de l'écoulement; c'est ce qui est d'ailleurs observé dans la majeure partie des cas.

Dans le cas des conduites fermées, le facteur de section  $A R_h^{2/3}$  croît dans un premier temps lorsque la profondeur augmente et décroît dans un second temps à l'approche de la section pleine. Le maximum de la valeur du facteur de section s'obtient généralement, dans le cas de telles conduites, à une profondeur légèrement inférieure à celle qui correspond à la pleine section. Par conséquent, il est possible d'obtenir deux profondeurs pour une même valeur du facteur de section. Ces profondeurs sont respectivement plus grande et plus petite que la profondeur correspondant au maximum de valeur de  $A R_h^{2/3}$ .

L'équation (75) est très utile au calcul de l'écoulement uniforme. Lorsque les valeurs du débit  $Q$ , de la pente  $J$  et celle du coefficient de rugosité  $n$  sont connues, l'équation (75) permet de calculer

la valeur du facteur de section  $A_N R_{hN}^{2/3}$  correspondant à l'écoulement uniforme et de déduire alors la profondeur  $h_N$  de celui-ci. En outre, lorsque les valeurs de  $n$ ,  $J$  et du facteur de section sont connues, le débit normal  $Q_N$  peut être calculé par application de la relation :

$$Q_N = (1/n) A_N R_{hN}^{2/3} \sqrt{J} \quad (76)$$

La relation (76) traduit en fait le produit de la section mouillée et de la vitesse moyenne de l'écoulement défini par la formule de *Manning* (1891).

### II.3. Application à la conduite circulaire

L'aire de la section mouillée d'un segment circulaire est entièrement définie par le diamètre  $D$  de la section et par le demi-angle au centre  $\theta$  (figure 4).

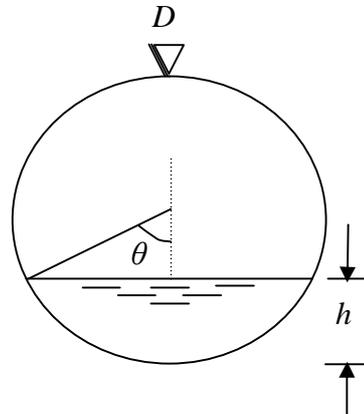


Figure 4: Schéma de définition du profil circulaire

L'aire de la section mouillée  $A$  du segment circulaire, représenté par la figure 4, s'écrit :

$$A = \frac{D^2}{4} (\theta - \sin\theta \cos\theta) \quad (77)$$

$\theta$  exprimé en radians.

Le périmètre mouillé  $P$  du même segment circulaire s'exprime par :

$$P = D\theta \quad (78)$$

Le rayon hydraulique  $R_h = A/P$  est ainsi :

$$R_h = \frac{D^2 (\theta - \sin\theta \cos\theta)}{4 D\theta}$$

$$R_h = \frac{D}{4} \left[ 1 - \frac{\sin\theta \cos\theta}{\theta} \right] \quad (79)$$

Le demi-angle au centre  $\theta$  s'exprime géométriquement à partir de la figure 4 :

$$\theta = \cos^{-1}(1 - 2\xi) \quad (80)$$

où  $\xi = h/D$  est le paramètre de forme du segment circulaire.

La combinaison des équations (77) et (79) permet d'exprimer le facteur de section  $AR_h^{2/3}$ , soit :

$$AR_h^{2/3} = \frac{D^2}{4} (\theta - \sin \theta \cos \theta) \left[ \frac{D}{4} \left( \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{\theta} \right) \right]^{2/3}$$

ou bien

$$AR_h^{2/3} = \frac{D^2 D^{2/3} (\theta - \sin \theta \cos \theta) (\theta - \sin \theta \cos \theta)^{2/3}}{4 \cdot 4^{2/3} \theta^{2/3}}$$

$$AR_h^{2/3} = \frac{D^{8/3} (\theta - \sin \theta \cos \theta)^{5/3}}{4^{5/3} \theta^{2/3}} \quad (81)$$

On peut ainsi définir le facteur de section relatif au diamètre  $D$  de la conduite circulaire, ne dépendant que du demi-angle au centre  $\theta$  et par conséquent du paramètre de forme  $\xi = h/D$ , en écrivant que :

$$\frac{AR_h^{2/3}}{D^{8/3}} = \frac{1}{4^{5/3}} \left[ \frac{(\theta - \sin \theta \cos \theta)^{5/3}}{\theta^{2/3}} \right] \quad (82)$$

Pour le cas d'une conduite circulaire pleine  $\theta = \pi$ , soit ( $\xi = 1$ ), le facteur de section relatif au diamètre  $D$  de la conduite circulaire devient une constante et s'écrit :

$$\frac{AR_h^{2/3}}{D^{8/3}} = \frac{\pi}{4^{5/3}} \quad (83)$$

### II.3.1. Présentation du diagramme de *Moody* :

Pour illustrer l'influence du nombre de *Reynolds*  $R$  d'un écoulement uniforme et par conséquent celle de la viscosité cinématique  $\nu$  du liquide, nous pouvons faire appel au diagramme de *Moody*. Ce diagramme est élaboré pour la conduite en charge de diamètre  $D$  et peut être étendu à l'écoulement à surface libre en substituant  $D$  par  $D_h$ .

Le digramme de *Moody* s'obtient par la représentation graphique de la fonction  $f$  ( $f, R, \varepsilon/D$ ), dans un système de coordonnées à divisions logarithmiques. Ce diagramme est établi en s'appuyant sur la formule de *Colebrook-White* pour diverses valeurs de la rugosité relative  $\varepsilon/D$  ou  $\varepsilon/D_h$ . Ce diagramme est représenté sur la figure 5.

- Dans la zone de pleine turbulence ou zone de l'écoulement turbulent rugueux, le coefficient de frottement  $f$  prend une valeur déterminée pour une rugosité relative  $\varepsilon/D$  donnée. Le nombre de *Reynolds*  $R$  n'a aucune influence sur la variation des caractéristiques hydrauliques du profil liquide considéré.

Le coefficient de frottement  $f$  dans cette zone peut être évalué par la formule de *Nikuradse*

$$\frac{1}{\sqrt{f_r}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/D_r}{3,7} \right]$$

Pour le cas d'un écoulement à surface libre, on peut écrire :

$$\frac{1}{\sqrt{f_r}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/D_{hr}}{3,7} \right] \quad (55)$$

L'indice « r » désigne le domaine rugueux.

- Dans le domaine de transition, le coefficient de frottement  $f$  est fonction du nombre de Reynolds  $R$  et de la rugosité relative  $\varepsilon/D$ . Celui-ci peut être déterminé par application de la relation de *Colebrook-White* :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{R\sqrt{f}} \right] \quad (54)$$

En réalité la formule de *Colebrook-White* est valable aussi bien en régime de transition qu'en régime turbulent rugueux. Pour le régime turbulent rugueux, le nombre de Reynolds  $R$  tend vers l'infini et la relation de *Nikuradse* est reproduite.

- Dans le domaine pratiquement lisse, le coefficient de frottement  $f$  n'est fonction que du nombre de Reynolds  $R$ . le coefficient de frottement  $f$  peut être déduit de la relation (54) de *Colebrook-White* lorsque  $\varepsilon/D$  tend vers zéro. ( $\varepsilon/D \rightarrow 0$ )

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{2,51}{R\sqrt{f}} \right] \quad (56)$$

Pour les cas de l'écoulement en régime de transition et pratiquement lisse, l'évaluation du coefficient de frottement  $f$  nécessite un procédé itératif.

### II.3.2. Calcul du diamètre d'une conduite pleine

Le calcul du diamètre d'une conduite pleine nécessite la combinaison des équations de *Darcy-Weisbach* (1854, 1845) et de continuité  $Q=VA=V\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)$ .

En éliminant la vitesse  $V$  entre ces équations, on obtient :

$$J = \frac{Q^2}{2g \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)^2} \quad (84)$$

L'équation (84) s'écrit aussi :

$$D^5 = f \left( \frac{8Q^2}{\pi^2 g J} \right) \quad (85)$$

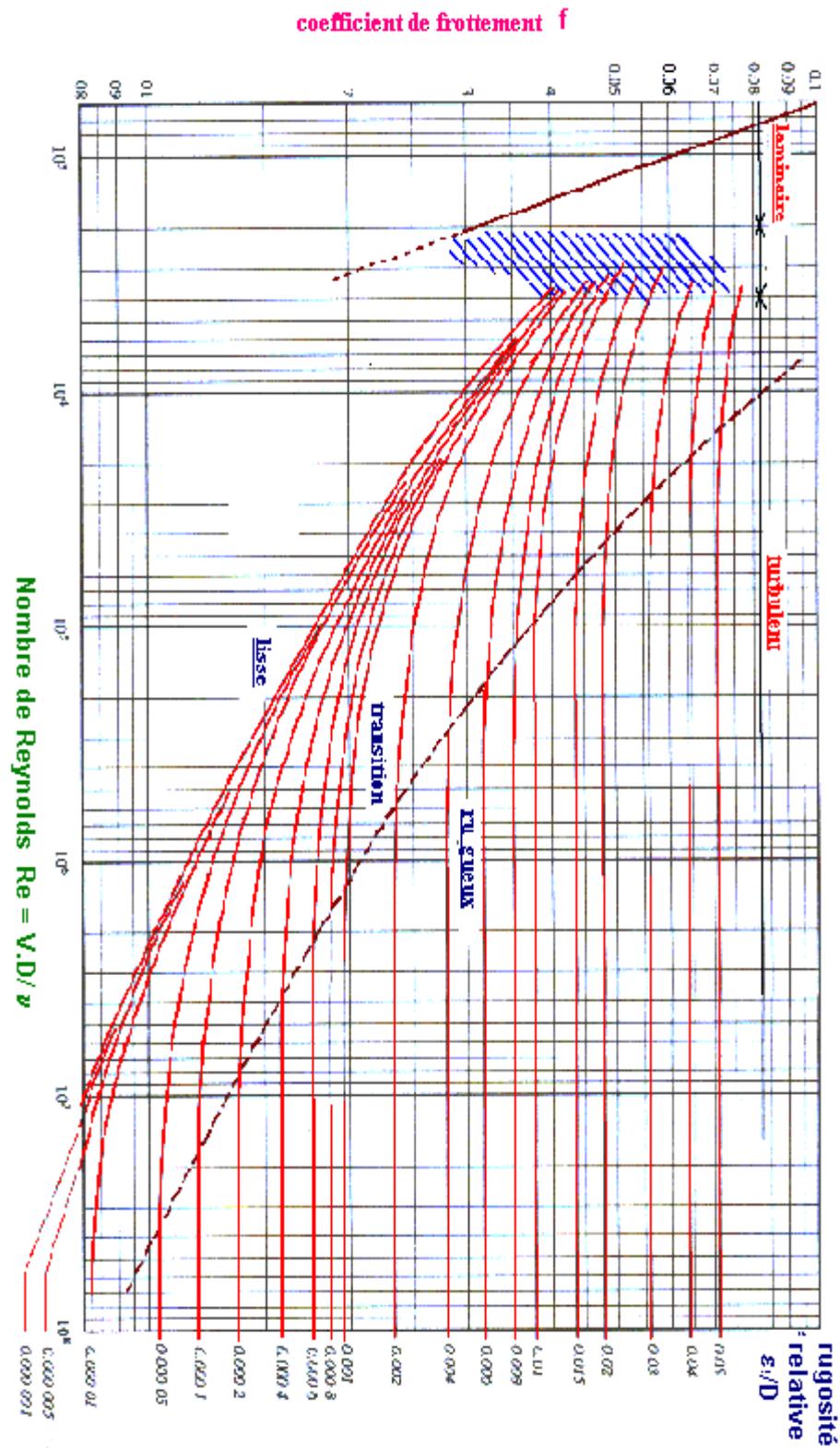


Figure 5 : Diagramme de *Moody*

L'équation (85) peut s'écrire plus simplement :

$$D^5 = c f \quad (86)$$

ou  $c$  est une constante telle que  $\left(\frac{8Q^2}{\pi^2 g J}\right) = c$ .

Le coefficient de frottement  $f$  est évalué par la relation (54).

Le nombre de *Reynolds*  $R$  est exprimé par la relation :

$$R = \frac{VD}{\nu} = \left(\frac{4Q}{\pi v}\right) \frac{1}{D} \quad (87)$$

Pour le même débit et même conduite le terme entre parenthèse est constant  $\left(\frac{4Q}{\pi v}\right) = c'$

L'équation (87) devient :

$$R = c'(1/D) \quad (88)$$

La détermination du diamètre  $D$  est fonction de la nature du régime d'écoulement.

La détermination du diamètre  $D$  pour une conduite pleine, par la relation de *Darcy-Weisbach* (53) nécessite l'utilisation du procédé itératif suivant :

- Dans la relation (53), il y a trois inconnues, notamment  $f$ ,  $V$  et  $D$  ; deux inconnues dans l'équation de continuité notamment  $V$  et  $D$  et deux inconnues dans la relation du nombre de *Reynolds*  $R$ , notamment  $V$  et  $D$ . De plus, la rugosité relative  $\varepsilon/D$  est inconnue.
- Pour le même débit et même conduite, Les quantités  $\left(\frac{8Q^2}{\pi^2 g J}\right) = c$  et  $\left(\frac{4Q}{\pi v}\right) = c'$ , sont connues.

Procédé itératif :

- On choisit une valeur d'essai pour le coefficient de frottement désigné par  $f_1$  comme 1<sup>ère</sup> estimation.
- Par application de (86) et (88), on obtient les valeurs de :

$$D_1 = (c f_1)^{1/5}$$

$$R_1 = c'/D_1 \text{ et } \varepsilon/D_1$$

- A partir du diagramme de *Moody* avec  $(R_1, \varepsilon/D_1)$  on obtient graphiquement  $f_2$ . La nouvelle valeur de  $f_2$  est contrôlée en utilisant la dernière valeur d'essai  $f_1$ . Si la valeur admise pour le coefficient de frottement est satisfaisante, on arrête les itérations. Dans le cas contraire, une nouvelle itération est nécessaire. Dans ce cas, on procède comme suit :
- Puisque le coefficient de frottement  $f$  ne varie que lentement avec le nombre de *Reynolds*  $R$ . Choisissons donc  $f_2$  comme deuxième estimation.

- Par application de (86) et (88), on obtient les valeurs pour :

$$D_2 = (cf_2)^{1/5}$$

$$R_2 = c'/D_2 \quad \text{et} \quad \varepsilon/D_2$$

- A partir du diagramme de *Moody* avec  $(R_2, \varepsilon/D_2)$  on obtient graphiquement  $f_3$ .
- La nouvelle valeur de  $f_3$  est contrôlée en utilisant la dernière valeur d'essai  $f_2$ . Si  $f_3 = f_2$ , la convergence étant atteinte, le calcul itératif s'arrête. Si  $f_3 \neq f_2$ ; il faut suivre les itérations jusqu'à ce que  $f_n = f_{n-1}$ .
- La dernière valeur de  $D$  est donc retenue comme réponse.

### II.3.3. Exemple d'application

Soit à déterminer le diamètre d'une conduite, de rugosité absolue  $\varepsilon = 0,05$  mm, utilisée pour transporter 250 l/s d'eau dont la viscosité cinématique est  $\nu = 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, sur une distance de 10 km, avec une perte de charge de 25 m.

Le diamètre de la conduite sera obtenu par une procédure itérative.

$$c = \frac{8 \times 10000 \times (0,25)^2}{\pi^2 \times 9,81 \times 25} = 2,06 \qquad c' = \frac{4 \times 0,25}{\pi \times 9,10^{-6}} = 3,54 \cdot 10^4$$

1<sup>ère</sup> itération :

1. Choisissons  $f_1 = 0,018$  comme première estimation. On choisi en général des valeurs autour de  $f = 0,02$  comme valeur de départ.
2. par application de la relation (86)  $\Rightarrow D_1^5 = 2,06 \times 0,018$  et l'on obtient  $D_1 = 0,515$  m
3. par application de la relation (87)  $\Rightarrow R_1 = \frac{3,54 \cdot 10^4}{0,515}$  et l'on obtient :  $R_1 = 6,87 \cdot 10^4$
4. On calcule également la rugosité relative :  $\frac{\varepsilon}{D_1} = 0,97 \cdot 10^{-4}$
5. A partir du diagramme de *Moody* avec  $(R_1, \varepsilon/D_1)$ , on obtient graphiquement :  $f_2 = 0,0195$ . on voit que  $f_2 \neq f_1$ ; la valeur admise pour le coefficient de frottement n'est pas encore satisfaisante. Une nouvelle itération est par conséquent nécessaire.

2<sup>ème</sup> itération :

On suit la même démarche que pour la première itération :

1. Puisque  $f$  ne varie que lentement avec  $R_1$ , choisissons donc  $f_2$  comme deuxième estimation.
2. par application de la relation (86)  $D_2^5 = 2,06 \times 0,0195 \Rightarrow D_2 = 0,526$  m.
3. par application de la relation (87)  $R_2 = \frac{3,54 \cdot 10^4}{0,526} \Rightarrow R_2 = 6,73 \cdot 10^4$

4.  $\frac{\varepsilon}{D_2} = 0,95 \cdot 10^{-4}$
5. A partir du diagramme de *Moody* avec  $(R_2, \varepsilon/D_2)$ , on obtient graphiquement  $f_3 = 0,0195$ . on voit que  $f_3 = f_2$  ; la valeur admise pour le coefficient de frottement au début de cette deuxième itération est donc satisfaisante. La convergence étant atteinte, le calcul itératif s'arrête.

On en conclut qu'une conduite de diamètre  $D_2 = 526$  mm convient pour transporter l'eau dans les conditions précisées ci-dessus. On prendra une conduite de diamètre normalisé  $D = 550$  mm.

#### II.4. Conclusion

La conductivité d'un canal  $K = \frac{Q}{\sqrt{J}}$  est définie comme étant la capacité d'évacuation de celui-ci. L'application de la formule de *Manning* (1891) montre que  $K$  est inversement proportionnel au coefficient  $n$  de *Manning*, proportionnel à l'aire de la section mouillée et proportionnel à la puissance 2/3 du rayon hydraulique.

Le facteur de section correspond au produit  $AR_h^{2/3}$  et il est proportionnel au coefficient  $n$  de *Manning* et à la conductivité  $K$  du canal.

L'application au cas de la conduite circulaire partiellement occupée par l'écoulement montre que le facteur de section est étroitement lié au diamètre  $D$  de la conduite ainsi qu'au paramètre de forme  $\xi = h_N/D$  de l'écoulement, où  $h_N$  est la profondeur de l'écoulement uniforme ou profondeur normale. Celle-ci doit être évaluée par un procédé itératif.

Le chapitre précédent a montré que les formules habituellement utilisées pour l'écoulement uniforme, telle que celle de *Manning-Strickler* (1891, 1923), ne tiennent pas compte de l'effet de la viscosité et par conséquent de celui du nombre de *Reynolds*. Leur emploi est donc réservé exclusivement aux écoulements uniformes en régime turbulent rugueux.

En ce qui concerne le calcul de l'écoulement uniforme en régime de transition et pratiquement lisse, notre choix s'est porté sur l'utilisation de la formule de *Darcy-Weisbach* (1854, 1845) où l'effet de la viscosité est pris en compte à travers le nombre de *Reynolds*

$$R = \frac{VD_h}{\nu}$$

Le coefficient de frottement  $f$  figurant dans la relation de *Darcy-Weisbach* peut être déterminé par application de la formule de *Colebrook-White*. Dans cette relation,  $f$  dépend de la rugosité relative et du nombre de *Reynolds*. L'évaluation de  $f$  nécessite cependant un procédé itératif, mais cette contrainte est levée en utilisant la formule de *Achour* (1997).

Le chapitre précédent s'est achevé par une application numérique de la formule de *Darcy-Weisbach* au calcul de diamètre  $D$  d'une conduite circulaire entièrement occupée par l'écoulement.

Dans le chapitre suivant, la méthode dite *Larhyss* (2002) sera présentée.

## METHODE DITE LARHYSS

### III.1 Introduction

La méthode dite LARHYSS représente une approche théorique rigoureuse visant à définir la relation fonctionnelle de la dimension linéaire d'une conduite circulaire, en particulier son diamètre. La fonction des six variables régissant l'écoulement uniforme est transformée en un produit de trois fonctions dépendant chacune de deux paramètres, parfois composés. Cette approche simple a permis d'aboutir à une formulation mathématique de la dimension linéaire recherchée, applicable à tous les régimes d'écoulement. Ceci a été rendu possible par la combinaison des relations de *Manning-Strickler* et de *Darcy-Weisbach*.

L'influence de la nature du régime d'écoulement sur la dimension linéaire de la conduite est mise en évidence par l'introduction de facteurs correctifs. Ce facteur est égal à l'unité lorsque l'écoulement est en régime turbulent rugueux. Lorsque l'écoulement est en régime de transition, ce facteur dépend à la fois du nombre de *Reynolds* ainsi que de la rugosité relative de la conduite considérée. Par contre, le facteur de correction ne dépend que du nombre de *Reynolds* lorsque l'écoulement est en régime pratiquement lisse.

A la fin de ce chapitre une approche expérimentale, visant à étayer les relations théorique établies, est exposée. Cette approche est établie par un protocole expérimental qui a été entièrement conçu et réalisé par le laboratoire LARHYSS.

### III.2 Calcul de l'écoulement uniforme dans le régime turbulent rugueux

#### III.2.1 Transformation de la formule de *Manning-Strickler*

En régime d'écoulement turbulent rugueux, la dimension linéaire d'un profil liquide ou géométrique d'une forme quelconque peut être déduite de la transformation de l'équation de *Manning-Strickler*. Celle-ci s'écrit :

$$V = kR_h^{2/3}\sqrt{J} \quad (10)$$

Où  $V$  est la vitesse moyenne de l'écoulement,  $k$  est le coefficient de *Strickler*,  $R_h$  est le rayon hydraulique et  $J$  est le gradient de perte de charge correspondant également à la pente du canal considéré puisque l'écoulement est uniforme. En tenant compte du fait que  $V=Q/A$  et  $R_h=A/P$ , où  $A$  et  $P$  désignent respectivement l'aire de section mouillée et le périmètre mouillé, la relation (10) de *Manning-Strickler* devient :

$$Q = k \frac{A^{2/3}}{P^{2/3}} A \sqrt{J} = k \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} \sqrt{J}$$

En tenant compte de la relation (14), l'équation précédente s'écrit :

$$\frac{Q \varepsilon^{1/6}}{8,2\sqrt{gJ}} = \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} \quad (89)$$

$A$  et  $P$  dépendent de la dimension linéaire  $a$  et l'on peut écrire quelle que soit la forme du profil géométrique :

$$A = a^2 A_1 \quad (90)$$

et

$$P = a P_1 \quad (91)$$

Les paramètres  $A_1$  et  $P_1$  sont adimensionnels et correspondent respectivement à l'aire de la section mouillée et au périmètre mouillé lorsque  $a$  est égale à l'unité. En tenant compte de ces considérations, la relation (89) devient :

soit :

$$a_r = \left[ \frac{Q \varepsilon^{1/6}}{8,2\sqrt{gJ}} \right]^{3/8} \frac{P_1^{1/4}}{A_1^{5/8}} \quad (92)$$

L'indice  $r$  désigne le domaine rugueux.

Ainsi, en posant :

$$\Lambda = \left[ \frac{Q \varepsilon^{1/6}}{8,2\sqrt{gJ}} \right] \quad (93)$$

$$a_0 = \frac{P_1^{1/4}}{A_1^{5/8}} \quad (94)$$

La relation (92) s'écrit simplement :

$$a_r = \Lambda a_0 \quad (95)$$

La relation (95) montre que toute dimension linéaire  $a_r$  s'exprime, dans le domaine rugueux, par le produit de deux fonctions  $\Lambda$  et  $a_0$ . La fonction  $\Lambda$  dépend de  $Q$ ,  $J$  et  $\varepsilon$ , mais ne dépend pas de la forme géométrique. On notera que  $\Lambda$  a la dimension d'une longueur donc c'est une longueur fluïdodynamique.

Le paramètre sans dimension  $a_0$  dépend exclusivement du profil liquide de l'écoulement, c'est à dire du paramètre de forme.

### III.2.2 Application à la conduite circulaire

Pour une conduite circulaire de diamètre  $D_r$ , la dimension linéaire recherchée est le diamètre ( $a_r = D_r$ ).

Dans le cas d'un régime turbulent rugueux, l'équation (95) permet d'écrire :

$$D_r = \Lambda D_0 \quad (96)$$

L'aire de la section mouillée est  $A_r = D_r^2 A_1$  et le périmètre mouillé est  $P_r = D_r P_1$ ,  $A_1$  et  $P_1$  s'écrivent respectivement:

$$A_r = \frac{D_r^2}{4} (\theta_r - \sin \theta_r \cos \theta_r) \quad (97)$$

$$P_r = D_r \theta_r \quad (98)$$

Ainsi, en posant :

$$A_1 = (\theta_r - \sin \theta_r \cos \theta_r) / 4 \quad (99)$$

et

$$P_1 = \theta_r \quad (100)$$

où  $\theta_r$  est le demi-angle au centre, exprimé en radian, du segment circulaire de hauteur  $h_r$  (figure 4) et tel que :

$$\cos \theta_r = \frac{\frac{D_r}{2} - h_r}{D_r/2} = 1 - \frac{2h_r}{D_r}$$

Sachant que le paramètre de forme  $\xi = h_r/D_r$ , on peut écrire que :

$$\theta_r = \cos^{-1}(1 - 2\xi) \quad (101)$$

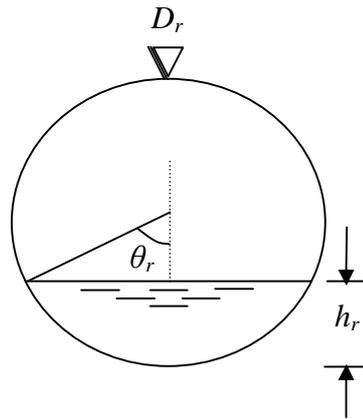


Figure 6: Schéma de définition des caractéristiques du profil circulaire en régime turbulent rugueux

Il apparaît ainsi que la relation (94) s'écrit :

$$a_0 = D_0 = \frac{P_1^{1/4}}{A_1^{5/8}}$$

soit :

$$D_0 = \frac{\theta_r^{1/4}}{[(\theta_r - \cos \theta_r \sin \theta_r) / 4]^{5/8}} \quad (102)$$

$D_0$  ne dépend que du paramètre de forme  $\xi$ .

En vertu des relations (93) et (102), la relation (96) s'écrit :

$$D_r = \left[ \frac{Q \varepsilon^{1/6}}{8,2 \sqrt{gJ}} \right]^{3/8} \frac{4^{5/8} \theta_r^{1/4}}{(\theta_r - \cos \theta_r \sin \theta_r)^{5/8}}$$

ou bien :

$$D_r = 1,08 \left[ \frac{Q \varepsilon^{1/6}}{\sqrt{gJ}} \right]^{3/8} \frac{\theta_r^{1/4}}{(\theta_r - \sin \theta_r \cos \theta_r)^{5/8}} \quad (103)$$

La relation (103) permet le calcul explicite du diamètre  $D_r$  dans le domaine turbulent rugueux à partir des valeurs connues de  $Q$ ,  $J$ ,  $\varepsilon$  et  $\zeta$ .

Si la hauteur d'eau  $h_r$  est la dimension linéaire recherchée ( $a=h_r$ ), la relation (103) permet d'écrire, en considérant que  $h_r = \xi D_r$  :

$$h_r = 1,08 \left[ \frac{Q \varepsilon^{1/6}}{\sqrt{gJ}} \right]^{3/8} \frac{\xi \theta_r^{1/4}}{(\theta_r - \sin \theta_r \cos \theta_r)^{5/8}} \quad (104)$$

Les relations (103) et (104) ne sont pas pratiques à appliquer lorsqu'il s'agit d'évaluer  $\zeta$ . Elles peuvent être remplacées avec une excellente approximation par l'équation :

$$\left[ \frac{8}{5} \sin(90^\circ \xi) \right]^2 = \frac{q_r}{\sqrt{J}} \left( \frac{\varepsilon}{D_r} \right)^{1/6} \quad (105)$$

où,  $q_r = Q/\sqrt{gD_r^5}$  est le débit relatif et  $q_r/\sqrt{J}$  est la conductivité relative de la conduite.

Pour le cas particulier de la conduite circulaire pleine caractérisée par  $\zeta = 1$ , la relation (103) permet d'écrire :

$$D_r = 0,703 \left[ \frac{Q \varepsilon^{1/6}}{\sqrt{gJ}} \right]^{3/8} \quad (106)$$

La relation approchée (105) conduit au même résultat pour  $\zeta = 1$ .

Pour le régime turbulent rugueux, on peut établir des relations généralisées pour l'évaluation du nombre de Reynolds  $R_r$ , du diamètre hydraulique  $D_{hr}$  et de la vitesse moyenne de l'écoulement  $V_r$ .

Par définition, le nombre de Reynolds  $R_r$  dans le régime turbulent rugueux s'écrit :

$$R_r = \frac{V_r D_{hr}}{\nu} \quad (107)$$

Où  $D_{hr} = 4A_r/P_r$  est le diamètre hydraulique en régime turbulent rugueux et  $\nu$  est la viscosité cinématique du liquide. En tenant compte du fait que  $V = Q/A_r$ , la relation (107) devient :

$$R_r = \frac{4Q}{P_r \nu} \quad (108)$$

Or, selon la relation (95), le périmètre mouillé s'écrit  $P_r = \Lambda P_0$ . La relation (108) conduit quelle que soit la forme géométrique considérée, à :

$$R_r = \frac{4Q}{\Lambda P_0 \nu} = \frac{4Q}{\Lambda a_0 \nu}$$

ou bien, en vertu de (93) et (94) :

$$R_r = \frac{4Q}{\Lambda v} \left[ \frac{\sqrt{A_1}}{P_1} \right]^{5/4} \quad (109)$$

Soit :

$$R_r = \frac{4(8,2)^{3/8}}{v} \left[ \frac{Q^{5/3} \sqrt{gJ}}{\varepsilon^{1/6}} \right]^{3/8} \left[ \frac{\sqrt{A_1}}{P} \right]^{5/4} \quad (110)$$

Il apparaît que le nombre de *Reynolds*  $R_r$  est une fonction du débit volume  $Q$ , du gradient de la perte de charge  $J$ , de la rugosité absolue, de la viscosité cinématique du liquide  $\nu$  et du paramètre de forme contenu dans les paramètres  $A_1$  et  $P_1$ . Cette expression du nombre de *Reynolds* est applicable pour tout profil géométrique, lorsque l'écoulement est en régime turbulent rugueux.

En appliquant la relation (II-24) à la conduite circulaire, le nombre de *Reynolds* devient :

ou bien

$$R_r = \frac{3,70}{v} \left[ \frac{Q^{5/3} \sqrt{gJ}}{\varepsilon^{1/6}} \right]^{3/8} \left[ \frac{\sqrt{\theta_r - \sin\theta_r \cos\theta_r}}{\theta_r} \right]^{5/4} \quad (111)$$

Pour le cas particulier de la conduite circulaire pleine ( $\theta_r = \pi$ ), la relation (111) devient :

$$R_r = \frac{1,81}{v} \left[ \frac{Q^{5/3} \sqrt{gJ}}{\varepsilon^{1/6}} \right]^{3/8} \quad (112)$$

Le diamètre hydraulique  $D_{hr}$  dans le cas d'un régime turbulent rugueux s'écrit, en tenant compte des relations (90), (91) et (95) :

$$D_{hr} = 4 \frac{A_r}{P_r} = \frac{4a_r^2 A_1}{a_r P} = 4a_r \frac{A_1}{P} \quad (113)$$

Ou bien :

$$D_{hr} = 4\Lambda a_0 \frac{A_1}{P} \quad (114)$$

Finalement le diamètre hydraulique  $D_{hr}$  en régime turbulent rugueux s'écrira :

$$D_{hr} = 4\Lambda \left[ \frac{\sqrt{A_1}}{P_1} \right]^{3/4} \quad (115)$$

La relation (115) permet d'écrire, en tenant compte de (95) :

$$D_{hr} = 4 \left( \frac{\sqrt{A_1}}{P} \right)^{3/4} \quad (116)$$

La relation (115) peut se mettre sous la forme suivante :

Ou bien :

$$D_{hr} = \frac{4}{(8,2)^{3/8}} \left[ \frac{Q \varepsilon^{1/6}}{\sqrt{gJ}} \right]^{3/8} \left[ \frac{\sqrt{A_1}}{P} \right]^{3/4} \quad (117)$$

La relation (117) est applicable à tout profil géométrique connu dans le cas d'un écoulement en régime turbulent rugueux.

Par application de la relation (117) à une conduite circulaire, le diamètre hydraulique  $D_{hr}$  en régime turbulent rugueux, s'écrit :

$$D_{hr} = 1,08 \left[ \frac{Q\varepsilon^{1/6}}{\sqrt{gJ}} \right]^{3/8} \left[ \frac{\sqrt{\theta_r - \sin\theta_r \cos\theta_r}}{\theta_r} \right]^{3/4} \quad (118)$$

Pour le cas particulier de la conduite circulaire pleine, lorsque l'écoulement est en régime turbulent rugueux, la relation (118) conduit à la relation (106):

$$D_r = 0,703 \left[ \frac{Q\varepsilon^{1/6}}{\sqrt{gJ}} \right]^{3/8} \quad (106)$$

La vitesse moyenne d'écoulement  $V_r$  peut être évaluée, en s'appuyant sur les relations (110) et (117).

$$V_r = \left[ \frac{(8,2)^2 Q^{1/3} \sqrt{gJ}}{\varepsilon^{1/6}} \right]^{3/4} \frac{A_1^{1/4}}{\sqrt{R}} \quad (119)$$

La relation (119) est généralisée à tout profil géométrique pour le cas d'un écoulement en régime turbulent rugueux. Pour le cas d'une conduite circulaire pleine ( $\theta_r = \pi$ ), la relation (119) devient :

$$V_r = \left( \frac{\pi^3}{4} \right)^{1/4} \left[ \frac{(8,2)^2 Q^{1/3} \sqrt{gJ}}{\varepsilon^{1/6}} \right]^{3/4} \quad (120)$$

### III.3 Calcul de la dimension linéaire dans le domaine de transition

Dans le domaine de transition, la dimension linéaire  $a$  dépend fortement de l'influence du nombre de *Reynolds*  $R$ . La démarche théorique consiste à corriger la dimension linéaire  $a_r$ , calculée selon la relation (95) obtenue dans l'hypothèse d'un régime turbulent rugueux, par un coefficient  $\lambda$  dit facteur de transition. La relation (95) devrait s'écrire :

$$a = \lambda \Lambda a_o = \lambda a_r \quad (121)$$

Lorsque le domaine est rugueux,  $\lambda = 1$  et lorsque le domaine est de transition,  $\lambda > 1$ . Le facteur  $\lambda$  dépend à la fois de la valeur du nombre de *Reynolds*  $R$  ainsi que de celle de la rugosité relative  $\varepsilon/D_h$ . Afin d'exprimer le facteur de transition  $\lambda$ , il faut faire appel à l'équation (53) de *Darcy-Weisbach* :

$$J = \frac{f}{D_h} \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (53)$$

L'aire de la section mouillée peut s'écrire en tenant compte (121) :

$$A = \lambda^2 \Lambda^2 a_0^2 A_1 \quad (122)$$

Selon la relation (121), le diamètre hydraulique  $D_h$  peut donc s'écrire dans le cas du régime de transition :

$$D_h = \lambda \Lambda D_{ho} \quad (123)$$

En tenant compte de ces considérations, la relation (53) de *Darcy-Weisbach* devient :

$$J = \frac{f}{\lambda \Lambda D_{ho}} \frac{Q^2}{2g(\lambda \cdot \Lambda^2 A_0)} = \frac{f Q^2}{2g \lambda^5 \Lambda^5 A_0^2 D_{ho}}$$

Soit

$$\lambda \Lambda = f^{1/5} \sqrt[5]{\frac{Q^2}{2g A_0^2 D_{ho} J}} \quad (124)$$

Le coefficient de frottement  $f$  dans la relation (124), s'obtient par application de l'équation de *Colebrook-White* en régime de transition, en se basant sur un procédé itératif, ou par application de la formule explicite de *Achour* (57):

$$f^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} + \frac{4,5}{R} \log \frac{R}{6,97} \right] \quad (57)$$

Si l'on considère le même profil géométrique qui véhicule le même débit  $Q$  sous un même gradient de perte de charge  $J$  d'un écoulement en régime turbulent rugueux, la relation (124) s'écrit, avec  $\lambda = 1$  et  $f = f_r$  :

$$\Lambda = f_r^{1/5} \sqrt[5]{\frac{Q^2}{2g A_0^2 D_{ho} J}} \quad (124)$$

Le rapport entre les relations (124) et (125) conduit à :

$$\lambda = \left( \frac{f}{f_r} \right)^{1/5} \quad (126)$$

Ainsi, dans le domaine de transition, la dimension linéaire  $a$  s'écrit en vertu des relations (121) et (126):

$$a = \left( \frac{f}{f_r} \right)^{1/5} a_r \quad (127)$$

$a_r$  est la dimension linéaire dans le domaine rugueux.

Par contre, le coefficient de frottement  $f_r$  peut être évalué de manière explicite par application de la formule de *Nikuradse* (55) :

$$f_r^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} \right] \quad (55)$$

Dans la relation (57), le nombre de *Reynolds*  $R$  est :

$$R = \frac{4Q}{\lambda P_{rv}} = \frac{1}{\lambda} R_r$$

Ainsi :

$$R = \frac{R_r}{\lambda} \quad (128)$$

où  $R_r$  est le nombre de *Reynolds* en régime turbulent rugueux défini par (110).

De même, le diamètre hydraulique  $D_h$  selon la relation (121) est  $D_h = \lambda D_{hr}$ . Ainsi la relation (57) devient en tenant compte de (128) :

$$f^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/D_{hr}}{3,7\lambda} + \frac{4,5\lambda}{R_r} \log \frac{R_r}{6,97\lambda} \right] \quad (129)$$

Étant donné que, selon la relation (126),  $\lambda$  est fonction du coefficient de frottement, l'évaluation de  $\lambda$  nécessite a priori un procédé itératif dont le principe est le suivant :

$$f_1^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/D_{hr}}{3,7\lambda_0} + \frac{4,5\lambda_0}{R_r} \log \frac{R_r}{6,97\lambda_0} \right], \quad \lambda_0 = 1$$

$$f_2^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/D_{hr}}{3,7\lambda_1} + \frac{4,5\lambda_1}{R_r} \log \frac{R_r}{6,97\lambda_1} \right], \quad \lambda_1 = \left( \frac{f_1}{f_r} \right)^{1/5}$$

.....

$$f_3^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/D_{hr}}{3,7\lambda_2} + \frac{4,5\lambda_2}{R_r} \log \frac{R_r}{6,97\lambda_2} \right], \quad \lambda_2 = \left( \frac{f_2}{f_r} \right)^{1/5}, i=1,2,\dots,n$$

Il faut noter que ce procédé itératif n'est pas nécessaire, puisque il est aisé de montrer que  $(\lambda_3 - \lambda_1) \leq 0,01\lambda_1$ . Ainsi, l'erreur relative commise sur l'évaluation de  $\lambda$ , en application de la relation (126) et pour  $f = f_1$ , ne dépasse pas 1%.

Le nombre de *Reynolds*  $R_r$  et le diamètre hydraulique  $D_{hr}$  sont déterminés de manière explicite par les relations (110) et (117), en régime turbulent rugueux.

D'une manière générale, la dimension linéaire  $a$  en régime de transition, s'écrit selon (121)

$$a = \left[ \frac{\log \left( \frac{\varepsilon/D_{hr}}{3,7} + \frac{4,5}{R_r} \log \frac{R_r}{6,97} \right)}{\log \left( \frac{\varepsilon/D_{hr}}{3,7} \right)} \right]^{-2/5} \left[ \frac{Q\varepsilon^{1/6}}{8,2\sqrt{gJ}} \right]^{3/8} \left[ \frac{R}{\sqrt{A_1^5}} \right]^{1/4} \quad (130)$$

L'équation (130) permet le calcul explicite de la dimension linéaire  $a$  de tout profil géométrique connu, lorsque l'écoulement est en régime de transition ( $\lambda > 1$ ) ou turbulent rugueux ( $\lambda = 1$ ).

Lorsque c'est le diamètre  $D$  de la conduite qui est recherché, la dimension linéaire  $a = D$ , la relation (127) devient en tenant compte de (103) :

$$D = 1,08 \left( \frac{f}{f_r} \right)^{1/5} \left( \frac{Q\varepsilon^{1/6}}{\sqrt{gJ}} \right)^{3/8} \frac{\theta^{1/4}}{(\theta - \sin\theta \cos\theta)^{5/8}} \quad (131)$$

La relation (131) permet à la fois le calcul du diamètre de la conduite circulaire dans les domaines de transition et turbulent rugueux ( $f \rightarrow f_r$ ), lorsque cette conduite est partiellement ou entièrement occupée par le liquide.

Pour le cas particulier de la conduite circulaire pleine caractérisée par  $\xi=1$  ou  $\theta = \pi$ , la relation (131) devient :

$$D=0,703\left(\frac{f}{f_r}\right)^{1/5}\left(\frac{Q\varepsilon^{1/6}}{\sqrt{gJ}}\right)^{3/8} \quad (132)$$

### III.4 Domaine pratiquement lisse

Dans le domaine pratiquement lisse, caractérisé par une rugosité absolue  $\varepsilon \rightarrow 0$ , la valeur de la dimension linéaire  $a_r$  obtenue dans le domaine rugueux, doit être corrigé par un coefficient  $\psi$  analogue au coefficient de transition  $\lambda$ . La dimension linéaire recherchée s'écrit :

$$a = \psi \Lambda a_0 = \psi a_r \quad (133)$$

L'expression de  $\psi$  s'obtient de la même manière que celle ayant conduit à  $\lambda$ .

En faisant appel à la formule (53) de *Darcy-Weisbach* :

$$J = \frac{f}{D_h} \frac{Q^2}{2gA^2}$$

Où  $f$  est le coefficient de frottement en régime pratiquement lisse. L'aire de la section mouillée est  $A = \psi^2 \Lambda^2 A_0$  et le diamètre hydraulique est  $D_h = \psi \Lambda D_{h0}$

En tenant compte de ces considérations, la relation (53) de *Darcy-Weisbach* devient :

$$J = \frac{f}{\psi \Lambda D_{h0}} \frac{Q^2}{2g \psi^4 \Lambda^4 A_0^2}$$

$$\psi \Lambda = f^{1/5} \sqrt[5]{\frac{Q^2}{2g D_{h0} J}} \quad (134)$$

Dans le domaine rugueux, la relation, (134) s'écrit, avec  $\psi=1$  et  $f=f_r$  :

$$\Lambda = f_r^{1/5} \sqrt[5]{\frac{Q^2}{2g D_{h0} J}} \quad (135)$$

En faisant le rapport entre les relations (134) et (135), on obtient :

$$\psi = \left(\frac{f}{f_r}\right)^{1/5} \quad (136)$$

Cependant, le coefficient de frottement  $f_r$  calculé en application de la formule de *Nikuradse* n'a pas de sens puisque  $\varepsilon \rightarrow 0$ . Afin de lever cette difficulté, il faut considérer une conduite hypothétique de même conductivité que la conduite réelle et caractérisée par une rugosité relative

$\varepsilon_r/D_{hr}=8,5.10^{-3}$  dans le domaine rugueux. Pour cette conduite hypothétique, le coefficient de frottement  $f_r$  selon *Nikuradse* est alors :

$$f_r = 0,0359 \quad (137)$$

La relation (136) devient:

$$\psi = 1,945 f^{1/5} \quad (138)$$

Le coefficient de frottement  $f$  se calcule pour  $\varepsilon/D_h=0$ , selon la relation (59), avec une erreur inférieure à 0,6% par rapport à la valeur obtenue selon *Colebrook-White* et pour  $R \geq 2350$ .

$$f^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{4,5}{R} \log \frac{R}{6,97} \right]$$

La relation (138) peut être remplacée par l'équation suivante, obtenue avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,9999$  :

$$\psi = \left( \frac{3,673}{\log R} \right)^{0,478}, \quad R \geq 2350 \quad (139)$$

Comme dans le cas du domaine de transition, le nombre de *Reynolds* figurant dans la relation (II-62) s'écrit  $R=R_r/\psi$ , cette relation devient :

$$\psi = \left[ \frac{3,673}{\log(R_r/\psi)} \right]^{0,478} \quad (140)$$

Le coefficient  $\psi$  est ainsi évalué par itération de la manière suivante

$$\psi_1 = \left[ \frac{3,673}{\log(R_r/\psi_0)} \right]^{0,478} \quad \text{avec } \psi_0 = 1,$$

$$\psi_2 = \left[ \frac{3,673}{\log(R_r/\psi_1)} \right]^{0,478}$$

.....

$$\psi_i = \left[ \frac{3,673}{\log(R_r/\psi_{i-1})} \right]^{0,478}$$

Il est aisé de constater que ce procédé itératif n'était pas nécessaire puisque :

$$(\psi_1 - \psi_3) < 0,01 \psi_1$$

La valeur recherchée de  $\psi$  peut donc être déterminée, avec une excellente approximation, par la relation :

$$\psi = \left( \frac{3,673}{\log R_r} \right)^{0,478} \quad (141)$$

Rappelons que le nombre de *Reynolds*  $R_r$  et le diamètre hydraulique, dans le domaine rugueux, s'écrivent :

$$R_r = \frac{4(8,2)^{3/8}}{\nu} \left[ \frac{Q^{5/3} \sqrt{gJ}}{\varepsilon^{1/6}} \right]^{3/8} \left[ \frac{\sqrt{A_1}}{R} \right]^{5/4} \quad (110)$$

$$D_{hr} = \frac{4}{(8,2)^{3/8}} \left[ \frac{Q \varepsilon^{1/6}}{\sqrt{gJ}} \right]^{3/8} \left[ \frac{\sqrt{A_1}}{R} \right]^{3/4} \quad (117)$$

Le nombre de *Reynolds*  $R_r$ , représente le nombre de *Reynolds* qui caractérise l'écoulement en régime turbulent rugueux dans la conduite hypothétique, de rugosité relative  $\varepsilon_r/D_{hr}=8,5 \cdot 10^{-3}$ .

Remplaçons dans (117), la rugosité absolue par  $\varepsilon_r=8,5 \cdot 10^{-3} \cdot D_{hr}$ , on obtient ainsi :

$$D_{hr} = C_0^{16/15} \left[ \frac{Q}{\sqrt{gJ}} \right]^{2/5} \left[ \frac{\sqrt{A_1}}{R} \right]^{4/5} \quad (142)$$

Avec :

$$C_0 = \frac{4(8,5 \cdot 10^{-3})^{1/16}}{(8,2)^{3/8}}$$

$D_{hr}$  est le diamètre hydraulique de la conduite hypothétique en régime turbulent rugueux, pour une rugosité relative  $\varepsilon_r/D_{hr}=8,5 \cdot 10^{-3}$ .

Revenons à la relation (110) et remplaçons la rugosité absolue par  $\varepsilon_r=8,5 \cdot 10^{-3} D_{hr}$ , la relation (110) devient :

$$R_r = \frac{11,63}{\nu} (Q^3 gJ)^{1/5} \left[ \frac{\sqrt{A_1}}{R} \right]^{6/5} \quad (143)$$

Il est intéressant de noter que, pour la conduite hypothétique circulaire partiellement remplie de rugosité relative  $\varepsilon/D_{hr}=8,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $A_1 = \frac{1}{4}(\theta - \cos\theta \sin\theta)$  et  $R = \theta$ , la relation (143) conduit à :

$$R_r = 5 \frac{(gJQ^3)^{1/5}}{\nu} \left( \frac{\sqrt{\theta - \sin\theta \cos\theta}}{\theta} \right)^{6/5} \quad (144)$$

Le diamètre hydraulique pour la même conduite est, selon (142) :

$$D_{hr} \approx \frac{4}{5} \left[ \frac{Q}{\sqrt{gJ}} \right]^{2/5} \left( \frac{\sqrt{\theta - \sin\theta \cos\theta}}{\theta} \right)^{4/5} \quad (145)$$

Soit :

$$D_r = \frac{4}{5} \left[ \frac{Q}{\sqrt{gJ}} \right]^{2/5} \frac{\theta^{1/5}}{(\theta - \sin \theta \cos \theta)^{3/5}} \quad (146)$$

Pour le cas particulier de la conduite hypothétique pleine pour laquelle  $\theta = \pi$ , les relations (144) et (146) conduisent respectivement à :

$$R_r = \frac{5}{2} \frac{(gJQ^3)^{1/5}}{\nu} \quad (147)$$

$$D_r \approx \frac{1}{2} \left[ \frac{Q}{\sqrt{gJ}} \right]^{2/5} \quad (148)$$

Lorsque c'est le diamètre  $D$  de la conduite qui est recherché ( $a = D$ ), la relation  $D = \psi D_r$  devient, en tenant compte de (141) et (146) :

$$D = \frac{4}{5} \left( \frac{3,673}{\log R_r} \right)^{0,478} \left( \frac{Q}{\sqrt{gJ}} \right)^{2/5} \frac{\theta^{1/5}}{(\theta - \sin \theta \cos \theta)^{3/5}} \quad (149)$$

Le nombre de Reynolds  $R_r$  est exprimé par la relation (143).

Dans le cas particulier de la conduite circulaire pleine ( $\theta = \pi$ ), la relation (149) devient :

$$D = \frac{1}{2} \left( \frac{3,673}{\log R_r} \right)^{0,478} \left( \frac{Q}{\sqrt{gJ}} \right)^{2/5} \quad (150)$$

où  $R_r$  se calcule sans difficulté en application de la relation (147). Les formules (149) et (150) permettent respectivement le calcul explicite du diamètre  $D$  d'une conduite circulaire partiellement et entièrement occupée par un écoulement en régime pratiquement lisse.

### III.5 Relation généralisée au calcul du débit

L'objectif de cette partie de l'étude consiste à proposer une relation généralisée au calcul du débit dans les conduites et les canaux. Ce calcul se fait de manière explicite et reste valable quelque soit le profil considéré et pour tout domaine d'écoulement. Cette généralisation est possible, en faisant appel à la formule de *Darcy-Weisbach* et de la formule de *Colebrook-White*.

#### III.5.1 Transformation de la relation de *Darcy-Weisbach*

La formule de *Darcy-Weisbach* est donnée par l'expression (53) :

$$J = \frac{f}{D_h} \frac{Q^2}{2gA^2}$$

ou bien :

$$J = \frac{f}{8g} \frac{P}{A^3} Q^2 \quad (151)$$

$A$  et  $P$  sont respectivement la section mouillée et le périmètre mouillé.

En tenant compte des relations (90) et (91), la relation (151) devient :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left( \frac{R}{A_1^3} \right)^{1/2} \frac{q}{\sqrt{J}} \quad (152)$$

avec :

$$q = \frac{Q}{\sqrt{ga^5}}$$

### III.5.2 Transformation de la relation de Colebrook-White

La formule générale de *Colebrook-White* exprime le coefficient de frottement  $f$  en fonction de la rugosité relative  $\varepsilon/D_h$  et du nombre de *Reynolds*  $R$  par la relation (54) :

$$f^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/D_h}{3,7} + \frac{2,51}{R\sqrt{f}} \right]$$

En tenant compte des relations (108), (113) et (152), la relation (54) peut s'écrire :

$$f^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/a P_1}{14,8 A_1} + \frac{2,51 a P_1 v \sqrt{P_1} (q/\sqrt{J})}{4 Q 2\sqrt{2} A_1^{3/2}} \right]$$

soit

$$f^{-1/2} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/a P_1}{14,8 A_1} + \frac{2,51 v}{8\sqrt{2} \sqrt{gJa^3}} \left( \frac{P_1}{A_1} \right)^{3/2} \right] \quad (153)$$

### III.5.3 Conductivité relative

L'expression de la conductivité relative peut être obtenue par la combinaison des relations (152) et (153). Nous pouvons écrire :

$$\frac{q}{2\sqrt{2}\sqrt{J}} \sqrt{\frac{P_1}{A_1^3}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/a P_1}{14,8 A_1} + \frac{2,51 a P_1 v \sqrt{P_1} Q}{4 Q 2\sqrt{2} \sqrt{gJ} a^{5/2} A_1^{3/2}} \right]$$

ou bien :

$$\frac{q}{2\sqrt{2}\sqrt{J}} \sqrt{\frac{P_1}{A_1^3}} = -2 \log \left[ \frac{\varepsilon/a P_1}{14,8 A_1} + \frac{2,51}{8\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{gJa^3}} \sqrt{\frac{P_1^3}{A_1^3}} \right] \quad (154)$$

En considérant la quantité  $\sqrt{gJa^3}$ , on peut constater que sa dimension correspond à [m<sup>2</sup>/s] et de plus elle peut s'écrire :

$$\sqrt{gJa^3} = \sqrt{gJa^2 a} = a \sqrt{gJa}$$

La quantité  $\sqrt{gJa}$  a pour dimension m/s, c'est à dire la dimension d'une vitesse. Ainsi,  $\frac{a\sqrt{gJa}}{v}$  représente le nombre de *Reynolds* que l'on peut noter  $R_m$ .

$$R_m = \frac{a\sqrt{gJa}}{v} \quad (155)$$

$R_m$  sera désigné par le nombre de *Reynolds* modifié.

L'équation (154) peut s'écrire :

$$\frac{q}{\sqrt{J}} = -4\sqrt{2} \sqrt{\frac{A_1^3}{P_1}} \log \left[ \frac{\varepsilon/a}{14,8} \frac{P_1}{A_1} + \frac{2,51}{8\sqrt{2}} \sqrt{\frac{P_1^3}{A_1^3}} \frac{1}{R_m} \right] \quad (156)$$

La relation (156) consiste à évaluer le débit volume  $Q$  véhiculé par une conduite ou un canal de forme quelconque, dans tout domaine d'écoulement, à partir des valeurs connues des variables :  $J$ ,  $a$ ,  $\varepsilon$ ,  $\nu$  et le paramètre de forme.

Pour le cas particulier d'une conduite circulaire pleine, la dimension linéaire  $a=D$ , ( $P_1 = \pi$ ,  $A_1 = \pi/4$ ) l'équation (156) devient :

$$\frac{q}{\sqrt{J}} = -\frac{\pi}{\sqrt{2}} \log \left[ \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{\sqrt{2}R_m} \right] \quad (157)$$

La relation (II-82) devient pour le cas du régime turbulent rugueux (la viscosité du liquide est négligeable  $\nu \rightarrow 0$ , par conséquent le nombre de Reynolds modifié tend vers l'infini ( $R_m \rightarrow \infty$ )) :

$$\frac{q}{\sqrt{J}} = -4\sqrt{2} \sqrt{\frac{A_1^3}{P_1}} \log \left[ \frac{\varepsilon/a}{14,8} \frac{P_1}{A_1} \right] \quad (158)$$

Soit, pour le cas d'une conduite circulaire pleine:

$$\frac{q}{\sqrt{J}} = -\frac{\pi}{\sqrt{2}} \log \left[ \frac{\varepsilon/D}{3,7} \right] \quad (159)$$

Pour le cas d'un régime pratiquement lisse la rugosité absolue est nulle ( $\varepsilon/a = 0$ ), la relation (156) devient :

$$\frac{q}{\sqrt{J}} = -4\sqrt{2} \sqrt{\frac{A_1^3}{P_1}} \log \left[ \frac{2,51}{8\sqrt{2}} \sqrt{\frac{P_1^3}{A_1^3}} \frac{1}{R_m} \right] \quad (160)$$

Soit, pour le cas d'une conduite circulaire pleine:

$$\frac{q}{\sqrt{J}} = -\frac{\pi}{\sqrt{2}} \log \left[ \frac{2,51}{\sqrt{2}R_m} \right] \quad (161)$$

## III.6 Approche Expérimentale

### III.6.1 Introduction

Dans cette partie de l'étude une approche expérimentale est élaborée dont l'objectif principal est la vérification des relations théoriques exposées dans les paragraphes précédents.

Le protocole expérimental a été soigneusement décrit et conçu de manière à permettre l'étude de l'ensemble des régimes d'écoulement turbulent rugueux, de transition et pratiquement lisse.

Pour chacun des régimes d'écoulement ci-dessus mentionnés, les mesures expérimentales visent principalement à comparer les diamètres théoriques et réels sur la base d'un échantillon de points de mesure important.

Notons que ces mesures expérimentales seront considérées comme données de base, lors de la vérification de notre développement théorique. Ces données sont le débit volume  $Q$  véhiculé par la conduite d'essai de diamètre  $D$ , le gradient de perte de charge  $J$ , la rugosité absolue de la paroi de la conduite d'essai  $\varepsilon$ , la température de l'eau d'essai  $T$ .

Les données citées ci-dessus sont regroupées dans les tableaux 18 à 22 figurants en annexes.

Les essais ont concerné les conduites de diamètre intérieur respectif : 49mm,56mm,86mm,124mm et 130mm.

### III.6.2 Description générale du protocole expérimental

La figure 6 montre le schéma simplifié de l'installation ayant servi à l'étude expérimentale de l'écoulement uniforme dans les conduites en charge. Cette installation a été entièrement conçue et réalisée par le Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS) de l'Université de Biskra.

Comme l'indique la (figure 7), l'installation est conçue pour alimenter en circuit fermé la conduite circulaire testée. Elle est composée :

- D'un support.
- D'une pompe axiale alimentant en eau le système et pouvant débiter jusqu'à 100 l/s.
- D'un débitmètre à diaphragme inséré dans la conduite d'alimentation à l'aval de la pompe. Ce dispositif de mesure a été préalablement étalonné et sa précision est de l'ordre de 0,5 l/s. Les deux prises de pression sortant du débitmètre à diaphragme sont raccordées à un tableau manométrique (tableau manométrique n°1) muni de deux tubes piézométriques. A chaque débit  $Q$  véhiculé par la conduite d'alimentation correspond une différence de cote  $\Delta h$  des ménisques dans les tubes. Le débit  $Q$  a été corrélé à  $\Delta h$  et l'étalonnage a conduit à écrire que :

$$Q = 0,02218(\Delta h)^{0,5082}, \text{ où } Q \text{ est en m}^3/\text{s et } \Delta h \text{ en m.}$$

- D'un bassin d'accumulation recevant les eaux évacuées par l'extrémité aval de la conduite d'essai.
- D'une vanne plane permettant de régler à volonté le débit  $Q$ .
- De deux prises de pression statiques opérées sur la conduite testée, raccordées à un tableau manométrique (tableau manométrique n°2) doté de deux tubes piézométriques. La différence de cote  $\Delta H$  des ménisques dans les tubes piézométriques correspond à la perte de charge linéaire occasionnée entre les deux prises de pression sur la longueur  $L$  séparant les deux prises.

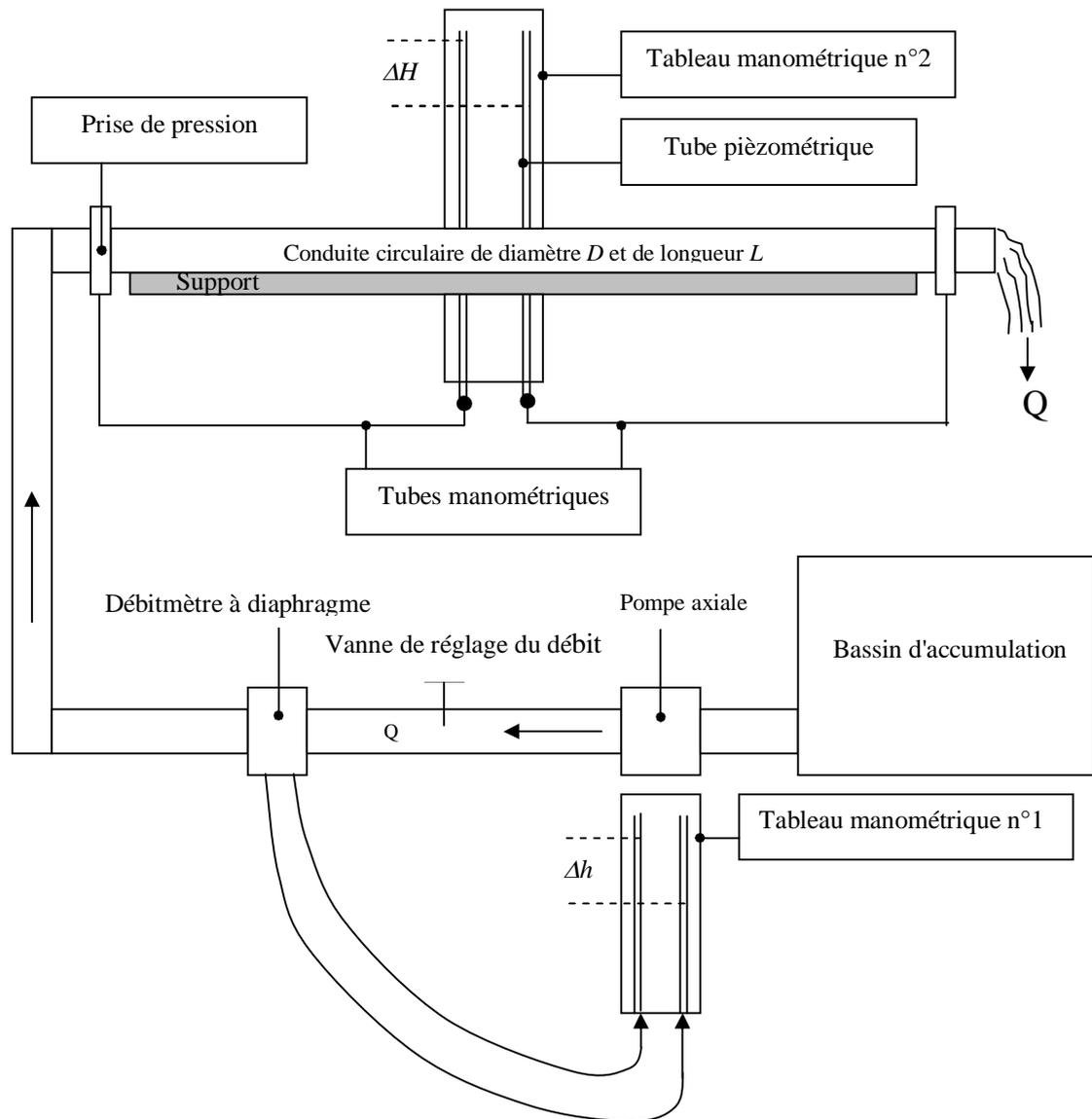


Figure 7: Schéma simplifié du dispositif expérimental ayant servi à l'étude de l'écoulement uniforme en conduite circulaire en charge.

### III.6.3 Essais et Résultats

#### II.6.3.1 Répartition des débits et du régime d'écoulement

Les essais ont concerné 05 conduites circulaires de diamètre intérieur respectif  $49\text{ mm}$ ,  $56\text{ mm}$ ,  $86\text{ mm}$ ,  $124\text{ mm}$  et  $130\text{ mm}$ .

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 n° 2. Les gammes des débits testés ont fait l'objet d'une analyse visant à définir la nature du régime d'écoulement dans la conduite testée. 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 suit :

1. Diamètre  $D = 49$  mm  
 $1,7 \text{ l/s} \leq Q \leq 3,6 \text{ l/s}$  : Régime d'écoulement de transition  
 $3,6 \text{ l/s} \leq Q \leq 9 \text{ l/s}$  : Régime d'écoulement turbulent rugueux
2. Diamètre  $D = 56$  mm  
 $1,7 \text{ l/s} \leq Q \leq 6,2 \text{ l/s}$  : Régime d'écoulement de transition  
 $6,2 \text{ l/s} \leq Q \leq 12 \text{ l/s}$  : Régime d'écoulement turbulent rugueux
3. Diamètre  $D = 86$  mm  
 $5 \text{ l/s} \leq Q \leq 30 \text{ l/s}$  : Régime d'écoulement pratiquement lisse
4. Diamètre  $D = 124$  mm  
 $19,5 \text{ l/s} \leq Q \leq 40,6 \text{ l/s}$  : Régime d'écoulement turbulent rugueux
5. Diamètre  $D = 130$  mm  
 $14 \text{ l/s} \leq Q \leq 44 \text{ l/s}$  : Régime d'écoulement de transition

### III.6.3.2 Procédure d'expérimentation

La procédure expérimentale a consisté à faire les mesures au laboratoire, pour chaque conduite testée de diamètre  $D$  et pour chaque débit volontairement injecté, de :

- La différence des cotes  $\Delta h$  dans le tableau manométrique n°1 pour déterminer le débit  $Q$  dont l'expression est donnée, après avoir étalonné le débitmètre à diaphragme, comme suit :

$$Q = 0,02218 \Delta h^{0,5082}, \quad Q \text{ en } m^3/s \text{ et } \Delta h \text{ en mètre}$$

- La différence de cotes  $\Delta H$  dans le tableau manométrique n°2 afin de déterminer le gradient de perte de charge  $J$  en utilisant la relation,  $J = \Delta H/L$ .

$L$  étant la longueur qui sépare les deux prises de pression reliées avec le manomètre n°2.

- La température de l'eau  $T$  afin de déterminer la viscosité cinématique  $\nu$  et par conséquent le nombre de Reynolds  $R$ .

La viscosité cinématique  $\nu$  peut être calculée par la formule de *Poiseulle* :

$$\nu = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337T + 0,00022T^2}$$

Le nombre de Reynolds  $R$  est évalué, par définition, en application de la relation :

$$R = \frac{4Q}{\pi D \nu}$$

La rugosité absolue  $\varepsilon$  est liée au coefficient  $k$  de *Strickler* par la relation de *Hager*  $k\varepsilon^{1/6}/(8,2\sqrt{g})=1$

que nous avons déjà indiquée. L'évaluation du coefficient  $k$  s'accompagne en règle générale d'une erreur relative importante, pouvant atteindre 10% et même plus dans certains cas. La relation

$k = f(\varepsilon)$  ci-dessus indiquée permet d'écrire, en vertu du théorème des erreurs relatives, que  $\Delta k/k = (1/6)\Delta\varepsilon/\varepsilon$ . Ceci implique que 10% d'erreur commise sur l'évaluation du coefficient  $k$  entraîne 60% d'erreur relative sur l'estimation de la rugosité absolue  $\varepsilon$ .

Cependant, il est à noter que cette erreur relative sur la rugosité absolue  $\varepsilon$ , aussi grande soit-elle, n'a pratiquement aucune influence significative sur l'évaluation de la dimension linéaire  $a$ .

Pour illustrer cette affirmation, considérons le cas d'une conduite circulaire pleine de diamètre  $D$  et pour laquelle  $a = D$ . En supposant un écoulement en régime turbulent rugueux, le développement théorique présenté dans les paragraphes précédents a montré que le diamètre  $D_r$  pouvait être évalué par la relation :

$$D_r = 1,548 \left[ \frac{Q\varepsilon^{1/6}}{8,2\sqrt{gJ}} \right]^{3/8}$$

En vertu du théorème des erreurs relatives, cette dernière relation permet d'écrire que :

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} = \frac{3}{8} \left[ \frac{1}{2} \frac{\Delta J}{J} + \frac{\Delta Q}{Q} \right] + \frac{1}{16} \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$$

Le terme  $(1/16)\Delta\varepsilon/\varepsilon$  représente à lui seul l'influence de l'erreur relative de la rugosité sur celle du diamètre  $D_r$ . Ainsi, 60% d'erreur relative commise sur l'évaluation de la rugosité absolue n'entraîne qu'une erreur relative  $\Delta D_r/D_r = 0,6/16 = 3,75\%$  sur l'évaluation du diamètre  $D_r$ .

La rugosité relative (ou absolue) des conduites testées a été estimée par la combinaison des relations de *Darcy-Weisbach* et *Achour* qui sont respectivement :

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

$$f^{-1/2} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{4,5}{R} \log \frac{R}{6,97} \right)$$

Les valeurs obtenues de la rugosité relative  $\varepsilon/D$  sont regroupées dans les tableaux 18 à 22 en annexes, ainsi que les valeurs correspondantes de la rugosité absolue  $\varepsilon$ .

### III.6.3.3 Vérification expérimentale de la dimension linéaire $D$ des conduites testées

Cette partie de l'étude vise à vérifier et à comparer les valeurs réelles et calculées du diamètre  $D$  pour l'ensemble des conduites testées. Cette vérification a concerné tous les régimes d'écoulement observés et c'est ainsi que pour :

### 1. Régime d'écoulement turbulent rugueux

Le régime d'écoulement turbulent rugueux, le diamètre  $D_r$  calculé ou théorique répond à la

relation  $D_r = 1,548 \left[ \frac{Q\varepsilon^{1/6}}{8,2\sqrt{gJ}} \right]^{3/8}$ , en tenant compte des valeurs mesurées des paramètres  $Q$ ,  $J$  et  $\varepsilon$ .

Pour chacune des valeurs de ces paramètres, le diamètre  $D_r$  a été calculé puis comparé au diamètre réel  $D$  de la conduite testée. Cette comparaison a permis de conclure que les diamètres normalisés calculés selon la relation ci-dessus indiquée correspondent parfaitement aux diamètres réels correspondants des conduites testées.

Les valeurs obtenues des coefficients  $\lambda$  sont très proches de l'unité et a été conclu à la nature turbulente de l'écoulement observé. Une correction sur les diamètres calculés a été cependant opérée en écrivant que  $D$  (réel) =  $\lambda D$  (calculé).

### 2. Régime d'écoulement de transition

Le régime de transition a concerné les conduites de diamètre  $D = 49 \text{ mm}$ ,  $56 \text{ mm}$  et  $130 \text{ mm}$ . Les résultats les plus significatifs sont ceux obtenus sur la conduite de diamètre  $D = 130 \text{ mm}$ , compte tenu de la large gamme des débits utilisés  $14 \text{ l/s} \leq Q \leq 44 \text{ l/s}$ .

La vérification expérimentale des diamètres des conduites testées a consisté à comparer les diamètres calculés et réels de ces mêmes conduites.

Le tableau 1 montre les écarts relatifs issus de cette comparaison, pour le seul cas du diamètre  $D = 130 \text{ mm}$ .

Tableau 1 : Ecart relatifs sur le diamètre calculé et réel en régime de transition

$\Delta D/D$ (%)	0,8	0,5	0,38	0,29	0,43	1,46	1,16	0,21	1,98
$\Delta D/D$ (%)	0,04	0,28	0,64	0,54	0,39	0,43	0,86	1,2	1,75
$\Delta D/D$ (%)	2,26	2,89	2,8	2,28	2,3	2,15	2,2	2,15	2,54
$\Delta D/D$ (%)	2,83	3,05	3,6	3,7	4,23	4,23	4,5	4,3	

On peut ainsi constater que l'écart maximal observé sur l'estimation du diamètre réel de la conduite ne dépasse guère 4,5%

Les diamètres calculés ont obtenu par application de la relation :

**$D$  (calculé, régime de transition) =  $\lambda D_r$  (calculé, régime turbulent rugueux)**

Avec :

$$D_r = 1,548 \left[ \frac{Q\varepsilon^{1/6}}{8,2\sqrt{gJ}} \right]^{3/8} \quad \text{et} \quad \lambda = \left( \frac{f}{f_r} \right)^{1/5}$$

En vertu du théorème des erreurs relatives, ces dernières relations permettent d'écrire respectivement que :

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} = \frac{3}{8} \left[ \frac{1}{2} \frac{\Delta J}{J} + \frac{\Delta Q}{Q} \right] + \frac{1}{16} \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}$$

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{1}{5} \frac{\Delta f}{f}$$

Le terme  $\Delta f/f$  a été déterminé en vertu de la relation de *Darcy-Weisbach* :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta J}{J} + 2 \frac{\Delta Q}{Q}$$

Soit donc :

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{1}{5} \left[ \frac{\Delta J}{J} + 2 \frac{\Delta Q}{Q} \right]$$

Finalement on peut remarquer que l'erreur relative commise sur l'estimation du diamètre réel de la conduite dépend de celles commises sur l'estimation du gradient de perte de charge  $J$ , du débit volume  $Q$  et de la rugosité absolue  $\varepsilon$ .

Les plus petites valeurs des paramètres de  $J$ ,  $Q$  et  $\varepsilon$  rencontrés au cours de l'expérimentation sont respectivement  $J = 0,01333333$ ,  $Q = 14,8$  l/s et  $\varepsilon = 9,88 \cdot 10^{-5}$ . Cette dernière valeur montre clairement que l'erreur relative commise sur l'estimation de  $\varepsilon$  est insignifiante et nous pouvons écrire que :

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} \approx \frac{3}{8} \left[ \frac{1}{2} \frac{\Delta J}{J} + \frac{\Delta Q}{Q} \right]$$

Etant donné que  $J = \Delta H/L$ , l'erreur relative commise sur l'estimation du gradient  $J$  de la perte de charge est :

$$\Delta J/J = \Delta (\Delta H)/\Delta H + \Delta L/L \approx \Delta (\Delta H)/\Delta H$$

La valeur de  $\Delta H$  correspondant à la valeur minimale de  $J = 0,01333333$  est  $\Delta H = 0,02$  m. En estimant que l'erreur absolue issue de la lecture de  $\Delta H$  est environ égale à 1 mm, ceci permet d'écrire que  $\Delta (\Delta H)/\Delta H = \Delta J/J = 10^{-3}/0,02 = 5\%$ . L'erreur relative issue de la mesure du débit  $Q = 0,5$  l/s est  $\Delta Q/Q = 0,5/14,8 \approx 3,38\%$ . En tenant compte de toutes ces considérations, l'erreur relative maximale commise sur l'évaluation du diamètre  $D$  est donc :

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} \approx \frac{3}{8} \left[ \frac{1}{2} \frac{\Delta J}{J} + \frac{\Delta Q}{Q} \right] = \frac{3}{8} \left[ \frac{1}{2} (0,05 + 0,0338) \right] \approx 2,2\%$$

L'écart maximal observé sur l'estimation du diamètre  $D$  réel de la conduit testée est également lié à celui commis sur l'évaluation du coefficient de correction  $\lambda$ . En effet,  $D = \lambda D_r$  implique que :

$$\Delta D/D = \Delta \lambda/\lambda + \Delta D_r/D_r$$

En considérant les valeurs maximales observées  $\Delta J/J = 5\%$  et  $\Delta Q/Q = 3,38\%$ , la relation qui exprime l'erreur relative sur l'estimation de  $\lambda$  permet d'écrire que :

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{1}{5} (0,05 + 2 \times 0,0338) \approx 2,35\%$$

Ainsi :

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta D_r}{D_r} = 2,35 + 2,2 = 4,55\%$$

C'est ainsi que se justifie amplement l'erreur relative maximale expérimentale sur l'évaluation du diamètre réel  $D$  pour le cas de la conduite de 130mm de diamètre,  $\Delta D/D \text{ max.} = 4,5\%$ .

### 3. Régime d'écoulement pratiquement lisse

Comme pour les régimes d'écoulement turbulent rugueux et de transition, l'expérimentation que a concerné le régime d'écoulement pratiquement lisse. Celui-ci a été observé dans la conduite de diamètre  $D = 86 \text{ mm}$  et dans la gamme  $5,7 \text{ l/s} \leq Q \leq 30 \text{ l/s}$ .

L'objectif de l'étude a été de comparer les diamètres calculés, en vertu de la méthode préconisée au cours du développement théorique, et le diamètre réelle de la conduite testée ( $D = 86 \text{ mm}$ , Diamètre réel ).

Les points de mesure obtenus dans la gamme des débits ci-dessus indiqués n'ont pas tous été significatifs, notamment pour les débits réduits allant jusqu'à 10 l/s. Pour un débit  $Q = 10 \text{ l/s}$ , l'erreur relative commise sur la mesure est de  $0,5/10 = 5\%$ . Ceci constitue l'erreur relative maximale sur la mesure du débit, compte tenu de la précision de 0,5 l/s du débitmètre à diaphragme utilisé. Pour la plus grande valeur du débit  $Q = 30 \text{ l/s}$ , l'erreur se réduit à  $0,5/30 = 1,67\%$ .

Le calcul du diamètre de la conduite repose sur la mesure expérimentale du facteur de correction  $\psi$ . Le diamètre réel calculé a été obtenu par la correction du diamètre de la conduite hypothétique véhiculant un écoulement en régime turbulent rugueux, selon la relation :

$$D \text{ (réel non normalisé)} = \psi D_r \text{ (conduite hypothétique)}$$

Le diamètre de la conduite hypothétique est évalué, par la relation suivante, en tenant compte des valeurs mesurés des débits  $Q$  et du gradient de la perte de charge  $J$  :

$$D_r \text{ (conduite hypothétique)} = \frac{1}{2} \left( \frac{Q}{\sqrt{gJ}} \right)^{2/5}$$

En vertu du théorème des erreurs relatives, l'erreur commise sur le calcul du diamètre  $D_r$  est

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} = \frac{2}{5} \left( \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{1}{2} \frac{\Delta J}{J} \right)$$

Etant donné que  $J = \Delta H/L$ , la relation précédente permet d'écrire, compte tenu de l'erreur insignifiante commise sur la mesure de la longueur  $L$  :

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} = \frac{2}{5} \left( \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{1}{2} \frac{\Delta(\Delta H)}{\Delta H} \right)$$

En considérant la plus faible valeur du débit  $Q = 5,7 \text{ l/s}$  de la gamme utilisée, l'erreur relative sur la mesure de ce débit est maximale et vaut  $\Delta Q/Q = 0,5/5,7 \approx 8,77 \%$ . Bien que cette erreur soit relativement significative, elle n'a cependant qu'une faible influence sur le calcul du diamètre  $D_r$ . Cette affirmation sera étayée dans ce qui suit.

En se référant au tableau... en annexe, la perte de charge  $\Delta H$  correspondant au débit  $Q = 5,7 \text{ l/s}$  est  $\Delta H = 0,015 \text{ m} = 15 \text{ mm}$ . L'erreur relative commise sur la lecture de  $\Delta H$  est par suite  $\Delta(\Delta H)/\Delta H = 1/15$ .

En tenant compte de ces considérations, l'erreur relative maximale affectant le calcul du diamètre  $D_r$  est donc :

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} = \frac{2}{5} \left( 0,0877 + \frac{1}{30} \right) \approx 4,84\%$$

Ainsi, compte tenu d'une erreur relative significative maximale de 8,77% sur la mesure du débit  $Q$ , l'erreur relative commise sur le calcul du diamètre  $D_r$  n'est que de 4,84 % environ.

L'erreur relative commise sur le calcul du diamètre réel de la conduite s'obtient en écrivant que :

$$\Delta D/D = \Delta \psi/\psi + \Delta D_r/D_r$$

Comme dans le cas du coefficient de correction  $\lambda$ , l'erreur relative engendrée sur le calcul du coefficient  $\psi$  s'écrit :

$$\frac{\Delta \psi}{\psi} = \frac{1}{5} \frac{\Delta f}{f}$$

avec :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta J}{J} + 2 \frac{\Delta Q}{Q}$$

soit :

$$\frac{\Delta \psi}{\psi} = \frac{1}{5} \left( \frac{\Delta J}{J} + 2 \frac{\Delta Q}{Q} \right)$$

ou bien :

$$\frac{\Delta \psi}{\psi} = \frac{1}{5} \left( \frac{\Delta(\Delta H)}{\Delta H} + 2 \frac{\Delta Q}{Q} \right)$$

Cette dernière relation conduit à écrire que :

$$\frac{\Delta \psi}{\psi} = \frac{1}{5} \left( \frac{1}{15} + 2 \times 0,0877 \right) \approx 4,84\%$$

L'erreur relative occasionnée sur le calcul du diamètre réel de la conduite est donc :

$$\frac{\Delta D}{D} = 4,84 + 4,84 = 9,68\%$$

Il est à noter que les mesures expérimentales sont entachées d'une erreur relative qui demeure dans tous les cas en deçà de l'erreur maximale. Ceci permet de conclure, à la fiabilité de la démarche

théorique proposée pour l'évaluation du diamètre de la conduite circulaire en régime d'écoulement pratiquement lisse.

### III.7 Conclusion

Le chapitre précédent a été consacré à la représentation de la méthode dite *LARHYSS* établie par le *laboratoire de recherches en hydraulique souterraine et de surface* de l'université *Mohamed Khider* de *BISKRA*. Comme nous l'avons vue cette méthode est élaborée pour le calcul de l'écoulement uniforme, notamment l'évaluation de la dimension linéaire d'un profil géométrique de forme quelconque pour toute nature de régime d'écoulement turbulent (rugueux, transition et lisse).

La dimension linéaire quelconque  $a_r$  en régime turbulent rugueux a pu être exprimée par la transformation de la relation de *Manning – Strickler*. La relation fonctionnelle  $\varphi(Q, J, \varepsilon, a_r, \text{paramètre de forme}) = 0$  a été clairement définie et la relation  $a_r = \left(\frac{Q}{k\sqrt{J}}\right)^{3/8} \frac{P_1^{1/4}}{A_1^{5/8}}$  a été obtenue.

Cette dernière relation montre que toute dimension linéaire  $a_r$  d'un profil géométrique de forme quelconque véhiculant un écoulement en régime turbulent rugueux dépend de quatre paramètres :

- le débit volume  $Q$
- la pente  $J$  du canal
- le coefficient  $k$  de *Strickler*
- du paramètre de forme exprimé par les variables  $P_1$  et  $A_1$ . Ceux-ci représentent respectivement le périmètre mouillé et l'aire de la section mouillée du profil considéré, lorsque la dimension linéaire  $a_r$  est égale à l'unité, soit  $P_1 = P/a_r$  et  $A_1 = A/a_r^2$ .

En tenant compte de la relation de *Hager*  $\frac{k\varepsilon^{1/6}}{8,2\sqrt{g}}=1$ , qui traduit la corrélation entre le coefficient de

*Strickler* et la rugosité absolue  $\varepsilon$ , la dimension linéaire  $a_r$  devient  $a_r = \left(\frac{Q\varepsilon^{1/6}}{8,2\sqrt{gJ}}\right)^{3/8} \frac{P_1^{1/4}}{A_1^{5/8}}$ . Cette

dernière relation, qui s'applique à tout profil géométrique, a été présentée de manière symbolique

par  $a_r = \Lambda a_o$ , où  $\Lambda = \left(\frac{Q\varepsilon^{1/6}}{8,2\sqrt{gJ}}\right)^{3/8}$  a la dimension d'une longueur et  $a_o = \frac{P_1^{1/4}}{A_1^{5/8}}$  est un paramètre sans

dimension que nous avons désigné par paramètre de la dimension linéaire.

Le développement théorique a pu également établir de nouvelles expressions du nombre de *Reynolds*  $R_r$  de l'écoulement uniforme en régime turbulent rugueux ainsi que celle de la vitesse moyenne  $V_r$  :

$$R_r = \frac{4Q}{\Lambda v} \left( \frac{\sqrt{A_1}}{P_1} \right)^{5/4}, \quad V_r = \frac{Q}{\Lambda^2} \left( \frac{\sqrt{A_1}}{P_1} \right)^{1/2}.$$

Pour l'écoulement en régime de transition, l'étude a proposé de corriger la dimension linéaire  $a_r$  en régime turbulent rugueux par un coefficient  $\lambda$  désigné par *coefficient de transition*. La dimension

linéaire  $a$  en régime de transition peut alors s'écrire  $a = \lambda a_r = \lambda \Lambda a_o = \lambda \left( \frac{Q \varepsilon^{1/6}}{8,2 \sqrt{gJ}} \right)^{3/8} \frac{P_1^{1/4}}{A_1^{5/8}}$ . Le

coefficient de transition  $\lambda$  dépend à la fois de la rugosité relative  $\varepsilon/D_{hr}$  et du nombre de Reynolds  $R_r$  caractérisant l'écoulement en régime turbulent rugueux. L'expression du coefficient de transition  $\lambda$  a

pu être établie et s'écrit  $\lambda = \left( \frac{f}{f_r} \right)^{1/5}$ . Les coefficients de frottement  $f$  et  $f_r$  peuvent être respectivement

évalués par la formule de *Colebrook-White* et celle de *Nikuradse*. Etant donné le caractère implicite

de la formule de *Colebrook-White*, le choix s'est finalement porté sur la relation explicite de *Achour*.

La démarche précédente a été également adoptée en ce qui concerne le calcul de la dimension linéaire  $a$  en régime pratiquement lisse. La dimension linéaire  $a_r$  en régime turbulent rugueux est corrigée par un coefficient  $\psi$  tel que :

$$a = \psi a_r = \psi \Lambda a_o = \psi \left( \frac{Q \varepsilon^{1/6}}{8,2 \sqrt{gJ}} \right)^{3/8} \frac{P_1^{1/4}}{A_1^{5/8}}$$

Le coefficient de correction  $\psi$  s'obtient de la même manière que celle ayant conduit à l'expression

du coefficient de transition  $\lambda$  et le coefficient  $\psi$  s'écrit :  $\psi = \left( \frac{f}{f_r} \right)^{1/5}$ . Les coefficient de frottement  $f$

et  $f_r$  sont donnés respectivement par la relation de *Achour* et celle de *Nikuradsé*. Cependant, le coefficient de frottement  $f_r$  selon la formule de *Nikuradsé* n'a pas de signification physique puisque l'écoulement est pratiquement lisse et est donc caractérisé par une rugosité relative  $\varepsilon/D_h \rightarrow 0$ .

Afin de lever cette difficulté, le coefficient de frottement  $f_r$  doit être calculé pour un écoulement turbulent rugueux véhiculé par une conduite hypothétique de rugosité relative  $\varepsilon/D_{hr} = 8,5 \cdot 10^{-3}$ . Une analyse particulière de l'expression du coefficient de correction  $\psi$  a montré que celui-ci pouvait être corrélé au nombre de *Reynolds*  $R_r$  de l'écoulement turbulent rugueux et un ajustement basé sur la

méthode des moindres carrés non linéaires a permis d'écrire avec une excellente approximation

$$\Psi = \left( \frac{3,673}{\log R_r} \right)^{0,478} .$$

Enfin, la combinaison des formules transformées et généralisées de *Darcy-Weisbach* et de *Colebrook-White* a permis d'aboutir à une relation explicite de la conductivité relative, applicable à tout profil géométrique et pour toute nature du régime d'écoulement. Ces relations sont destinées au calcul explicite du débit volume  $Q$ .

En fin Un protocole expérimental a été réalisé et n'a concerné que la conduite circulaire entièrement remplie par l'écoulement. Ce protocole a eu pour objectif principal la vérification expérimentale des relations issues du développement théorique, notamment celle ayant permis l'évaluation de la dimension linéaire.

Afin d'observer expérimentalement l'ensemble des régimes d'écoulement, plusieurs conduites ont été testées. Il s'agit des conduites de diamètre intérieur 49 mm, 56 mm, 86 mm, 124 mm et 130 mm.

La vérification expérimentale du diamètre de la conduite testée a été effectuée pour chacun de ces régimes (rugueux, transition et lisse).

Pour l'ensemble des essais effectués, l'analyse des mesures expérimentales a permis de conclure de manière satisfaisante sur la fiabilité des relations théoriques proposées.

Dans la partie suivante de notre mémoire, consacrée à l'étude de l'écoulement uniforme, notre approche théorique et sa vérification sera présentée.

## CONCLUSION GENERALE

Notre étude s'est intéressée au calcul des écoulements uniformes et notre attention a été portée plus particulièrement aux écoulements en conduites circulaires en charge et à surface libre.

L'étude bibliographique que nous avons menée a montré que les méthodes de calcul des écoulements uniformes se basent essentiellement sur les formules classiques de type *Manning – Strickler* ou de *Chézy*. Celles-ci ont été pourtant établies, à l'origine, pour être appliquées aux écoulements dans les canaux ouverts. Nous avons présenté, dans le chapitre consacré à la recherche bibliographique, un état de connaissances des équations régissant l'écoulement uniforme tout en mettant l'accent sur leurs principales limites d'applicabilité. L'une des conclusions principales que nous avons tirée de cette étude est que les formules usuelles de l'écoulement uniforme ne sont valables que pour le cas d'un écoulement en régime turbulent rugueux. Leur extension à l'écoulement de transition ou pratiquement lisse n'était pas clairement définie et nécessitait une étude approfondie.

En s'intéressant à l'écoulement uniforme en régime turbulent rugueux, nous avons montré l'influence de cinq paramètres principaux qui sont le débit volume  $Q$ , la profondeur  $h$  de l'écoulement, la rugosité absolue caractérisant les parois du canal considéré, une dimension linéaire de celui-ci telle que la largeur  $b$  d'un canal rectangulaire et enfin sa pente géométrique. Nous avons montré que les paramètres  $b$  et  $h$  pouvait former le rapport d'aspect ou paramètre de forme de la section mouillée. Dans les formules usuelles de l'écoulement uniforme, la rugosité absolue des parois du canal est remplacée le plus souvent par le coefficient de *Strickler* ou par celui de *Manning*. D'autres relations font appel au coefficient de *Chézy* mais plus rarement au coefficient de frottement de *Nikuradse*.

L'effet de la viscosité cinématique du liquide en écoulement, et par conséquent celui du nombre de *Reynolds*, n'est pas mis en évidence dans les relations usuelles de l'écoulement uniforme. Ceci nous a conduit à conclure que leur application devait se limiter au domaine d'écoulement turbulent rugueux.

Notre étude a révélé que trois catégories de problèmes pouvaient se rencontrer lors de l'application des équations régissant l'écoulement uniforme. La première catégorie répond à un besoin de dimensionnement du canal considéré ou consiste à rechercher la profondeur de l'écoulement. L'application des formules usuelles de l'écoulement uniforme à cette catégorie de problème, nécessite inévitablement un procédé itératif. La seconde catégorie consiste à évaluer le débit volume passant par le canal. La troisième catégorie est celle liée au calcul de la pente géométrique du canal ou au gradient de la perte de charge  $J$  puisque l'écoulement est uniforme. Ces deux dernières catégories de problèmes ne nécessitent guère de procédé itératif.

L'essentiel de notre recherche a été consacré à un développement théorique visant à proposer des relations fiables et généralisées au calcul de l'écoulement uniforme dans les conduites circulaires en charge et à surface libre. Leur fiabilité repose sur le choix judicieux de l'expression du coefficient de frottement et leur généralisation concerne l'ensemble des régimes d'écoulement, en particulier le régime de transition. Cet dernier aspect a nécessité la prise en compte de l'effet de la viscosité cinématique du liquide à travers l'introduction du nombre de *Reynolds*. En tenant compte de celui-ci, la relation fonctionnelle régissant l'écoulement uniforme intègre ainsi six paramètres au lieu des cinq qui caractérisent l'écoulement turbulent rugueux.

Notre développement théorique a été appliqué dans un premier temps au cas de la conduite circulaire à surface libre. Les relations théoriques obtenues ont permis de répondre à la première catégorie de problèmes précédemment citées, tout en offrant la possibilité d'un calcul explicite. La dimension linéaire recherchée, qu'elle soit liée au profil géométrique du canal qu'à l'écoulement, correspond à un produit de trois fonctions. La première fonction que nous avons désignée par  $A$  est composée de deux variables  $Q/\sqrt{J}$  et  $\varepsilon$  qui correspondent respectivement à la conductivité et à la rugosité absolue. La seconde fonction que nous avons désignée par  $a_0$  est étroitement liée au rapport d'aspect ou au paramètre de forme. La troisième fonction que nous avons désignée par  $\lambda$  dépend quant à elle de la rugosité relative de la conduite et du nombre de *Reynolds*. La fonction  $\lambda$  est égale à l'unité lorsque l'écoulement est turbulent rugueux et dépend exclusivement du nombre de *Reynolds* lorsque l'écoulement est dans le domaine pratiquement lisse caractérisé par une rugosité relative tendant vers zéro. Ainsi, la dimension linéaire recherchée est fonction de cinq variables et la relation qui la définit demeure applicable à tous les régimes d'écoulement.

De nombreuses applications ont été présentées et qui permettront au lecteur de mieux apprécier la simplicité de la méthode que nous avons proposée. En outre, le calcul issu de cette méthode a été confronté avec succès à celui fourni par les relations classiques, ce qui nous a permis de conclure à la fiabilité de notre approche théorique.

## Principales notations

$a$	(m)	Dimension linéaire.
$A$	(m <sup>2</sup> )	Aire d'une section mouillée.
$A_0$	(-)	Paramètre de dimension de la section mouillée.
$A_1$	(-)	Aire de la section mouillée pour $a$ égal à l'unité ( $A_1 = A/a^2$ ).
$C$	(m <sup>1/2</sup> /s)	Coefficient de <i>Chézy</i> .
$D$	(m)	Diamètre d'une conduite.
$D_h$	(m)	Diamètre hydraulique.
$D_{h0}$	(m)	Paramètre de dimension du diamètre hydraulique.
$f$	(-)	Coefficient de frottement.
$F_r$	(N)	Force de résistance.
$g$	(m/s <sup>2</sup> )	Accélération de la pesanteur.
$h$	(m)	Profondeur de l'écoulement.
$h_N$	(m)	Profondeur normale de l'écoulement.
$J$	(-)	Gradient de perte de charge.
$J_c$	(-)	Pente critique.
$J_s$	(-)	Pente géométrique du canal.
$K$	(m <sup>3</sup> /s)	Conductivité.
$k$	(m <sup>1/3</sup> /s)	Coefficient de <i>Strickler</i> .
$n$	(m <sup>-1/3</sup> s)	Coefficient de rugosité de <i>Manning</i> et de <i>Kutter</i> .
$P$	(m)	Périmètre mouillé.
$P_0$	(-)	Paramètre de dimension du périmètre mouillé.
$P_1$	(-)	Périmètre mouillé pour $a$ égal à l'unité ( $P_1 = P/a$ ).
$q$	(-)	Débit relatif ( $q=Q/\sqrt{gD^5}$ ).
$Q$	(m <sup>3</sup> /s)	Débit volume.
$R$	(-)	Nombre de <i>Reynolds</i> .
$R_h$	(m)	Rayon hydraulique.
$R_{h0}$	(-)	Paramètre de dimension du rayon hydraulique.
$T$	(°C)	Température du liquide en écoulement.
$V$	(m/s)	Vitesse moyenne d'un écoulement.
$V_f$	(m/s)	Vitesse de frottement.
$\varepsilon$	(m)	Rugosité absolue.
$\theta$	(rd)	Demi angle au centre du profil circulaire.
$\lambda$	(-)	Facteur de correction de la dimension linéaire dans le domaine de transition.
$L$	(m)	Longueur fluide-dynamique.
$\mu$	(-)	Paramètre de combrure.
$\nu$	(m <sup>2</sup> /s)	Viscosité cinématique d'un liquide.
$\xi$	(-)	Paramètre de forme d'un segment circulaire ( $\xi = h/D$ ).
$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	Masse volumique du liquide.
$\tau$	(N/m <sup>2</sup> )	Contrainte de cisaillement.
$\tau_0$	(N/m <sup>2</sup> )	Force tractrice.
$\psi$	(-)	Facteur de correction de la dimension linéaire dans le domaine pratiquement lisse.
$\varpi$	(N/m <sup>3</sup> )	Poids spécifique du liquide. L'indice " r " indique le domaine rugueux.

## Références bibliographiques

ACHOUR, B. (1997). Dissipateurs d'énergie par ressaut, thèse de doctorat d'état en sciences hydrauliques, université de Tizi-Ouzou.

ACHOUR, B., BEDJAOUI, A., KHATTAOUI, M., DEBABECHE, M. (2002). Contribution au calcul des écoulements uniformes à surface libre et en charge, LARHYSS / Journal, Biskra, N°01, pp. 7-36.

BAKHMETEFF, B.A., PEODOROFF, N.V. (1943). Discussion on open channel flow, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol.108, pp.492-502.

BAZIN, H. (1897). Étude d'une nouvelle formule pour calculer le débit des canaux découverts, Mémoire N° 41, Annales des ponts et chaussées, Vol. 14, ser. 7, 4<sup>ème</sup> trimestre, pp. 20-70, Paris.

BLENCH, T.A. (1939). New theory of turbulent flow in liquids of small viscosity, Journal, Institution of Civil Engineers, London, Vol.11, n°6, pp.611-612.

CHOW, V.T. (1973). Open Channel Hydraulics, McGraw Hill Book Company, New York.

DARCY, H. (1854). Sur des recherches expérimentales relatives au mouvement des eaux dans les tuyaux, Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, Vol.38, pp. 1109-1121, Paris.

DUPONT, A. (1988). Hydraulique urbaine, Tome II, Ouvrages de transport- Elévation et distribution des eaux, Paris.

FORCHHEIMER, P. (1930). Hydraulik tenbner Verlagsgesellschaft, Leipzig and Berlin, pp.139-163.

GALI, B. (2002). Contribution à l'étude de l'écoulement uniforme, à surface libre et en charge, Thèse de Magister en sciences hydraulique, université de Batna.

GANGUILLET, E., KUTTER, W.R. (1869). Versuch zur Aufstellung einer neuen allgemeinen Formel für die gleichförmige Bewegung des wassers in Canälen und Flüssen, Zeitschrift des

- Oesterreichischen Ingenieur und Architekten Vereines, Vol. 21, N°1, pp. 6-25; N° 2-3, pp. 46-59, Vienna.
- HAGER, W.H. (1987). Die Berechnung turbulenter Rohrströmungen, 3R-International, Vol. 26, Heft 2, pp. 116-121.
- HAMA, F.R. (1954). Boundary Layer growth characteristics for smooth and rough surfaces, Transactions, Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 62, pp. 333-351.
- HOUK, I.E. (1918). Calculation of flow in open channels, Miami conservancy District, Technical Report, Pt IV, Dayton, Ohio.
- IWASA, Y. (1957). Boundary layer growth of open channel flows on a smooth bed and its contribution to practical application to channel design, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyoto University, Japan, Vol. XIX, N° III, pp. 229-254.
- KEULEGAN, H.G. (1938). Laws of turbulent flow in open channels, Research Paper RP 1151, Journal of Research, U.S. National Bureau of Standards, Vol. 21, pp. 707- 741.
- LINDQUIST, E. (1933). On velocity formulas for open channels and pipes, Transactions of the World Power conference, Sectional Meeting, Scandinavia, Stockholm, Vol. 1, pp.177-234.
- MANNING, R. (1891). On the flow of water in open channels and pipes, Transactions, Institution of Civil Engineers of Ireland, Vol. 20, pp. 161-207, Dublin.
- MORRIS, H.M. (1955). A new concept of flow in rough conduits, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 120, pp. 373-398.
- PAVLOVSKI, N.N. (1940). Handbook of hydraulics, Leningrad and Moscou.
- POWELL, R.W. (1950). Resistance to flow in rough channels, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 31, N° 4, pp. 575-582.
- PRANDTL, L. (1926). Über die ausgebildete Turbulenz, Proceedings of the 2d International Congress of Applied Mechanics, Zürich, pp. 62-74.

SCHLICHTING, H. (1955). Boundary Layer Theory, McGraw Hill Book Company, New York, Pergamon Press Ltd., London.

SCHNACKENBERG, E.C. (1951). Slope discharge formula for alluvial streams and rivers, Proceedings, New Zealand Institution of engineers, Vol. 37, pp.340-409, Wellington, Discussions, pp. 410-449.

STANTON, T.E., PANNEL, J.R. (1914). Similarity of motion in relation to surface friction of fluids, Philosophical Transactions, Royal Society of London, Vol. 214A, pp. 199-224.

STRICKLER, A. (1923). Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen, Mitteilungen des eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft, N°16, Bern.

SWAMEE, P.K. (1976). Explicit equations for pipe-flow problems, Proc. ACSE, J. Hydraulics Division, Vol. 102, HY5, 657-664; HY11, 1707-1709.

TOEBES, C. (1955). Stream flow: Poly dimensional treatment of variable factors affecting the velocity in alluvial streams and rivers, Proceedings Institution of Civil Engineers. London, Vol. 4, n°3, pt III, pp.900-938.

VLADISLAVLJEVITCH, Z. (1951). Aperçu critique sur les formules pour la prédétermination de la vitesse moyenne de l'écoulement uniforme, Transactions of the 1<sup>st</sup> Congress International Commission on Irrigation and Drainage, New Delhi, Vol. 2, pp. 405-428.

WEISBACH, J. (1845). Lehrbuch der Ingenieur und Maschinenmechanik, Brunswick, Germany.

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	1
<b>PREMIERE PARTIE: ETAT DE CONNAISSANCE SUR L'ÉCOULEMENT UNIFORME</b>	
<b>Chapitre I: Formules usuelles de l'écoulement uniforme et leur corrélation</b>	
I.1. Introduction	5
I.2. Etablissement de l'écoulement uniforme	5
I.3. Formule de <i>Chézy</i>	9
I.3.1. Détermination du coefficient <i>C</i> de <i>Chézy</i> par la formule de <i>Ganguillet-Kutter</i>	10
I.3.2. Détermination du coefficient <i>C</i> de <i>Chézy</i> par la formule de <i>Bazin</i>	11
I.3.3. Détermination du coefficient <i>C</i> de <i>Chézy</i> par la formule de <i>Powell</i>	11
I.4. Formule de <i>Manning-Strickler</i>	12
I.5. Équation théorique de l'écoulement uniforme	14
I.5.1. Distribution de la vitesse dans un écoulement turbulent	14
I.5.2. Équation de <i>Keulegan</i>	16
I.6. Interprétation théorique du coefficient de rugosité de <i>Manning</i>	18
I.7. Méthode de détermination du coefficient <i>n</i> de <i>Manning</i>	19
I.8. Formule de <i>Darcy-Weisbach</i>	20
I.8.1. Détermination du coefficient de frottement par la formule de <i>Colebrook-White</i>	21
I.8.2. Détermination du coefficient de frottement par la formule de <i>Achour</i>	22
I.8.3. Corrélation entre le coefficient de <i>Chézy</i> et de <i>Darcy-Weisbach</i>	23
I.8.4. Corrélation entre les formules de <i>Darcy-Weisbach</i> et de <i>Manning-Strickler</i>	23
I.9. Conclusion	24
<b>Chapitre II: Calcul de l'écoulement uniforme</b>	
II.1. Introduction	26
II.2. Définitions	26
II.2.1. Conductivité d'une section d'un canal	26
II.2.2. Facteur de section	27
II.3. Application à la conduite circulaire	28
II.3.1. Présentation du diagramme de <i>Moody</i>	29
II.3.2. Calcul du diamètre d'une conduite pleine	30
II.3.3. Exemple d'application	33
II.4. Conclusion	34

## Chapitre III : Méthode *Larhyss* des écoulements uniformes

III.1. Introduction	36
III.2. Calcul de l'écoulement uniforme dans le régime turbulent rugueux	36
III.2.1. Transformation de la formule de <i>Manning-Strickler</i>	36
III.2.2. Application à la conduite circulaire	37
III.3. Calcul de la dimension linéaire dans le domaine de transition	41
III.4. Domaine pratiquement lisse	44
III.5. Relation généralisée au calcul du débit	47
III.5.1. Transformation de la relation de <i>Darcy-Weisbach</i>	47
III.5.2. Transformation de la relation de <i>Colebrook-White</i>	48
III.5.3. Conductivité relative	48
III.6. Approche Expérimentale	49
III.6.1. Introduction	49
III.6.2. Description générale du protocole expérimental	50
III.6.3. Essais et Résultats	51
III.6.3.1. Répartition des débits et du régime d'écoulement	51
III.6.3.2. Procédure d'expérimentation	52
III.6.3.3. Vérification expérimentale de la dimension linéaire $D$ des conduites testées	53
III.7. Conclusion	58

## DEUXIEME PARTIE : CONTRIBUTION AU CALCUL DE L'ÉCOULEMENT UNIFORME

### Chapitre I: Approche théorique au calcul de l'écoulement uniforme

I.1. Introduction	60
I.2. Relation théorique au calcul des conduites dans le domaine d'écoulement turbulent rugueux	60
I.2.1. Transformation de la formule de <i>Nikuradse</i>	60
I.2.2. Application à la conduite circulaire	66
I.3. Modification de l'exposant de <i>Strickler</i>	69
I.3.1. Conductivité	69
I.3.2. Expression du paramètre de dimension $D_{h0}$	73

---

I.3.3. Application à a conduite circulaire	73
I.3.3.1. Paramètres de dimension des conduites circulaires	73
I.3.3.2. Conditions optimales	74
I.3.4. Cas de la conduite circulaire entièrement occupée par l'écoulement	76
I.3.5. Cas de la conduite circulaire partiellement occupée par l'écoulement	78
I.3.6. Relation générale au calcul des conduites en charge et à surface libre	81
I.3.6.1. Calcul de l'erreur relative maximale commise sur le calcul de la conductivité	82
I.4. Conclusion	85
<b>Chapitre II : Vérification de l'approche théorique</b>	
II.1. Introduction	87
II.2. Vérification numérique des diamètres des conduites	87
II.2.1. Etude comparative aux données du laboratoire <i>Larhyss</i>	87
II.2.2. Etude comparative aux données de <i>Dupont</i>	95
II.3. Conclusion	97
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	98
Principales notations	
Références bibliographiques	
Annexe	

Tableau A1: Calcul de  $\Lambda/\varepsilon$  en fonction de  $\varphi=Q/\sqrt{gJ\varepsilon^5}$ , selon la relation (193).

$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$	$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$	$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$
3,6839E+3	10	3,3966 E+9	1750	2,3042E+10	3650
2,4407E+4	20	3,6556 E+9	1800	2,3872E+10	3700
7,3011E+4	30	3,9264 E+9	1850	2,472E+10	3750
1,5826E+5	40	4,2092 E+9	1900	2,5586E+10	3800
2,8781E+5	50	4,5041 E+9	1950	2,6471E+10	3850
1,8276E+6	100	4,8115 E+9	2000	2,7374E+10	3900
5,3578E+6	150	5,1314 E+9	2050	2,8296E+10	3950
1,1467E+7	200	5,4640 E+9	2100	2,9236E+10	4000
2,0666E+7	250	5,8096 E+9	2150	3,0196E+10	4050
3,3418E+7	300	6,1683 E+9	2200	3,1175E+10	4100
5,0146E+7	350	6,5403 E+9	2250	3,2172E+10	4150
7,1249E+7	400	6,9258 E+9	2300	3,319E+10	4200
9,7101E+7	450	7,3249 E+9	2350	3,4226E+10	4250
1,2806E+8	500	7,7379 E+9	2400	3,5283E+10	4300
1,6446E+8	550	8,1649 E+9	2450	3,6359E+10	4350
2,0663E+8	600	8,6060 E+9	2500	3,7455E+10	4400
2,5489E+8	650	9,0615 E+9	2550	3,8571E+10	4450
3,0953E+8	700	9,5315 E+9	2600	3,9707E+10	4500
3,7086E+8	750	1,0016E+10	2650	4,0864E+10	4550
4,3916E+8	800	1,0516E+10	2700	4,2041E+10	4600
5,1470E+8	850	1,103E+10	2750	4,3239E+10	4650
5,9776E+8	900	1,156E+10	2800	4,4457E+10	4700
6,8860E+8	950	1,2105E+10	2850	4,5696E+10	4750
7,8748E+8	1000	1,2666E+10	2900	4,6956E+10	4800
8,9465E+8	1050	1,3242E+10	2950	4,8237E+10	4850
1,0104E+9	1100	1,3834E+10	3000	4,954E+10	4900
1,1349E+9	1150	1,4442E+10	3050	5,0864E+10	4950
1,2684E+9	1200	1,5066E+10	3100	5,2209E+10	5000
1,4111E+9	1250	1,5707E+10	3150	5,3576E+10	5050
1,5634E+9	1300	1,6364E+10	3200	5,4965E+10	5100
1,7254E+9	1350	1,7038E+10	3250	5,6375E+10	5150
1,8973E+9	1400	1,7728E+10	3300	5,7808E+10	5200
2,0793E+9	1450	1,8435E+10	3350	5,9262E+10	5250
2,2717 E+9	1500	1,9159E+10	3400	6,0739E+10	5300
2,4747 E+9	1550	1,9901E+10	3450	6,2239E+10	5350
2,6885 E+9	1600	2,066E+10	3500	6,376E+10	5400
2,9133 E+9	1650	2,1436E+10	3550	6,5305E+10	5450
3,1493 E+9	1700	2,223E+10	3600	6,6872E+10	5500

Tableau A1 (suite et fin): Calcul de  $\Lambda/\varepsilon$  en fonction de  $\varphi=Q/\sqrt{gJ\varepsilon^5}$ , selon la relation (193).

$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$	$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$	$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$
6,8462E+10	5550	1,2738E+11	7050	2,1007E+11	8550
7,0075E+10	5600	1,2974E+11	7100	2,1327E+11	8600
7,1711E+10	5650	1,3212E+11	7150	2,165E+11	8650
7,337E+10	5700	1,3453E+11	7200	2,1976E+11	8700
7,5052E+10	5750	1,3697E+11	7250	2,2305E+11	8750
7,6759E+10	5800	1,3943E+11	7300	2,2637E+11	8800
7,8488E+10	5850	1,4192E+11	7350	2,2972E+11	8850
8,0242E+10	5900	1,4444E+11	7400	2,331E+11	8900
8,2019E+10	5950	1,4698E+11	7450	2,3651E+11	8950
8,382E+10	6000	1,4956E+11	7500	2,3995E+11	9000
8,5645E+10	6050	1,5216E+11	7550	2,4342E+11	9050
8,7494E+10	6100	1,5478E+11	7600	2,4692E+11	9100
8,9368E+10	6150	1,5744E+11	7650	2,5045E+11	9150
9,1266E+10	6200	1,6012E+11	7700	2,5401E+11	9200
9,3189E+10	6250	1,6283E+11	7750	2,5761E+11	9250
9,5136E+10	6300	1,6557E+11	7800	2,6123E+11	9300
9,7108E+10	6350	1,6834E+11	7850	2,6489E+11	9350
9,9105E+10	6400	1,7113E+11	7900	2,6857E+11	9400
1,0113E+11	6450	1,7395E+11	7950	2,7229E+11	9450
1,0317E+11	6500	1,768E+11	8000	2,7604E+11	9500
1,0525E+11	6550	1,7968E+11	8050	2,7982E+11	9550
1,0734E+11	6600	1,8259E+11	8100	2,8364E+11	9600
1,0947E+11	6650	1,8553E+11	8150	2,8748E+11	9650
1,1161E+11	6700	1,885E+11	8200	2,9136E+11	9700
1,1379E+11	6750	1,9149E+11	8250	2,9527E+11	9750
1,1599E+11	6800	1,9451E+11	8300	2,9921E+11	9800
1,1821E+11	6850	1,9757E+11	8350	3,0318E+11	9850
1,2047E+11	6900	2,0065E+11	8400	3,0718E+11	9900
1,2274E+11	6950	2,0376E+11	8450	3,1122E+11	9950
1,2505E+11	7000	2,069E+11	8500	3,1529E+11	10000

Tableau A2 : Calcul de  $\Lambda/\varepsilon$  en fonction de  $\varphi=Q/\sqrt{gJ\varepsilon^5}$ , selon la relation (227).

$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$	$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$	$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$
3,6240E+03	10	3,3442E+09	1750	2,2687E+10	3650
2,4016E+04	20	3,5991E+09	1800	2,3504E+10	3700
7,1847E+04	30	3,8658E+09	1850	2,4339E+10	3750
1,5574E+05	40	4,1442E+09	1900	2,5192E+10	3800
2,8325E+05	50	4,4346E+09	1950	2,6063E+10	3850
1,7988E+06	100	4,7372E+09	2000	2,6952E+10	3900
5,2738E+06	150	5,0522E+09	2050	2,7860E+10	3950
1,1287E+07	200	5,3797E+09	2100	2,8786E+10	4000
2,0343E+07	250	5,7199E+09	2150	2,9731E+10	4050
3,2896E+07	300	6,0731E+09	2200	3,0695E+10	4100
4,9365E+07	350	6,4394E+09	2250	3,1677E+10	4150
7,0140E+07	400	6,8189E+09	2300	3,2679E+10	4200
9,5590E+07	450	7,2119E+09	2350	3,3699E+10	4250
1,2607E+08	500	7,6185E+09	2400	3,4740E+10	4300
1,6190E+08	550	8,0389E+09	2450	3,5799E+10	4350
2,0342E+08	600	8,4732E+09	2500	3,6878E+10	4400
2,5093E+08	650	8,9217E+09	2550	3,7977E+10	4450
3,0473E+08	700	9,3845E+09	2600	3,9096E+10	4500
3,6510E+08	750	9,8617E+09	2650	4,0235E+10	4550
4,3234E+08	800	1,0354E+10	2700	4,1394E+10	4600
5,0672E+08	850	1,0860E+10	2750	4,2573E+10	4650
5,8849E+08	900	1,1382E+10	2800	4,3773E+10	4700
6,7793E+08	950	1,1918E+10	2850	4,4993E+10	4750
7,7528E+08	1000	1,2470E+10	2900	4,6234E+10	4800
8,8080E+08	1050	1,3038E+10	2950	4,7495E+10	4850
9,9472E+08	1100	1,3621E+10	3000	4,8778E+10	4900
1,1173E+09	1150	1,4220E+10	3050	5,0081E+10	4950
1,2487E+09	1200	1,4834E+10	3100	5,1406E+10	5000
1,3893E+09	1250	1,5465E+10	3150	5,2752E+10	5050
1,5392E+09	1300	1,6112E+10	3200	5,4119E+10	5100
1,6987E+09	1350	1,6775E+10	3250	5,5508E+10	5150
1,8679E+09	1400	1,7455E+10	3300	5,6918E+10	5200
2,0471E+09	1450	1,8151E+10	3350	5,8351E+10	5250
2,2366E+09	1500	1,8864E+10	3400	5,9805E+10	5300
2,4365E+09	1550	1,9594E+10	3450	6,1281E+10	5350
2,6469E+09	1600	2,0342E+10	3500	6,2780E+10	5400
2,8683E+09	1650	2,1106E+10	3550	6,4300E+10	5450
3,1006E+09	1700	2,1888E+10	3600	6,5843E+10	5500

Tableau A2 (suite et fin) : Calcul de  $\Lambda/\varepsilon$  en fonction de  $\varphi=Q/\sqrt{gJ\varepsilon^5}$ , selon la relation (227).

$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$	$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$	$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$
6,7409E+10	5550	1,2542E+11	7050	2,0685E+11	8550
6,8997E+10	5600	1,2774E+11	7100	2,1000E+11	8600
7,0608E+10	5650	1,3009E+11	7150	2,1318E+11	8650
7,2242E+10	5700	1,3246E+11	7200	2,1639E+11	8700
7,3898E+10	5750	1,3486E+11	7250	2,1962E+11	8750
7,5578E+10	5800	1,3729E+11	7300	2,2289E+11	8800
7,7281E+10	5850	1,3974E+11	7350	2,2619E+11	8850
7,9008E+10	5900	1,4222E+11	7400	2,2952E+11	8900
8,0758E+10	5950	1,4473E+11	7450	2,3288E+11	8950
8,2531E+10	6000	1,4726E+11	7500	2,3626E+11	9000
8,4328E+10	6050	1,4982E+11	7550	2,3968E+11	9050
8,6149E+10	6100	1,5241E+11	7600	2,4313E+11	9100
8,7994E+10	6150	1,5502E+11	7650	2,4661E+11	9150
8,9863E+10	6200	1,5766E+11	7700	2,5011E+11	9200
9,1756E+10	6250	1,6033E+11	7750	2,5365E+11	9250
9,3673E+10	6300	1,6303E+11	7800	2,5722E+11	9300
9,5615E+10	6350	1,6575E+11	7850	2,6082E+11	9350
9,7581E+10	6400	1,6850E+11	7900	2,6445E+11	9400
9,9572E+10	6450	1,7128E+11	7950	2,6811E+11	9450
1,0159E+11	6500	1,7409E+11	8000	2,7181E+11	9500
1,0363E+11	6550	1,7692E+11	8050	2,7553E+11	9550
1,0569E+11	6600	1,7979E+11	8100	2,7928E+11	9600
1,0778E+11	6650	1,8268E+11	8150	2,8307E+11	9650
1,0991E+11	6700	1,856E+11	8200	2,8688E+11	9700
1,1204E+11	6750	1,8855E+11	8250	2,9073E+11	9750
1,1421E+11	6800	1,9153E+11	8300	2,9461E+11	9800
1,1640E+11	6850	1,9453E+11	8350	2,9852E+11	9850
1,1862E+11	6900	1,9757E+11	8400	3,0247E+11	9900
1,2086E+11	6950	2,0063E+11	8450	3,0644E+11	9950
1,2313E+11	7000	2,0372E+11	8500	3,1045E+11	10000

Tableau A3 : calcul de  $\Lambda$  par la relation (230) pour  $\xi=0,1$ .

$Q/\sqrt{J}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)				
	$\varepsilon=0,1$ mm	$\varepsilon=0,2$ mm	$\varepsilon=0,3$ mm	$\varepsilon=0,4$ mm	$\varepsilon=0,5$ mm
0,001	0,01241173	0,01293529	0,01327821	0,01354082	0,01375687
0,005	0,02281329	0,02369421	0,0242659	0,0247008	0,02505673
0,01	0,02967634	0,03078185	0,03149675	0,03203925	0,03248233
0,05	0,05475028	0,05663505	0,05784489	0,05875819	0,05950104
0,1	0,07132391	0,07370128	0,07522297	0,07636936	0,07730032
0,25	0,10122987	0,10446796	0,10653325	0,10808534	0,10934328
0,5	0,13198557	0,13608224	0,13868862	0,14064394	0,14222652
1	0,17214279	0,17733177	0,18062533	0,18309211	0,18508607
1,5	0,20111081	0,20707231	0,2108512	0,21367889	0,21596292
2	0,2245888	0,23116868	0,23533573	0,23845191	0,24096771
2,5	0,24468002	0,25178427	0,25628029	0,25964086	0,26235294
3	0,26242878	0,26999295	0,27477737	0,27835211	0,28123618
3,5	0,27844026	0,28641689	0,29145984	0,29522653	0,29826469
4	0,29310093	0,30145332	0,30673172	0,31067318	0,31385162
4,5	0,30667166	0,31537343	0,3208688	0,3249713	0,32827897
5	0,31935078	0,32837176	0,33406893	0,33832116	0,34174898
5,5	0,33127034	0,34059326	0,34647948	0,35087197	0,35441232
6	0,34254168	0,35214921	0,3582136	0,36273825	0,36638463
6,5	0,35325001	0,36312716	0,3693603	0,37401012	0,37775691
7	0,36346378	0,37359742	0,37999106	0,38475991	0,38860218
7,5	0,37323889	0,38361739	0,39016424	0,39504671	0,39898009
8	0,38262166	0,39323467	0,39992823	0,40491947	0,40894009
8,5	0,391651	0,4024892	0,40932361	0,41441929	0,41852365
9	0,40035991	0,41141487	0,41838485	0,42358103	0,42776598

Tableau A4 : calcul de  $\Lambda$  par la relation (230) pour  $\xi=0,2$ .

$Q/\sqrt{J}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)				
	$\varepsilon=0,1$ mm	$\varepsilon=0,2$ mm	$\varepsilon=0,3$ mm	$\varepsilon=0,4$ mm	$\varepsilon=0,5$ mm
0,001	0,01241203	0,01292746	0,01326448	0,01352226	0,01373414
0,005	0,02282506	0,02369381	0,02425678	0,02468463	0,02503449
0,01	0,02969726	0,03078823	0,03149278	0,0320269	0,03246282
0,05	0,05481055	0,05667312	0,05786733	0,05876808	0,05950026
0,1	0,07141341	0,07376405	0,07526699	0,07639839	0,07731661
0,25	0,10137616	0,10457999	0,10662137	0,10815441	0,10939621
0,5	0,1321941	0,13624936	0,13882693	0,14075935	0,4232257
1	0,17243673	0,17757557	0,18083436	0,18327356	0,18524426
1,5	0,20146861	0,20737399	0,21111403	0,21391094	0,21616905
2	0,22499948	0,23151854	0,23564356	0,23872646	0,24121425
2,5	0,24513664	0,25217617	0,25662748	0,25995269	0,26263502
3	0,26292647	0,27042253	0,27515993	0,27869751	0,2815503
3,5	0,27897536	0,28688086	0,29187475	0,29560267	0,29860823
4	0,29367055	0,30194909	0,30717658	0,31107783	0,31422246
4,5	0,30727647	0,3158989	0,32134167	0,32540264	0,32867539
5	0,31998283	0,32892518	0,33456818	0,33877766	0,34216996
5,5	0,33193099	0,34117313	0,34700373	0,35135232	0,3548558
6	0,34322949	0,35275424	0,35876164	0,36324134	0,36684995
6,5	0,35396374	0,36375622	0,36993109	0,37453495	0,37824313
7	0,36420233	0,37424951	0,38058366	0,38530561	0,38910848
7,5	0,37400129	0,38429163	0,39077784	0,39566125	0,39950572
8	0,38340703	0,39393025	0,40056206	0,40550463	0,40948438
8,5	0,39245854	0,4032054	0,40997701	0,41502319	0,419086
9	0,4011889	0,41215103	0,41905719	0,42420309	0,42834583

Tableau A5 : calcul de  $\Lambda$  par la relation (230) pour  $\xi=0,3$ .

$Q/\sqrt{J}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)				
	$\varepsilon=0,1$ mm	$\varepsilon=0,2$ mm	$\varepsilon=0,3$ mm	$\varepsilon=0,4$ mm	$\varepsilon=0,5$ mm
0,001	0,01241254	0,01292436	0,01325877	0,01351442	0,01372445
0,005	0,02283101	0,02369434	0,02425345	0,02467817	0,02502534
0,01	0,02970751	0,03079201	0,03149195	0,03202237	0,0324551
0,05	0,05483918	0,05669185	0,0578791	0,05877428	0,05950171
0,1	0,07145563	0,07379436	0,07528894	0,07641367	0,07732623
0,25	0,10144473	0,10463328	0,106664	0,10818855	0,10942318
0,5	0,13229151	0,13632827	0,138893	0,14081521	0,14236982
1	0,17257366	0,1776901	0,18093337	0,18336028	0,1853206
1,5	0,20163505	0,20751536	0,21123806	0,21402125	0,21626779
2	0,22519035	0,23168224	0,23578848	0,23885654	0,24133184
2,5	0,24534873	0,25235933	0,25679068	0,26010011	0,26276917
3	0,26311575	0,27062313	0,27533954	0,27886053	0,28169938
3,5	0,27922367	0,28709739	0,29206936	0,29577998	0,29877099
4	0,2939348	0,30218033	0,30738508	0,31126839	0,31439793
4,5	0,30755557	0,31614388	0,32156316	0,32560558	0,32886276
5	0,32027588	0,32918308	0,33480189	0,33899228	0,34236814
5,5	0,33223723	0,34144327	0,34724901	0,35157802	0,35506504
6	0,34354826	0,35303601	0,35901795	0,36347758	0,36706934
6,5	0,35429447	0,3640491	0,37019793	0,37478127	0,37847223
7	0,36454451	0,37455303	0,38086061	0,38556161	0,38934689
7,5	0,37435446	0,38460539	0,3910645	0,3958778	0,39975312
8	0,3837708	0,39425388	0,4008581	0,40577893	0,40974044
8,5	0,39283254	0,40353855	0,4102821	0,41530618	0,41935044
9	0,40157278	0,41249341	0,41937105	0,42449449	0,42861838

Tableau A6 : calcul de  $\Lambda$  par la relation (230) pour  $\xi=0,4$ .

$Q/\sqrt{J}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)				
	$\varepsilon=0,1$ mm	$\varepsilon=0,2$ mm	$\varepsilon=0,3$ mm	$\varepsilon=0,4$ mm	$\varepsilon=0,5$ mm
0,001	0,01241285	0,012923	0,0132562	0,01351085	0,01372002
0,005	0,02283393	0,02369475	0,02425206	0,02467532	0,02502124
0,01	0,02971249	0,03079397	0,03149178	0,03202046	0,03245172
0,05	0,0548529	0,05670096	0,05788497	0,05877755	0,05950277
0,1	0,0714758	0,07380898	0,07529967	0,0764213	0,07733122
0,25	0,10147741	0,10465883	0,10668458	0,10820518	0,10943647
0,5	0,13233785	0,136366	0,13892473	0,14084219	0,14239278
1	0,17263872	0,17774472	0,18098075	0,18340193	0,18535743
1,5	0,20171409	0,20758271	0,21129732	0,21407411	0,21631527
2	0,22528095	0,23176017	0,23585767	0,23891881	0,24138828
2,5	0,24544937	0,25244649	0,25686854	0,26017061	0,26283348
3	0,26326713	0,27071856	0,27542518	0,27893844	0,28177079
3,5	0,27934146	0,28720036	0,29216211	0,29586467	0,2988489
4	0,29406013	0,30229027	0,30748442	0,31135936	0,31448187
4,5	0,30768793	0,31626033	0,32166865	0,32570243	0,32895235
5	0,32041485	0,32930566	0,33491318	0,33909467	0,34246306
5,5	0,33238243	0,34157163	0,34736579	0,35168566	0,35516501
6	0,34369939	0,35316988	0,35913995	0,36359022	0,36717413
6,5	0,35445126	0,36418823	0,37032493	0,3748987	0,37858162
7	0,36470672	0,37469721	0,38099239	0,38568366	0,38946071
7,5	0,37452187	0,38475441	0,39120089	0,39600424	0,3998712
8	0,38394322	0,39440757	0,40099892	0,40590963	0,40986263
8,5	0,39300979	0,40369676	0,41042722	0,41544099	0,4194766
9	0,40175472	0,41265598	0,41952033	0,42463329	0,4287484

Tableau A7 : calcul de  $\Lambda$  par la relation (230) pour  $\xi=0,5$ .

$Q/\sqrt{J} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$\Lambda \text{ (m)}$				
	$\varepsilon=0,1 \text{ mm}$	$\varepsilon=0,2 \text{ mm}$	$\varepsilon=0,3 \text{ mm}$	$\varepsilon=0,4 \text{ mm}$	$\varepsilon=0,5 \text{ mm}$
0,001	0,01241296	0,01292261	0,01325546	0,01350983	0,01371875
0,005	0,0228348	0,02369489	0,02425167	0,02467451	0,02502007
0,01	0,02971396	0,03079457	0,03149175	0,03201994	0,03245077
0,05	0,05485693	0,05670365	0,05788672	0,05877855	0,05950313
0,1	0,07148172	0,07381329	0,07530285	0,07642357	0,07733273
0,25	0,10148699	0,10466634	0,10669065	0,1082101	0,10944042
0,5	0,13235143	0,13637707	0,13893407	0,14085015	0,14239957
1	0,17265778	0,17776074	0,18099468	0,18341419	0,18536828
1,5	0,20173724	0,20760246	0,21131472	0,21408966	0,21632925
2	0,22530748	0,23178302	0,23587797	0,2389371	0,24140488
2,5	0,24547884	0,25247204	0,25689138	0,26019132	0,26285239
3	0,26329922	0,27074652	0,2754503	0,27896132	0,28179178
3,5	0,27937594	0,28723053	0,29218931	0,29588953	0,29887179
4	0,29409682	0,30232249	0,30751355	0,31138606	0,31450653
4,5	0,30772667	0,31629445	0,32169958	0,32573085	0,32897866
5	0,32045552	0,32934156	0,33494581	0,33912472	0,34249093
5,5	0,33242493	0,34160923	0,34740003	0,35171724	0,35519436
6	0,34374362	0,35320909	0,35917571	0,36362327	0,36720489
6,5	0,35449715	0,36422899	0,37036215	0,37493314	0,37861373
7	0,36475419	0,37473944	0,38103102	0,38571941	0,38949412
7,5	0,37457086	0,38479806	0,39124086	0,39604132	0,39990585
8	0,38399368	0,39445258	0,4010402	0,40594795	0,40989849
8,5	0,39306166	0,40374309	0,41046975	0,41548052	0,41951362
9	0,40180796	0,41270358	0,41956407	0,42467399	0,42878655

Tableau A8 : calcul de  $\Lambda$  par la relation (230) pour  $\xi=0,6$ .

$Q/\sqrt{J} (m^3/s)$	$\Lambda (m)$				
	$\varepsilon=0,1 mm$	$\varepsilon=0,2 mm$	$\varepsilon=0,3 mm$	$\varepsilon=0,4 mm$	$\varepsilon=0,5 mm$
0,001	0,01241286	0,01292296	0,01325614	0,01351076	0,01371991
0,005	0,022834	0,02369476	0,02425203	0,02467525	0,02502113
0,01	0,02971261	0,03079402	0,03149178	0,03202042	0,03245164
0,05	0,05485325	0,0567012	0,05788512	0,05877764	0,0595028
0,1	0,07147632	0,07380935	0,07529995	0,0764215	0,07733135
0,25	0,10147825	0,10465949	0,10668511	0,10820561	0,10943681
0,5	0,13233904	0,13636697	0,13892555	0,14084289	0,14239338
1	0,17264039	0,17774612	0,18098197	0,18340301	0,18535838
1,5	0,20171612	0,20758444	0,21139884	0,21407547	0,2163165
2	0,22528327	0,23176218	0,23585944	0,23892041	0,24138973
2,5	0,2454452	0,25244873	0,25687054	0,26017242	0,26283514
3	0,26326994	0,27072101	0,27544274	0,27894044	0,28177263
3,5	0,27934448	0,287203	0,29216449	0,29586685	0,29885091
4	0,29406334	0,3022931	0,30748697	0,3113617	0,31448403
4,5	0,30769133	0,31626332	0,32167136	0,32570492	0,32895466
5	0,32041841	0,3293088	0,33491604	0,33909731	0,3424655
5,5	0,33238616	0,34157492	0,34736879	0,35168843	0,35516758
6	0,34370327	0,35317331	0,35914308	0,36359312	0,36717682
6,5	0,35445528	0,3641918	0,37032819	0,37490172	0,37858443
7	0,36471088	0,37470091	0,38099578	0,38568676	0,38946364
7,5	0,37452617	0,38475824	0,39120439	0,39600749	0,39987423
8	0,38394764	0,39441152	0,40100254	0,40591298	0,40986577
8,5	0,39301434	0,40370082	0,41043095	0,41544445	0,41947984
9	0,40175938	0,41266015	0,41952416	0,42463686	0,42875174

Tableau A9 : calcul de  $\Lambda$  par la relation (230) pour  $\xi=0,7$ .

$Q/\sqrt{J} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$\Lambda \text{ (m)}$				
	$\varepsilon=0,1 \text{ mm}$	$\varepsilon=0,2 \text{ mm}$	$\varepsilon=0,3 \text{ mm}$	$\varepsilon=0,4 \text{ mm}$	$\varepsilon=0,5 \text{ mm}$
0,001	0,0124126	0,01292404	0,01325818	0,0135136	0,01372344
0,005	0,02283166	0,02369443	0,02425313	0,02467751	0,0250244
0,01	0,02970863	0,03079244	0,0314919	0,03202192	0,03245433
0,05	0,05484227	0,0566939	0,05788041	0,058775	0,05950193
0,1	0,07146017	0,07379764	0,07529135	0,07641537	0,07732733
0,25	0,1014521	0,10463903	0,10666862	0,10819228	0,10942615
0,5	0,13230196	0,13633677	0,13890014	0,14082128	0,14237497
1	0,17258833	0,17770241	0,18094404	0,18336965	0,18532888
1,5	0,20165289	0,20753054	0,21125141	0,21403315	0,21627847
2	0,22521079	0,23169981	0,23580407	0,23887056	0,24134454
2,5	0,24537144	0,25237899	0,25680823	0,26011599	0,26278364
3	0,26318225	0,27064465	0,27535884	0,27887809	0,28171546
3,5	0,27925025	0,28712061	0,29209027	0,29579907	0,29878854
4	0,29396308	0,30220513	0,30740748	0,31128889	0,31441684
4,5	0,30758544	0,31617015	0,32158694	0,32562741	0,32888294
5	0,32030725	0,32921073	0,33482698	0,33901536	0,34238952
5,5	0,33227	0,34147222	0,34727535	0,35160228	0,35508756
6	0,34358237	0,35306621	0,35904546	0,36350297	0,36709295
6,5	0,35432986	0,36408049	0,37022657	0,37480774	0,37849685
7	0,36458113	0,37458556	0,38089033	0,38558912	0,38937254
7,5	0,37439225	0,38463901	0,39109526	0,39590631	0,39977973
8	0,38380972	0,39428856	0,40088986	0,4058084	0,40976798
8,5	0,39287255	0,40357425	0,41031483	0,41533657	0,41937887
9	0,40161385	0,41253009	0,41940472	0,42452578	0,42864769

Tableau A10 : calcul de  $\Lambda$  par la relation (230) pour  $\xi=0,8$ .

$Q/\sqrt{J} \text{ (m}^3/\text{s)}$	$\Lambda \text{ (m)}$				
	$\varepsilon=0,1 \text{ mm}$	$\varepsilon=0,2 \text{ mm}$	$\varepsilon=0,3 \text{ mm}$	$\varepsilon=0,4 \text{ mm}$	$\varepsilon=0,5 \text{ mm}$
0,001	0,01241222	0,01292607	0,01326195	0,01351879	0,01372986
0,005	0,02282761	0,02369399	0,02425527	0,02468174	0,02503042
0,01	0,02970168	0,03078981	0,03149234	0,03202484	0,03245936
0,05	0,05482296	0,05668119	0,05787235	0,05877066	0,05950075
0,1	0,07143173	0,07377716	0,07527643	0,07640491	0,07732065
0,25	0,10140595	0,10460308	0,10663979	0,10816911	0,10940777
0,5	0,13223644	0,1362836	0,13885554	0,14078349	0,14234293
1	0,17249628	0,17762531	0,18087729	0,18331111	0,18527726
1,5	0,20154101	0,20743541	0,21116785	0,21395875	0,21621179
2	0,22508252	0,23158968	0,23570647	0,23878287	0,24126518
2,5	0,24522892	0,25225578	0,25669835	0,26001664	0,26269315
3	0,263027	0,27050973	0,27523794	0,27876825	0,28161494
3,5	0,27908341	0,286975	0,29195928	0,29567963	0,29867881
4	0,29378555	0,30204963	0,30726716	0,31116055	0,31429857
4,5	0,30739794	0,31600543	0,3214379	0,32549075	0,32875668
5	0,32011037	0,32903733	0,33466973	0,33887085	0,34225572
5,5	0,33206428	0,34129061	0,34711032	0,35145033	0,3549466
6	0,34336823	0,35287678	0,35887303	0,36334394	0,36694517
6,5	0,3541077	0,3638836	0,37004706	0,37464194	0,37834247
7	0,36435128	0,37438153	0,38070404	0,38541681	0,38921197
7,5	0,37415502	0,3844281	0,39090244	0,39572774	0,39961313
8	0,38356538	0,39407102	0,40069074	0,40562379	0,40959556
8,5	0,39262135	0,40335032	0,41010964	0,41514613	0,41920082
9	0,40135601	0,41229996	0,41919364	0,42432969	0,42846418

Tableau A11 : calcul de  $\Lambda$  par la relation (230) pour  $\xi=0,9$ .

$Q/\sqrt{J} (m^3/s)$	$\Lambda (m)$				
	$\varepsilon=0,1 mm$	$\varepsilon=0,2 mm$	$\varepsilon=0,3 mm$	$\varepsilon=0,4 mm$	$\varepsilon=0,5 mm$
0,001	0,01241181	0,01292975	0,0132686	0,01352787	0,01374103
0,005	0,02282119	0,0236937	0,02425937	0,02468939	0,02504112
0,01	0,02969048	0,03078595	0,0314937	0,03203041	0,03246854
0,05	0,05479134	0,05666077	0,05785981	0,05876445	0,05949991
0,1	0,07138496	0,07374388	0,07525262	0,07638865	0,07731081
0,25	0,1013298	0,10454424	0,10659302	0,10813195	0,10937875
0,5	0,13212814	0,13619621	0,1387827	0,14072221	0,14229142
1	0,17234387	0,17749824	0,18076779	0,18321553	0,18519342
1,5	0,20135566	0,20727842	0,21103048	0,21383692	0,21610305
2	0,22486989	0,23140778	0,23554581	0,23863901	0,24113548
2,5	0,24499259	0,25205217	0,25651732	0,25985347	0,26254501
3	0,26276949	0,27028666	0,27503862	0,2785877	0,28145018
3,5	0,27880662	0,28673416	0,29174324	0,29548317	0,29849881
4	0,29349095	0,30179237	0,30703563	0,31094933	0,31410443
4,5	0,30708675	0,31573283	0,3211919	0,32526572	0,32854928
5	0,3197836	0,32875031	0,33441009	0,33863281	0,34203582
5,5	0,33172276	0,34098993	0,34683776	0,35119995	0,35471484
6	0,34301272	0,35256312	0,35858817	0,36308179	0,3667021
6,5	0,35373882	0,36355754	0,36975046	0,37436855	0,37808868
7	0,36396961	0,37404358	0,38039616	0,38513263	0,3889477
7,5	0,37376107	0,38407873	0,39058372	0,39543318	0,39933885
8	0,38315959	0,39371064	0,40036157	0,40531922	0,40931162
8,5	0,39220413	0,4029793	0,40977036	0,41483187	0,41890754
9	0,40092775	0,41191864	0,41884457	0,42400604	0,42816185

Tableau A12 : Calcul  $\Lambda/\varepsilon$  en fonction de  $\varphi=Q/\sqrt{gJ\varepsilon^5}$ , selon la relation (234).

$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$	$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$	$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$
3,6529E+3	10	3,3325E+9	1750	2,2593E+10	3650
2,4135E+4	20	3,5865E+9	1800	2,3406E+10	3700
7,2105E+4	30	3,8520E+9	1850	2,4238E+10	3750
1,5617E+5	40	4,1294E+9	1900	2,5087E+10	3800
2,8386E+5	50	4,4186E+9	1950	2,5954E+10	3850
1,7998E+6	100	4,7200E+9	2000	2,6839E+10	3900
5,2725E+6	150	5,0337E+9	2050	2,7742E+10	3950
1,1279E+7	200	5,3599E+9	2100	2,8664E+10	4000
2,0321E+7	250	5,6988E+9	2150	2,9605E+10	4050
3,2851E+7	300	6,0506E+9	2200	3,0564E+10	4100
4,9286E+7	350	6,4153E+9	2250	3,1542E+10	4150
7,0015E+7	400	6,7933E+9	2300	3,2539E+10	4200
9,5404E+7	450	7,1847E+9	2350	3,3555E+10	4250
1,2580E+8	500	7,5896E+9	2400	3,459E+10	4300
1,6154E+8	550	8,0082E+9	2450	3,5645E+10	4350
2,0295E+8	600	8,4408E+9	2500	3,6719E+10	4400
2,5032E+8	650	8,8874E+9	2550	3,7813E+10	4450
3,0396E+8	700	9,3482E+9	2600	3,8927E+10	4500
3,6416E+8	750	9,8234E+9	2650	4,006E+10	4550
4,3119E+8	800	1,0313E+10	2700	4,1214E+10	4600
5,0533E+8	850	1,0818E+10	2750	4,2388E+10	4650
5,8685E+8	900	1,1337E+10	2800	4,3582E+10	4700
6,7599E+8	950	1,1871E+10	2850	4,4796E+10	4750
7,7302E+8	1000	1,2421E+10	2900	4,6031E+10	4800
8,7818E+8	1050	1,2986E+10	2950	4,7287E+10	4850
9,9172E+8	1100	1,3566E+10	3000	4,8563E+10	4900
1,1139E+9	1150	1,4163E+10	3050	4,9861E+10	4950
1,2449E+9	1200	1,4775E+10	3100	5,1179E+10	5000
1,3849E+9	1250	1,5402E+10	3150	5,2518E+10	5050
1,5343E+9	1300	1,6047E+10	3200	5,3879E+10	5100
1,6932E+9	1350	1,6707E+10	3250	5,5262E+10	5150
1,8618E+9	1400	1,7384E+10	3300	5,6665E+10	5200
2,0404E+9	1450	1,8077E+10	3350	5,8091E+10	5250
2,2291E+9	1500	1,8787E+10	3400	5,9538E+10	5300
2,4282E+9	1550	1,9514E+10	3450	6,1007E+10	5350
2,6379E+9	1600	2,0258E+10	3500	6,2499E+10	5400
2,8584E+9	1650	2,1019E+10	3550	6,4012E+10	5450
3,0898E+9	1700	2,1797E+10	3600	6,5548E+10	5500

Tableau A12 (suite et fin) : Calcul  $\Lambda/\varepsilon$  en fonction de  $\varphi=Q/\sqrt{gJ\varepsilon^5}$ , selon la relation (234).

$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$	$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$	$\varphi$	$\Lambda/\varepsilon$
6,7106E+10	5550	1,2483E+11	7050	2,0585E+11	8550
6,8686E+10	5600	1,2714E+11	7100	2,0898E+11	8600
7,0289E+10	5650	1,2948E+11	7150	2,1215E+11	8650
7,1915E+10	5700	1,3184E+11	7200	2,1534E+11	8700
7,3564E+10	5750	1,3423E+11	7250	2,1856E+11	8750
7,5236E+10	5800	1,3664E+11	7300	2,2181E+11	8800
7,6931E+10	5850	1,3908E+11	7350	2,251E+11	8850
7,8649E+10	5900	1,4155E+11	7400	2,2841E+11	8900
8,039E+10	5950	1,4404E+11	7450	2,3175E+11	8950
8,2155E+10	6000	1,4656E+11	7500	2,3512E+11	9000
8,3944E+10	6050	1,4911E+11	7550	2,3852E+11	9050
8,5756E+10	6100	1,5168E+11	7600	2,4195E+11	9100
8,7592E+10	6150	1,5428E+11	7650	2,4541E+11	9150
8,9451E+10	6200	1,5691E+11	7700	2,489E+11	9200
9,1335E+10	6250	1,5957E+11	7750	2,5242E+11	9250
9,3243E+10	6300	1,6225E+11	7800	2,5597E+11	9300
9,5175E+10	6350	1,6496E+11	7850	2,5955E+11	9350
9,7132E+10	6400	1,677E+11	7900	2,6316E+11	9400
9,9113E+10	6450	1,7047E+11	7950	2,668E+11	9450
1,0112E+11	6500	1,7326E+11	8000	2,7048E+11	9500
1,0315E+11	6550	1,7608E+11	8050	2,7418E+11	9550
1,052E+11	6600	1,7893E+11	8100	2,7792E+11	9600
1,0728E+11	6650	1,8181E+11	8150	2,8168E+11	9650
1,0939E+11	6700	1,8471E+11	8200	2,8548E+11	9700
1,1152E+11	6750	1,8765E+11	8250	2,8931E+11	9750
1,1367E+11	6800	1,9061E+11	8300	2,9317E+11	9800
1,1586E+11	6850	1,936E+11	8350	2,9706E+11	9850
1,1806E+11	6900	1,9662E+11	8400	3,0098E+11	9900
1,2029E+11	6950	1,9967E+11	8450	3,0493E+11	9950
1,2255E+11	7000	2,0274E+11	8500	3,0892E+11	10000

Tableau A13 : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=49\text{mm}$ ,  $T=35^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,2683\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=2,07\text{ m}$ 

$\Delta h(m)$	0,0065	0,008	0,009	0,012	0,013	0,014	0,015	0,019	0,021	0,022	0,024	0,025
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,00172	0,00191	0,00202	0,00234	0,00244	0,00253	0,00262	0,00296	0,00311	0,00319	0,00333	0,00340
$\Delta H(m)$	0,075	0,09	0,11	0,13	0,135	0,165	0,17	0,22	0,23	0,24	0,26	0,29
$J=\Delta H/L$	0,0362	0,0435	0,0531	0,0628	0,0652	0,0797	0,0821	0,1063	0,1111	0,1159	0,1256	0,1401
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,00901	0,00914	0,00878	0,00935	0,00956	0,00898	0,00916	0,00908	0,00934	0,00936	0,00940	0,00909
$\varepsilon (m)$	6,1E-04	5,6E-04	7,2E-04	5,0E-04	4,3E-04	6,4E-04	5,7E-04	6,0E-04	5,1E-04	5,0E-04	4,9E-04	6,0E-04
$\varepsilon/D$	1,2E-02	1,1E-02	1,5E-02	1,0E-02	8,9E-03	1,3E-02	1,2E-02	1,2E-02	1,0E-02	1,0E-02	1,0E-02	1,2E-02
$R$	6,1E+04	6,8E+04	7,2E+04	8,4E+04	8,7E+04	9,1E+04	9,4E+04	1,1E+05	1,1E+05	1,1E+05	1,2E+05	1,2E+05
$f_r$	0,0409	0,0397	0,0434	0,0381	0,0364	0,0416	0,0399	0,0407	0,0384	0,0382	0,0379	0,0407
$f_{\text{achour}}$	0,0421	0,0409	0,0443	0,0391	0,0374	0,0424	0,0408	0,0415	0,0392	0,0390	0,0387	0,0414
$\lambda$	1,0059	1,0057	1,0044	1,0053	1,0057	1,0040	1,0043	1,0037	1,0040	1,0040	1,0039	1,0033
Observation	Transition											
$\Lambda (m)$	0,031664	0,031668	0,031705	0,031681	0,031669	0,031718	0,031710	0,031728	0,031717	0,031719	0,031721	0,031741
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,048733	0,048740	0,048798	0,048760	0,048741	0,048817	0,048805	0,048832	0,048816	0,048818	0,048821	0,048852
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,049019	0,049018	0,049015	0,049016	0,049017	0,049013	0,049014	0,049012	0,049013	0,049012	0,049012	0,049010
$D_{\text{réel}}(m)$	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
$\Delta D/D (\%)$	0,038	0,037	0,030	0,033	0,035	0,027	0,028	0,024	0,026	0,025	0,025	0,021
$\varphi$	3,1E+5	3,9E+5	2E+5	5,4E+5	7,8E+5	2,8E+5	3,8E+5	3,2E+5	5,1E+5	5,3E+5	5,6E+5	3,3E+5
$\Lambda/\varepsilon$	51,36	55,74	43,40	63,22	72,58	48,87	55,14	51,95	61,82	62,66	64,19	52,06
$\Lambda(m)$	0,031296	0,031351	0,031227	0,031436	0,031498	0,031319	0,031386	0,031367	0,031460	0,031469	0,031484	0,031381
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,048168	0,048252	0,048061	0,048383	0,048479	0,048202	0,048306	0,048277	0,048419	0,048433	0,048457	0,048298
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,048450	0,048527	0,048275	0,048638	0,048753	0,048395	0,048512	0,048454	0,048614	0,048626	0,048647	0,048455
$D_{\text{réel}}(m)$	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
$\Delta D/D (\%)$	1,14	0,98	1,50	0,74	0,51	1,25	1,01	1,13	0,79	0,77	0,73	1,13

Tableau A13 (suite) : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=49\text{mm}$ ,  $T=35^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,2683\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=2,07\text{ m}$ 

$\Delta h(m)$	0,026	0,027	0,029	0,032	0,035	0,036	0,046	0,047	0,049	0,054	0,056	0,062
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,00347	0,00354	0,00367	0,00386	0,00404	0,00410	0,00464	0,00469	0,00479	0,00503	0,00513	0,00540
$\Delta H(m)$	0,275	0,275	0,34	0,355	0,415	0,37	0,425	0,53	0,58	0,635	0,68	0,7
$J=\Delta H/L$	0,1329	0,1329	0,1643	0,1715	0,2005	0,1787	0,2053	0,2560	0,2802	0,3068	0,3285	0,3382
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,00952	0,00971	0,00905	0,00931	0,00902	0,00969	0,01024	0,00927	0,00905	0,00909	0,00894	0,00928
$\varepsilon (m)$	4,5E-04	4,0E-04	6,2E-04	5,2E-04	6,4E-04	4,1E-04	2,9E-04	5,4E-04	6,3E-04	6,1E-04	6,7E-04	5,4E-04
$\varepsilon/D$	9,3E-03	8,2E-03	1,3E-02	1,1E-02	1,3E-02	8,4E-03	5,9E-03	1,1E-02	1,3E-02	1,3E-02	1,4E-02	1,1E-02
$R$	1,2E+05	1,3E+05	1,3E+05	1,4E+05	1,4E+05	1,5E+05	1,7E+05	1,7E+05	1,7E+05	1,8E+05	1,8E+05	1,9E+05
$f_r$	0,0370	0,0355	0,0411	0,0388	0,0415	0,0358	0,0319	0,0393	0,0413	0,0409	0,0423	0,0392
$f_{\text{achour}}$	0,0377	0,0363	0,0417	0,0394	0,0421	0,0364	0,0326	0,0398	0,0418	0,0414	0,0427	0,0397
$\lambda$	1,0040	1,0044	1,0030	1,0033	1,0027	1,0038	1,0045	1,0027	1,0023	1,0023	1,0021	1,0024
Observation	Transition	Transition	Rugueux									
$\Lambda (m)$	0,031718	0,031707	0,031749	0,031740	0,031758	0,031725	0,031702	0,031758	0,031768	0,031770	0,031776	0,031767
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,048816	0,048801	0,048864	0,048851	0,048878	0,048828	0,048793	0,048878	0,048894	0,048896	0,048906	0,048892
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,049012	0,049013	0,049010	0,049010	0,049009	0,049011	0,049013	0,049008	0,049007	0,049007	0,049007	0,049007
$D_{\text{réel}} (m)$	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
$\Delta D/D (\%)$	0,025	0,027	0,019	0,021	0,018	0,023	0,026	0,017	0,015	0,015	0,014	0,015
$\varphi$	6,9E+5	9,5E+5	3E+5	4,7E+5	2,8E+5	9E+5	2,3E+6	4,3E+5	2,9E+5	3,1E+5	2,4E+5	4,4E+5
$\Lambda/\varepsilon$	69,40	78,47	50,65	60,09	49,26	76,76	110,30	57,84	50,07	51,22	46,65	58,17
$\Lambda(m)$	0,031523	0,031576	0,031371	0,031466	0,031363	0,031583	0,031721	0,031462	0,031383	0,031399	0,031345	0,031474
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,048517	0,048598	0,048284	0,048429	0,048270	0,048608	0,048822	0,048422	0,048301	0,048326	0,048243	0,048441
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,048712	0,048810	0,048427	0,048587	0,048399	0,048791	0,049042	0,048551	0,048414	0,048436	0,048343	0,048555
$D_{\text{réel}} (m)$	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
$\Delta D/D (\%)$	0,59	0,39	1,18	0,85	1,24	0,43	0,09	0,92	1,21	1,16	1,36	0,92

Tableau A13 (suite) : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=49\text{mm}$ ,  $T=35^\circ\text{C}$ ,  $v=7,2683\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=2,07\text{ m}$ 

$\Delta h(m)$	0,068	0,069	0,07	0,071	0,077	0,079	0,088	0,089	0,1	0,101	0,106	0,107
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,00566	0,00570	0,00574	0,00578	0,00603	0,00611	0,00645	0,00649	0,00688	0,00692	0,00709	0,00712
$\Delta H(m)$	0,71	0,81	0,69	0,87	1,03	0,95	1,06	1,07	1,17	1,22	1,16	1,21
$J=\Delta H/L$	0,3430	0,3913	0,3333	0,4203	0,4976	0,4589	0,5121	0,5169	0,5652	0,5894	0,5604	0,5845
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,00966	0,00911	0,00994	0,00892	0,00854	0,00901	0,00901	0,00902	0,00915	0,00901	0,00947	0,00932
$\varepsilon (m)$	4,2E-04	6,0E-04	3,5E-04	6,8E-04	8,7E-04	6,5E-04	6,5E-04	6,4E-04	5,9E-04	6,5E-04	4,8E-04	5,3E-04
$\varepsilon/D$	8,7E-03	1,2E-02	7,2E-03	1,4E-02	1,8E-02	1,3E-02	1,3E-02	1,3E-02	1,2E-02	1,3E-02	9,9E-03	1,1E-02
$R$	2,0E+05	2,0E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,2E+05	2,2E+05	2,3E+05	2,3E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05
$f_r$	0,0361	0,0408	0,0340	0,0426	0,0465	0,0417	0,0417	0,0416	0,0404	0,0418	0,0377	0,0390
$f_{\text{achour}}$	0,0366	0,0412	0,0346	0,0430	0,0468	0,0421	0,0421	0,0420	0,0408	0,0421	0,0381	0,0394
$\lambda$	1,0028	1,0021	1,0032	1,0018	1,0015	1,0018	1,0017	1,0017	1,0018	1,0016	1,0020	1,0019
Observation	Rugueux											
$\Lambda (m)$	0,031755	0,031776	0,031743	0,031783	0,031794	0,031783	0,031785	0,031785	0,031785	0,031789	0,031777	0,031782
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,048874	0,048906	0,048855	0,048916	0,048934	0,048916	0,048921	0,048921	0,048919	0,048926	0,048907	0,048915
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,049008	0,049007	0,049009	0,049006	0,049005	0,049006	0,049006	0,049006	0,049006	0,049005	0,049006	0,049006
$D_{\text{réel}} (m)$	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
$\Delta D/D (\%)$	0,017	0,013	0,019	0,012	0,010	0,012	0,012	0,012	0,012	0,011	0,013	0,012
$\varphi$	8,3E+5	3,2E+5	1,4E+6	2,3E+5	1,2E+5	2,7E+5	2,7E+5	2,8E+5	3,4E+5	2,7E+5	5,9E+5	4,5E+5
$\Lambda/\varepsilon$	74,42	51,93	89,73	45,82	35,83	48,60	48,56	48,85	53,17	48,41	65,26	59,05
$\Lambda(m)$	0,031597	0,031414	0,031674	0,031340	0,031176	0,031379	0,031381	0,031385	0,031437	0,031382	0,031549	0,031497
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,048630	0,048349	0,048750	0,048235	0,047983	0,048295	0,048298	0,048304	0,048385	0,048300	0,048556	0,048477
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,048764	0,048448	0,048904	0,048323	0,048053	0,048383	0,048382	0,048388	0,048470	0,048378	0,048655	0,048567
$D_{\text{réel}} (m)$	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
$\Delta D/D (\%)$	0,48	1,14	0,20	1,40	1,97	1,28	1,28	1,27	1,09	1,28	0,71	0,89

Tableau A13 (suite et fin) : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=49\text{mm}$ ,  $T=35^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,2683\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=2,07\text{ m}$ 

$\Delta h(m)$	0,11	0,112	0,12	0,123	0,127	0,128	0,129	0,132	0,135	0,14	0,142	0,145	0,165
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,00722	0,00729	0,00755	0,00765	0,00777	0,00780	0,00783	0,00793	0,00802	0,00817	0,00823	0,00831	0,00888
$\Delta H(m)$	1,15	1,19	1,26	1,31	1,35	1,42	1,5	1,52	1,6	1,65	1,72	1,78	1,81
$J=\Delta H/L$	0,5556	0,5749	0,6087	0,6329	0,6522	0,6860	0,7246	0,7343	0,7729	0,7971	0,8309	0,8599	0,8744
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,00969	0,00962	0,00968	0,00961	0,00962	0,00942	0,00920	0,00925	0,00912	0,00915	0,00902	0,00896	0,00949
$\varepsilon (m)$	4,2E-04	4,4E-04	4,2E-04	4,4E-04	4,4E-04	5,0E-04	5,8E-04	5,6E-04	6,1E-04	6,0E-04	6,5E-04	6,7E-04	4,8E-04
$\varepsilon/D$	8,6E-03	9,0E-03	8,6E-03	9,0E-03	9,0E-03	1,0E-02	1,2E-02	1,1E-02	1,2E-02	1,2E-02	1,3E-02	1,4E-02	9,8E-03
$R$	2,6E+05	2,6E+05	2,7E+05	2,7E+05	2,8E+05	2,8E+05	2,8E+05	2,8E+05	2,9E+05	2,9E+05	2,9E+05	3,0E+05	3,2E+05
$f_r$	0,0360	0,0366	0,0361	0,0366	0,0365	0,0382	0,0400	0,0396	0,0408	0,0406	0,0417	0,0423	0,0376
$f_{\text{achour}}$	0,0364	0,0370	0,0365	0,0370	0,0369	0,0385	0,0404	0,0400	0,0411	0,0409	0,0420	0,0425	0,0379
$\lambda$	1,0022	1,0021	1,0021	1,0020	1,0020	1,0018	1,0016	1,0016	1,0015	1,0015	1,0014	1,0013	1,0017
Observation	Rugueux												
$\Lambda (m)$	0,031770	0,031774	0,031773	0,031776	0,031777	0,031783	0,031789	0,031789	0,031792	0,031792	0,031795	0,031797	0,031787
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,048897	0,048902	0,048902	0,048907	0,048907	0,048917	0,048927	0,048925	0,048931	0,048931	0,048936	0,048939	0,048924
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,049007	0,049007	0,049006	0,049006	0,049006	0,049006	0,049005	0,049005	0,049005	0,049005	0,049005	0,049004	0,049005
$D_{\text{réel}}(m)$	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
$\Delta D/D (\%)$	0,014	0,013	0,013	0,013	0,013	0,011	0,010	0,010	0,010	0,010	0,009	0,009	0,011
$\varphi$	8,6E+5	7,5E+5	8,4E+5	7,4E+5	7,6E+5	5,4E+5	3,7E+5	4E+5	3,2E+5	3,3E+5	2,7E+5	2,5E+5	6E+5
$\Lambda/\varepsilon$	75,38	71,69	74,60	71,40	71,92	63,02	54,69	56,36	51,77	52,71	48,65	46,83	65,89
$\Lambda(m)$	0,031619	0,031596	0,031616	0,031597	0,031601	0,031536	0,031459	0,031477	0,031428	0,031440	0,031392	0,031369	0,031565
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,048664	0,048629	0,048660	0,048630	0,048637	0,048537	0,048418	0,048445	0,048371	0,048388	0,048315	0,048279	0,048581
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,048773	0,048733	0,048764	0,048729	0,048735	0,048624	0,048496	0,048524	0,048444	0,048461	0,048383	0,048344	0,048662
$D_{\text{réel}}(m)$	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
$\Delta D/D (\%)$	0,47	0,55	0,48	0,56	0,54	0,77	1,04	0,98	1,15	1,11	1,28	1,36	0,69

Tableau A14 : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=56\text{mm}$ ,  $T=31^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,8897\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,98\text{ m}$ 

$\Delta h(m)$	0,007	0,008	0,009	0,01	0,012	0,015	0,022	0,032	0,035	0,04	0,05	0,065
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,00178	0,00191	0,00202	0,00214	0,00234	0,00262	0,00319	0,00386	0,00404	0,00432	0,00484	0,00553
$\Delta H(m)$	0,03	0,04	0,043	0,045	0,055	0,065	0,1	0,145	0,16	0,17	0,25	0,31
$J=\Delta H/L$	0,0152	0,0202	0,0217	0,0227	0,0278	0,0328	0,0505	0,0732	0,0808	0,0859	0,1263	0,1566
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,01447	0,01342	0,01374	0,01417	0,01406	0,01449	0,01419	0,01425	0,01420	0,01474	0,01362	0,01397
$\varepsilon (m)$	2,6E-04	4,6E-04	3,9E-04	3,1E-04	3,4E-04	2,7E-04	3,3E-04	3,2E-04	3,3E-04	2,6E-04	4,5E-04	3,8E-04
$\varepsilon/D$	4,6E-03	8,2E-03	7,0E-03	5,6E-03	6,0E-03	4,9E-03	5,9E-03	5,8E-03	6,0E-03	4,6E-03	8,0E-03	6,8E-03
$R$	5,1E+04	5,5E+04	5,8E+04	6,2E+04	6,8E+04	7,6E+04	9,2E+04	1,1E+05	1,2E+05	1,2E+05	1,4E+05	1,6E+05
$f_r$	0,0295	0,0354	0,0337	0,0314	0,0322	0,0302	0,0319	0,0318	0,0321	0,0296	0,0352	0,0334
$f_{\text{achour}}$	0,0318	0,0370	0,0353	0,0332	0,0337	0,0318	0,0331	0,0328	0,0330	0,0307	0,0359	0,0341
$\lambda$	1,0149	1,0090	1,0097	1,0109	1,0096	1,0102	1,0075	1,0065	1,0061	1,0071	1,0041	1,0041
Observation	Transition											
$\Lambda (m)$	0,035882	0,036081	0,036058	0,036014	0,036060	0,036038	0,036129	0,036165	0,036179	0,036144	0,036246	0,036244
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,055225	0,055532	0,055496	0,055429	0,055500	0,055465	0,055606	0,055661	0,055682	0,055629	0,055786	0,055783
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,056047	0,056031	0,056032	0,056035	0,056031	0,056033	0,056025	0,056021	0,056020	0,056022	0,056014	0,056014
$D_{\text{réel}} (m)$	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
$\Delta D/D (\%)$	0,083	0,055	0,058	0,063	0,056	0,058	0,044	0,037	0,035	0,040	0,025	0,025
$\varphi$	4,4E+6	9,6E+5	1,5E+6	2,6E+6	2,1E+6	3,7E+6	2,3E+6	2,4E+6	2,2E+6	4,4E+6	1E+6	1,6E+6
$\Lambda/\varepsilon$	140,82	78,72	92,28	114,82	106,95	131,58	110,02	111,56	108,26	141,07	80,50	94,79
$\Lambda(m)$	0,036003	0,035933	0,035994	0,036053	0,036068	0,036133	0,036150	0,036192	0,036192	0,036267	0,036110	0,036194
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,055412	0,055304	0,055399	0,055489	0,055512	0,055613	0,055638	0,055703	0,055703	0,055818	0,055577	0,055706
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,056236	0,055801	0,055934	0,056097	0,056043	0,056181	0,056056	0,056063	0,056040	0,056213	0,055804	0,055936
$D_{\text{réel}}(m)$	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
$\Delta D/D (\%)$	0,42	0,36	0,12	0,17	0,08	0,32	0,10	0,11	0,07	0,38	0,35	0,11

Tableau A14 (suite et fin): calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=56\text{mm}$ ,  $T=31^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,8897\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,98\text{ m}$ 

$\Delta h(m)$	0,075	0,082	0,1	0,135	0,145	0,16	0,165	0,19	0,21	0,25	0,32
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,00595	0,00622	0,00688	0,00802	0,00831	0,00874	0,00888	0,00954	0,01003	0,01096	0,01243
$\Delta H(m)$	0,36	0,38	0,5	0,69	0,75	0,8	0,857	1	1,05	1,2	1,56
$J=\Delta H/L$	0,1818	0,1919	0,2525	0,3485	0,3788	0,4040	0,4328	0,5051	0,5303	0,6061	0,7879
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,01395	0,01420	0,01370	0,01358	0,01351	0,01375	0,01349	0,01342	0,01378	0,01408	0,01400
$\varepsilon (m)$	3,9E-04	3,4E-04	4,4E-04	4,7E-04	4,8E-04	4,3E-04	4,9E-04	5,1E-04	4,3E-04	3,7E-04	3,9E-04
$\varepsilon/D$	6,9E-03	6,2E-03	7,9E-03	8,3E-03	8,6E-03	7,7E-03	8,7E-03	9,0E-03	7,7E-03	6,7E-03	7,0E-03
$R$	1,7E+05	1,8E+05	2,0E+05	2,3E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,6E+05	2,7E+05	2,9E+05	3,2E+05	3,6E+05
$f_r$	0,0336	0,0324	0,0350	0,0357	0,0361	0,0348	0,0362	0,0366	0,0347	0,0332	0,0337
$f_{\text{achour}}$	0,0343	0,0330	0,0355	0,0361	0,0365	0,0353	0,0366	0,0370	0,0351	0,0336	0,0340
$\lambda$	1,0038	1,0041	1,0030	1,0025	1,0024	1,0025	1,0022	1,0020	1,0022	1,0023	1,0020
Observation	Transition	Transition	Rugueux								
$\Lambda (m)$	0,036255	0,036247	0,036282	0,036299	0,036304	0,036300	0,036309	0,036316	0,036310	0,036307	0,036317
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,055799	0,055787	0,055841	0,055868	0,055876	0,055870	0,055883	0,055894	0,055884	0,055880	0,055896
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,056013	0,056013	0,056010	0,056009	0,056008	0,056008	0,056008	0,056007	0,056008	0,056008	0,056007
$D_{\text{réel}} (m)$	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
$\Delta D/D (\%)$	0,023	0,024	0,019	0,016	0,015	0,015	0,014	0,013	0,013	0,014	0,012
$\varphi$	1,5E+6	2,1E+6	1,1E+6	9,2E+5	8,4E+5	1,1E+6	8,2E+5	7,4E+5	1,2E+6	1,7E+6	1,5E+6
$\Lambda/\varepsilon$	93,13	105,12	82,14	77,32	74,63	83,47	74,01	71,37	84,31	96,94	93,02
$\Lambda(m)$	0,036196	0,036247	0,036157	0,036140	0,036125	0,036184	0,036125	0,036111	0,036199	0,036268	0,036258
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,055709	0,055787	0,055648	0,055623	0,055600	0,055690	0,055600	0,055577	0,055713	0,055819	0,055804
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,055922	0,056013	0,055817	0,055764	0,055732	0,055829	0,055724	0,055690	0,055836	0,055947	0,055915
$D_{\text{réel}} (m)$	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
$\Delta D/D (\%)$	0,14	0,02	0,33	0,42	0,48	0,31	0,50	0,56	0,29	0,09	0,15

Tableau A15: calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=86\text{mm}$ ,  $T=31^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,8897\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,5\text{ m}$ 

$\Delta h(m)$	0,07	0,09	0,12	0,17	0,21	0,26	0,29	0,34	0,4	0,48	0,58	0,66	0,7
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,00574	0,00652	0,00755	0,00901	0,01003	0,01119	0,01182	0,01282	0,01392	0,01527	0,01682	0,01796	0,01850
$\Delta H(m)$	0,015	0,018	0,02	0,025	0,03	0,04	0,045	0,05	0,055	0,06	0,08	0,09	0,095
$J=\Delta H/L$	0,0100	0,0120	0,0133	0,0167	0,0200	0,0267	0,0300	0,0333	0,0367	0,0400	0,0533	0,0600	0,0633
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,05742	0,05955	0,06539	0,06982	0,07096	0,06850	0,06826	0,07021	0,07271	0,07637	0,07282	0,07331	0,07352
$R$	1,1E+05	1,2E+05	1,4E+05	1,7E+05	1,9E+05	2,1E+05	2,2E+05	2,4E+05	2,6E+05	2,9E+05	3,2E+05	3,4E+05	3,5E+05
$f_r$	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359
$f_{\text{achour}}$	0,0177	0,0173	0,0167	0,0162	0,0158	0,0155	0,0153	0,0151	0,0148	0,0146	0,0143	0,0141	0,0141
$\psi$	0,8682	0,8636	0,8585	0,8525	0,8488	0,8452	0,8434	0,8408	0,8381	0,8351	0,8321	0,8301	0,8291
Observation	Lisse												
$\Lambda (m)$	0,064685	0,065638	0,068140	0,069947	0,070402	0,069415	0,069321	0,070106	0,071093	0,072504	0,071135	0,071328	0,071410
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,099556	0,101022	0,104873	0,107654	0,108355	0,106836	0,106691	0,107899	0,109418	0,111590	0,109483	0,109780	0,109906
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,086435	0,087248	0,090036	0,091770	0,091976	0,090301	0,089983	0,090718	0,091703	0,093194	0,091101	0,091123	0,091126
$D_{\text{réel}} (m)$	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086
$\Delta D/D (\%)$	0,506	1,451	4,693	6,709	6,948	5,001	4,632	5,486	6,631	8,365	5,932	5,957	5,960

Tableau A15 (suite et fin): calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=86\text{mm}$ ,  $T=31^\circ\text{C}$ ,  $v=7,8897\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,5\text{ m}$ 

$\Delta h(m)$	0,75	0,84	0,93	1,02	1,09	1,16	1,23	1,3	1,39	1,5	1,63	1,67	1,83
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,01916	0,02030	0,02138	0,02240	0,02317	0,02392	0,02464	0,02534	0,02622	0,02726	0,02843	0,02878	0,03015
$\Delta H(m)$	0,105	0,125	0,14	0,16	0,18	0,19	0,2	0,215	0,22	0,23	0,27	0,275	0,285
$J=\Delta H/L$	0,0700	0,0833	0,0933	0,1067	0,1200	0,1267	0,1333	0,1433	0,1467	0,1533	0,1800	0,1833	0,1900
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,07243	0,07032	0,06997	0,06860	0,06689	0,06720	0,06748	0,06694	0,06847	0,06960	0,06701	0,06722	0,06918
$R$	3,6E+05	3,8E+05	4,0E+05	4,2E+05	4,3E+05	4,5E+05	4,6E+05	4,8E+05	4,9E+05	5,1E+05	5,3E+05	5,4E+05	5,7E+05
$f_r$	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359	0,0359
$f_{\text{achour}}$	0,0140	0,0138	0,0137	0,0136	0,0135	0,0134	0,0133	0,0133	0,0132	0,0131	0,0130	0,0130	0,0129
$\psi$	0,8280	0,8263	0,8247	0,8233	0,8222	0,8213	0,8204	0,8196	0,8185	0,8174	0,8161	0,8158	0,8144
Observation	Lisse												
$\Lambda (m)$	0,070983	0,070148	0,070010	0,069457	0,068761	0,068888	0,069002	0,068780	0,069403	0,069862	0,068810	0,068896	0,069690
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,109249	0,107964	0,107751	0,106900	0,105830	0,106024	0,106200	0,105859	0,106817	0,107524	0,105904	0,106038	0,107259
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,090463	0,089207	0,088861	0,088007	0,087018	0,087077	0,087126	0,086757	0,087434	0,087889	0,086433	0,086504	0,087354
$D_{\text{réel}} (m)$	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086	0,086
$\Delta D/D (\%)$	5,189	3,729	3,327	2,333	1,183	1,252	1,309	0,881	1,668	2,196	0,504	0,586	1,574

Tableau A16: calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=124\text{mm}$ ,  $T=33^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,5691\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,5\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	0,78	0,87	0,91	0,94	1	1,08	1,12	1,17	1,23	1,32	1,45	1,55
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,01955	0,02066	0,02114	0,02149	0,02218	0,02306	0,02349	0,02402	0,02464	0,02554	0,02679	0,02771
$\Delta H(m)$	0,045	0,05	0,052	0,05	0,053	0,055	0,06	0,065	0,068	0,07	0,072	0,075
$J=\Delta H/L$	0,0300	0,0333	0,0347	0,0333	0,0353	0,0367	0,0400	0,0433	0,0453	0,0467	0,0480	0,0500
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,11287	0,11318	0,11355	0,11772	0,11800	0,12045	0,11747	0,11540	0,11573	0,11823	0,12228	0,12394
$\varepsilon (m)$	4,3E-04	4,2E-04	4,1E-04	3,1E-04	3,1E-04	2,6E-04	3,2E-04	3,7E-04	3,6E-04	3,1E-04	2,3E-04	2,1E-04
$\varepsilon/D$	3,4E-03	3,4E-03	3,3E-03	2,5E-03	2,5E-03	2,1E-03	2,6E-03	3,0E-03	2,9E-03	2,5E-03	1,9E-03	1,7E-03
$R$	2,7E+05	2,8E+05	2,9E+05	2,9E+05	3,0E+05	3,1E+05	3,2E+05	3,3E+05	3,3E+05	3,5E+05	3,6E+05	3,8E+05
$f_r$	0,0272	0,0271	0,0269	0,0249	0,0248	0,0237	0,0251	0,0261	0,0259	0,0248	0,0231	0,0224
$f_{\text{achour}}$	0,0279	0,0277	0,0275	0,0256	0,0255	0,0245	0,0257	0,0266	0,0265	0,0254	0,0237	0,0231
$\lambda$	1,0046	1,0045	1,0045	1,0055	1,0055	1,0060	1,0050	1,0044	1,0044	1,0048	1,0058	1,0061
Observation	Rugueux											
$\Lambda (m)$	0,080216	0,080228	0,080228	0,080147	0,080153	0,080109	0,080186	0,080234	0,080236	0,080200	0,080127	0,080099
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,123459	0,123478	0,123478	0,123353	0,123362	0,123295	0,123413	0,123488	0,123491	0,123434	0,123322	0,123279
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,124031	0,124030	0,124030	0,124036	0,124035	0,124038	0,124032	0,124029	0,124029	0,124031	0,124036	0,124038
$D_{\text{réel}}(m)$	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124
$\Delta D/D (\%)$	0,025	0,024	0,024	0,029	0,028	0,031	0,026	0,023	0,023	0,025	0,029	0,030
$\varphi$	9,5E+6	1E+7	1,1E+7	2,2E+7	2,3E+7	3,5E+7	2,1E+7	1,4E+7	1,5E+7	2,3E+7	4,7E+7	6,2E+7
$\Lambda/\varepsilon$	188,82	192,10	196,52	259,52	263,60	310,26	253,25	220,17	224,64	264,63	346,16	386,37
$\Lambda(m)$	0,080703	0,080726	0,080741	0,080809	0,080822	0,080843	0,080837	0,080814	0,080827	0,080871	0,080897	0,080898
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,124210	0,124245	0,124268	0,124372	0,124392	0,124425	0,124415	0,124379	0,124399	0,124467	0,124508	0,124510
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,124785	0,124801	0,124822	0,125060	0,125070	0,125174	0,125039	0,124924	0,124941	0,125069	0,125228	0,125276
$D_{\text{réel}}(m)$	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124
$\Delta D/D (\%)$	0,63	0,65	0,66	0,85	0,86	0,95	0,84	0,75	0,76	0,86	0,99	1,03

Tableau A16 (suite et fin): calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=124\text{mm}$ ,  $T=33^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,5691\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,5\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	1,57	1,67	1,72	1,75	1,83	1,98	2,34	2,57	2,73	2,9	3,1	3,3
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,02789	0,02878	0,02922	0,02948	0,03015	0,03139	0,03417	0,03583	0,03695	0,03810	0,03942	0,04069
$\Delta H(m)$	0,08	0,082	0,085	0,09	0,095	0,098	0,12	0,135	0,14	0,15	0,16	0,17
$J=\Delta H/L$	0,0533	0,0547	0,0567	0,0600	0,0633	0,0653	0,0800	0,0900	0,0933	0,1000	0,1067	0,1133
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,12079	0,12311	0,12274	0,12034	0,11982	0,12279	0,12080	0,11945	0,12095	0,12049	0,12069	0,12086
$\varepsilon (m)$	2,6E-04	2,2E-04	2,3E-04	2,7E-04	2,8E-04	2,3E-04	2,6E-04	2,9E-04	2,6E-04	2,7E-04	2,7E-04	2,7E-04
$\varepsilon/D$	2,1E-03	1,8E-03	1,8E-03	2,2E-03	2,2E-03	1,8E-03	2,1E-03	2,3E-03	2,1E-03	2,2E-03	2,2E-03	2,1E-03
$R$	3,8E+05	3,9E+05	4,0E+05	4,0E+05	4,1E+05	4,3E+05	4,6E+05	4,9E+05	5,0E+05	5,2E+05	5,3E+05	5,5E+05
$f_r$	0,0237	0,0228	0,0229	0,0239	0,0242	0,0229	0,0238	0,0244	0,0238	0,0240	0,0239	0,0239
$f_{\text{achour}}$	0,0243	0,0234	0,0236	0,0245	0,0247	0,0235	0,0243	0,0249	0,0243	0,0244	0,0244	0,0243
$\lambda$	1,0051	1,0057	1,0055	1,0047	1,0045	1,0051	1,0042	1,0038	1,0040	1,0038	1,0037	1,0036
Observation	Rugueux											
$\Lambda (m)$	0,080177	0,080136	0,080151	0,080206	0,080224	0,080177	0,080245	0,080281	0,080265	0,080281	0,080287	0,080293
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,123400	0,123337	0,123360	0,123445	0,123472	0,123400	0,123504	0,123560	0,123536	0,123560	0,123569	0,123578
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,124032	0,124035	0,124034	0,124030	0,124029	0,124032	0,124027	0,124024	0,124025	0,124024	0,124023	0,124023
$D_{\text{réel}} (m)$	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124
$\Delta D/D (\%)$	0,026	0,028	0,027	0,024	0,023	0,026	0,021	0,019	0,020	0,019	0,019	0,018
$\varphi$	3,6E+7	5,3E+7	5E+7	3,2E+7	3E+7	4,9E+7	3,4E+7	2,7E+7	3,5E+7	3,2E+7	3,3E+7	3,4E+7
$\Lambda/\varepsilon$	311,77	363,67	354,26	301,14	290,41	353,08	307,06	280,03	308,52	298,77	302,00	304,92
$\Lambda(m)$	0,080914	0,080921	0,080928	0,080930	0,080934	0,080954	0,080977	0,080977	0,080999	0,081003	0,081013	0,081022
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,124533	0,124544	0,124556	0,124559	0,124565	0,124595	0,124630	0,124631	0,124664	0,124671	0,124686	0,124700
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,125171	0,125249	0,125236	0,125149	0,125127	0,125233	0,125157	0,125099	0,125158	0,125139	0,125144	0,125149
$D_{\text{réel}} (m)$	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124
$\Delta D/D (\%)$	0,94	1,01	1,00	0,93	0,91	0,99	0,93	0,89	0,93	0,92	0,92	0,93

Tableau A17: calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=130\text{mm}$ ,  $T=32^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,726\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,5\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	0,45	0,58	0,65	0,68	0,71	0,82	0,89	0,93	0,99	0,96	1,05	1,32
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,01478	0,01682	0,01782	0,01823	0,01864	0,02005	0,02090	0,02138	0,02207	0,02172	0,02274	0,02554
$\Delta H(m)$	0,02	0,024	0,026	0,027	0,029	0,026	0,029	0,034	0,03	0,036	0,038	0,047
$J=\Delta H/L$	0,0133	0,0160	0,0173	0,0180	0,0193	0,0173	0,0193	0,0227	0,0200	0,0240	0,0253	0,0313
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,12801	0,13295	0,13535	0,13590	0,13403	0,15231	0,15034	0,14199	0,15604	0,14023	0,14285	0,14429
$\varepsilon (m)$	4,1E-04	3,1E-04	2,7E-04	2,6E-04	2,9E-04	8,4E-05	9,9E-05	1,8E-04	6,5E-05	2,0E-04	1,7E-04	1,6E-04
$\varepsilon/D$	3,1E-03	2,4E-03	2,0E-03	2,0E-03	2,2E-03	6,5E-04	7,6E-04	1,4E-03	5,0E-04	1,5E-03	1,3E-03	1,2E-03
$R$	1,9E+05	2,1E+05	2,3E+05	2,3E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,6E+05	2,7E+05	2,8E+05	2,8E+05	2,9E+05	3,2E+05
$f_r$	0,0265	0,0245	0,0236	0,0234	0,0241	0,0177	0,0184	0,0212	0,0167	0,0219	0,0210	0,0206
$f_{\text{achour}}$	0,0274	0,0254	0,0245	0,0243	0,0250	0,0194	0,0199	0,0223	0,0185	0,0229	0,0220	0,0216
$\lambda$	1,0068	1,0076	1,0082	1,0082	1,0073	1,0181	1,0155	1,0096	1,0204	1,0086	1,0095	1,0091
Observation	Transition											
$\Lambda (m)$	0,083929	0,083858	0,083817	0,083813	0,083884	0,083028	0,083236	0,083700	0,082851	0,083778	0,083712	0,083740
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,129175	0,129066	0,129001	0,128996	0,129105	0,127788	0,128107	0,128822	0,127515	0,128941	0,128840	0,128884
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,130047	0,130051	0,130053	0,130054	0,130048	0,130103	0,130090	0,130060	0,130113	0,130055	0,130059	0,130056
$D_{\text{réel}}(m)$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
$\Delta D/D (\%)$	0,036	0,039	0,041	0,041	0,037	0,079	0,069	0,046	0,087	0,042	0,045	0,043
$\varphi$	1,2E+7	2,6E+7	3,8E+7	4,1E+7	3E+7	7,5E+8	4,9EE+8	1,1E+8	1,5E+9	7,8E+7	1,2E+8	1,4E+8
$\Lambda/\varepsilon$	206,71	276,14	318,46	328,65	291,69	997,41	846,57	473,40	1291,10	421,62	495,32	532,88
$\Lambda(m)$	0,084498	0,084579	0,084594	0,084601	0,084628	0,083870	0,084107	0,084576	0,083623	0,084634	0,084593	0,084630
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,130050	0,130175	0,130198	0,130209	0,130251	0,129083	0,129449	0,130169	0,128703	0,130259	0,130197	0,130253
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,130928	0,131169	0,131260	0,131277	0,131203	0,131422	0,131452	0,131421	0,131325	0,131384	0,131429	0,131438
$D_{\text{réel}}(m)$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
$\Delta D/D (\%)$	0,71	0,90	0,97	0,98	0,93	1,09	1,12	1,09	1,02	1,06	1,10	1,11

Tableau A17 (suite) : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=130\text{mm}$ ,  $T=32^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,726\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,5\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	1,16	1,26	1,41	1,52	1,61	1,73	1,84	1,96	1,95	2,05	2,09	2,2
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,02392	0,02494	0,02641	0,02744	0,02825	0,02930	0,03024	0,03122	0,03114	0,03194	0,03226	0,03311
$\Delta H(m)$	0,04	0,044	0,05	0,051	0,052	0,053	0,054	0,055	0,055	0,06	0,061	0,065
$J=\Delta H/L$	0,0267	0,0293	0,0333	0,0340	0,0347	0,0353	0,0360	0,0367	0,0367	0,0400	0,0407	0,0433
$Q/J^{1/2}(\text{m}^3/\text{s})$	0,14647	0,14564	0,14466	0,14881	0,15175	0,15590	0,15936	0,16306	0,16264	0,15972	0,15997	0,15906
$\varepsilon(m)$	1,4E-04	1,4E-04	1,6E-04	1,2E-04	9,8E-05	7,4E-05	5,7E-05	4,3E-05	4,4E-05	5,7E-05	5,6E-05	6,1E-05
$\varepsilon/D$	1,0E-03	1,1E-03	1,2E-03	9,2E-04	7,6E-04	5,7E-04	4,4E-04	3,3E-04	3,4E-04	4,4E-04	4,3E-04	4,7E-04
$R$	3,0E+05	3,2E+05	3,3E+05	3,5E+05	3,6E+05	3,7E+05	3,8E+05	4,0E+05	3,9E+05	4,0E+05	4,1E+05	4,2E+05
$f_r$	0,0198	0,0202	0,0205	0,0192	0,0184	0,0172	0,0162	0,0152	0,0153	0,0162	0,0161	0,0164
$f_{\text{achour}}$	0,0209	0,0212	0,0215	0,0203	0,0195	0,0185	0,0177	0,0169	0,0170	0,0176	0,0176	0,0178
$\lambda$	1,0109	1,0100	1,0090	1,0108	1,0122	1,0149	1,0176	1,0212	1,0207	1,0169	1,0170	1,0156
Observation	Transition											
$\Lambda(m)$	0,083598	0,083669	0,083750	0,083608	0,083490	0,083283	0,083070	0,082783	0,082822	0,083122	0,083116	0,083220
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}}(m)$	0,128665	0,128774	0,128899	0,128681	0,128499	0,128180	0,127851	0,127411	0,127470	0,127932	0,127924	0,128084
$D_{\text{corrigé}}(m)$	0,130066	0,130061	0,130055	0,130064	0,130071	0,130084	0,130096	0,130112	0,130110	0,130092	0,130092	0,130086
$D_{\text{réel}}(m)$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
$\Delta D/D(\%)$	0,050	0,047	0,042	0,049	0,055	0,064	0,074	0,086	0,085	0,071	0,071	0,066
$\varphi$	2,2E+8	1,8E+8	1,5E+8	3E+8	5,1E+8	1,1E9	2,1E+9	4,4E+9	4E+9	2,1E+9	2,2E+9	1,8 <sup>E</sup> +9
$\Lambda/\varepsilon$	622,54	584,51	542,78	707,68	858,43	1142,53	1469,49	1959,68	1892,79	1478,40	1501,41	1387,33
$\Lambda(m)$	0,084493	0,084563	0,084641	0,084500	0,084362	0,084095	0,083800	0,083390	0,083445	0,083850	0,083839	0,083972
$D_{\text{calculé}}(m)$	0,130042	0,130150	0,130270	0,130054	0,129841	0,129429	0,128975	0,128344	0,128429	0,129053	0,129036	0,129241
$D_{\text{corrigé}}(m)$	0,131459	0,131451	0,131439	0,131452	0,131430	0,131351	0,131239	0,131065	0,131088	0,131232	0,131223	0,131261
$D_{\text{réel}}(m)$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
$\Delta D/D(\%)$	1,12	1,12	1,11	1,12	1,10	1,04	0,95	0,82	0,84	0,95	0,94	0,97

Tableau A17 (suite et fin) : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=130\text{mm}$ ,  $T=32^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,726\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,5\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	2,38	2,51	2,8	2,93	3,05	3,19	3,33	3,5	3,62	3,75	3,84
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,03446	0,03541	0,03743	0,03830	0,03909	0,03999	0,04088	0,04192	0,04265	0,04342	0,04395
$\Delta H(m)$	0,07	0,074	0,08	0,082	0,084	0,085	0,088	0,09	0,093	0,095	0,098
$J=\Delta H/L$	0,0467	0,0493	0,0533	0,0547	0,0560	0,0567	0,0587	0,0600	0,0620	0,0633	0,0653
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,15953	0,15941	0,16207	0,16382	0,16519	0,16801	0,16876	0,17115	0,17128	0,17253	0,17193
$\varepsilon (m)$	5,9E-05	6,0E-05	5,0E-05	4,4E-05	4,0E-05	3,2E-05	3,0E-05	2,4E-05	2,4E-05	2,2E-05	2,3E-05
$\varepsilon/D$	4,6E-04	4,6E-04	3,9E-04	3,4E-04	3,1E-04	2,4E-04	2,3E-04	1,9E-04	1,9E-04	1,7E-04	1,8E-04
$R$	4,4E+05	4,5E+05	4,7E+05	4,9E+05	5,0E+05	5,1E+05	5,2E+05	5,3E+05	5,4E+05	5,5E+05	5,6E+05
$f_r$	0,0164	0,0164	0,0158	0,0153	0,0150	0,0143	0,0141	0,0135	0,0135	0,0132	0,0134
$f_{\text{achour}}$	0,0177	0,0177	0,0171	0,0167	0,0165	0,0159	0,0158	0,0153	0,0153	0,0151	0,0152
$\lambda$	1,0154	1,0148	1,0163	1,0176	1,0187	1,0218	1,0223	1,0253	1,0249	1,0266	1,0251
Observation	Transition										
$\Lambda (m)$	0,083240	0,083282	0,083165	0,083061	0,082974	0,082738	0,082699	0,082465	0,082489	0,082363	0,082475
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,128113	0,128179	0,127999	0,127838	0,127705	0,127342	0,127281	0,126921	0,126958	0,126764	0,126936
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,130085	0,130082	0,130088	0,130094	0,130099	0,130112	0,130114	0,130126	0,130125	0,130131	0,130125
$D_{\text{réel}}(m)$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
$\Delta D/D (\%)$	0,065	0,063	0,068	0,072	0,076	0,086	0,087	0,097	0,096	0,101	0,096
$\varphi$	1,9E+9	1,8E+9	2,9E+9	4E+9	5,3E+9	9,5E+9	1,1E+10	1,9E+10	1,9E+10	2,5E+10	2,1E+10
$\Lambda/\varepsilon$	1416,54	1391,00	1667,35	1893,33	2095,66	2628,42	2775,00	3406,74	3406,86	3800,61	3551,07
$\Lambda(m)$	0,083984	0,084034	0,083847	0,083685	0,083549	0,083189	0,083117	0,082752	0,082776	0,082575	0,082734
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,129260	0,129335	0,129048	0,128799	0,128590	0,128035	0,127925	0,127363	0,127400	0,127091	0,127336
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,131248	0,131256	0,131154	0,131072	0,131000	0,130820	0,130772	0,130580	0,130578	0,130467	0,130535
$D_{\text{réel}}(m)$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
$\Delta D/D (\%)$	0,96	0,97	0,89	0,82	0,77	0,63	0,59	0,45	0,44	0,36	0,41

Tableau A18 : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=49\text{mm}$  et  $\varepsilon_{\text{moy}}=5,5\text{E-}4\text{m}$ ,  $T=35^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,2683\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=2,07\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	0,0065	0,008	0,009	0,012	0,013	0,014	0,015	0,019	0,021	0,022	0,024	0,025
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,00172	0,00191	0,00202	0,00234	0,00244	0,00253	0,00262	0,00296	0,00311	0,00319	0,00333	0,00340
$\Delta H(m)$	0,075	0,09	0,11	0,13	0,135	0,165	0,17	0,22	0,23	0,24	0,26	0,29
$J=\Delta H/L$	0,0362	0,0435	0,0531	0,0628	0,0652	0,0797	0,0821	0,1063	0,1111	0,1159	0,1256	0,1401
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,00901	0,00914	0,00878	0,00935	0,00956	0,00898	0,00916	0,00908	0,00934	0,00936	0,00940	0,00909
$\varepsilon_{\text{moy}}(m)$	5,5E-04											
$\varepsilon/D$	1,1E-02											
$R$	6,1E+04	6,8E+04	7,2E+04	8,4E+04	8,7E+04	9,1E+04	9,4E+04	1,1E+05	1,1E+05	1,1E+05	1,2E+05	1,2E+05
$f_r$	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395
$f_{\text{achour}}$	0,0407	0,0406	0,0406	0,0404	0,0404	0,0404	0,0403	0,0402	0,0402	0,0402	0,0402	0,0401
$\lambda$	1,0063	1,0058	1,0055	1,0048	1,0047	1,0045	1,0044	1,0040	1,0038	1,0037	1,0036	1,0035
Observation	Transition											
$\Lambda (m)$	0,031457	0,031626	0,031151	0,031890	0,032151	0,031406	0,031644	0,031540	0,031879	0,031908	0,031958	0,031556
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}}(m)$	0,048415	0,048675	0,047944	0,049081	0,049484	0,048337	0,048702	0,048542	0,049065	0,049109	0,049186	0,048567
$D_{\text{corrigé}}(m)$	0,048722	0,048958	0,048208	0,049319	0,049715	0,048555	0,048916	0,048734	0,049251	0,049290	0,049361	0,048737
$D_{\text{réel}}(m)$	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
$\Delta D/D (\%)$	0,57	0,09	1,64	0,65	1,46	0,92	0,17	0,55	0,51	0,59	0,74	0,54

Tableau A18 (suite): calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=49\text{mm}$  et  $\varepsilon_{\text{moy}}=5,5\text{E-}4\text{m}$ ,  $T=35^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,2683\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=2,07\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	0,026	0,027	0,029	0,032	0,035	0,036	0,046	0,047	0,049	0,054	0,056	0,062
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,00347	0,00354	0,00367	0,00386	0,00404	0,00410	0,00464	0,00469	0,00479	0,00503	0,00513	0,00540
$\Delta H(m)$	0,275	0,275	0,34	0,355	0,415	0,37	0,425	0,53	0,58	0,635	0,68	0,7
$J=\Delta H/L$	0,1329	0,1329	0,1643	0,1715	0,2005	0,1787	0,2053	0,2560	0,2802	0,3068	0,3285	0,3382
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,00952	0,00971	0,00905	0,00931	0,00902	0,00969	0,01024	0,00927	0,00905	0,00909	0,00894	0,00928
$\varepsilon_{\text{moy}}(m)$	5,5E-04	5,5E-04	5,5E-04	5,5E-04	5,5E-04	5,5E-04	5,5E-04	5,5E-04	5,5E-04	5,5E-04	5,5E-04	5,5E-04
$\varepsilon/D$	1,1E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,1E-02	1,1E-02
$R$	1,2E+05	1,3E+05	1,3E+05	1,4E+05	1,4E+05	1,5E+05	1,7E+05	1,7E+05	1,7E+05	1,8E+05	1,8E+05	1,9E+05
$f_r$	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395
$f_{\text{achour}}$	0,0401	0,0401	0,0401	0,0401	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400	0,0399	0,0399	0,0399
$\lambda$	1,0034	1,0034	1,0033	1,0031	1,0030	1,0030	1,0027	1,0026	1,0026	1,0025	1,0024	1,0023
Observation	Transition	Transition	Rugueux									
$\Lambda(m)$	0,032109	0,032341	0,031507	0,031844	0,031459	0,032314	0,032990	0,031784	0,031501	0,031550	0,031364	0,031804
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}}(m)$	0,049419	0,049775	0,048492	0,049011	0,048418	0,049735	0,050774	0,048919	0,048484	0,048558	0,048272	0,048949
$D_{\text{corrigé}}(m)$	0,049589	0,049943	0,048651	0,049164	0,048564	0,049882	0,050909	0,049048	0,048609	0,048678	0,048390	0,049063
$D_{\text{réel}}(m)$	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
$\Delta D/D(\%)$	1,20	1,92	0,72	0,34	0,90	1,80	3,90	0,10	0,80	0,66	1,26	0,13

Tableau A18 (suite): calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=49\text{mm}$  et  $\varepsilon_{\text{moy}}=5,5\text{E-}4\text{m}$ ,  $T=35^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,2683\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=2,07\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	0,068	0,069	0,07	0,071	0,077	0,079	0,088	0,089	0,1	0,101	0,106	0,107
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,00566	0,00570	0,00574	0,00578	0,00603	0,00611	0,00645	0,00649	0,00688	0,00692	0,00709	0,00712
$\Delta H(m)$	0,71	0,81	0,69	0,87	1,03	0,95	1,06	1,07	1,17	1,22	1,16	1,21
$J=\Delta H/L$	0,3430	0,3913	0,3333	0,4203	0,4976	0,4589	0,5121	0,5169	0,5652	0,5894	0,5604	0,5845
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,00966	0,00911	0,00994	0,00892	0,00854	0,00901	0,00901	0,00902	0,00915	0,00901	0,00947	0,00932
$\varepsilon_{\text{moy}}(m)$	5,5E-04											
$\varepsilon/D$	1,1E-02											
$R$	2,0E+05	2,0E+05	2,1E+05	2,1E+05	2,2E+05	2,2E+05	2,3E+05	2,3E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05	2,5E+05
$f_r$	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395
$f_{\text{achour}}$	0,0399	0,0399	0,0399	0,0399	0,0399	0,0399	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398
$\lambda$	1,0022	1,0022	1,0022	1,0022	1,0021	1,0021	1,0020	1,0020	1,0019	1,0019	1,0018	1,0018
Observation	Rugueux											
$\Lambda(m)$	0,032282	0,031583	0,032635	0,031334	0,030832	0,031455	0,031455	0,031467	0,031639	0,031452	0,032043	0,031848
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}}(m)$	0,049685	0,048610	0,050227	0,048226	0,047453	0,048411	0,048412	0,048431	0,048696	0,048407	0,049317	0,049017
$D_{\text{corrigé}}(m)$	0,049796	0,048717	0,050338	0,048331	0,047553	0,048512	0,048508	0,048527	0,048787	0,048497	0,049407	0,049106
$D_{\text{réel}}(m)$	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
$\Delta D/D(\%)$	1,62	0,58	2,73	1,38	3,04	1,01	1,01	0,98	0,44	1,04	0,83	0,22

Tableau A18 (suite et fin) : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=49\text{mm}$  et  $\varepsilon_{\text{moy}}=5,5\text{E-}4\text{m}$ ,  $T=35^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,2683\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=2,07\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	0,11	0,112	0,12	0,123	0,127	0,128	0,129	0,132	0,135	0,14	0,142	0,145	0,165
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,00722	0,00729	0,00755	0,00765	0,00777	0,00780	0,00783	0,00793	0,00802	0,00817	0,00823	0,00831	0,00888
$\Delta H(m)$	1,15	1,19	1,26	1,31	1,35	1,42	1,5	1,52	1,6	1,65	1,72	1,78	1,81
$J=\Delta H/L$	0,5556	0,5749	0,6087	0,6329	0,6522	0,6860	0,7246	0,7343	0,7729	0,7971	0,8309	0,8599	0,8744
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,00969	0,00962	0,00968	0,00961	0,00962	0,00942	0,00920	0,00925	0,00912	0,00915	0,00902	0,00896	0,00949
$\varepsilon_{\text{moy}}(m)$	5,5E-04												
$\varepsilon/D$	1,1E-02												
$R$	2,6E+05	2,6E+05	2,7E+05	2,7E+05	2,8E+05	2,8E+05	2,8E+05	2,8E+05	2,9E+05	2,9E+05	2,9E+05	3,0E+05	3,2E+05
$f_r$	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395	0,0395
$f_{\text{achour}}$	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398	0,0398	0,0397
$\lambda$	1,0018	1,0018	1,0017	1,0017	1,0017	1,0017	1,0017	1,0016	1,0016	1,0016	1,0016	1,0016	1,0015
Observation	Rugueux												
$\Lambda (m)$	0,032322	0,032226	0,032304	0,032221	0,032236	0,031980	0,031701	0,031761	0,031592	0,031629	0,031469	0,031392	0,032072
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}}(m)$	0,049746	0,049599	0,049719	0,049591	0,049614	0,049220	0,048790	0,048882	0,048623	0,048679	0,048433	0,048315	0,049362
$D_{\text{corrigé}}(m)$	0,049835	0,049687	0,049805	0,049675	0,049697	0,049302	0,048871	0,048963	0,048702	0,048757	0,048510	0,048391	0,049436
$D_{\text{réel}}(m)$	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
$\Delta D/D (\%)$	1,71	1,40	1,64	1,38	1,42	0,62	0,26	0,08	0,61	0,50	1,01	1,26	0,89

Tableau A19 : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=56\text{mm}$  et  $\varepsilon_{\text{moy}}=3,8\text{E-}4\text{m}$ ,  $T=31^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,8897\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,98\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	0,007	0,008	0,009	0,01	0,012	0,015	0,022	0,032	0,035	0,04	0,05	0,065
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,00178	0,00191	0,00202	0,00214	0,00234	0,00262	0,00319	0,00386	0,00404	0,00432	0,00484	0,00553
$\Delta H(m)$	0,03	0,04	0,043	0,045	0,055	0,065	0,1	0,145	0,16	0,17	0,25	0,31
$J=\Delta H/L$	0,0152	0,0202	0,0217	0,0227	0,0278	0,0328	0,0505	0,0732	0,0808	0,0859	0,1263	0,1566
$Q/J^{1/2}(\text{m}^3/\text{s})$	0,01447	0,01342	0,01374	0,01417	0,01406	0,01449	0,01419	0,01425	0,01420	0,01474	0,01362	0,01397
$\varepsilon_{\text{moy}}(m)$	3,8E-04											
$\varepsilon/D$	6,9E-03											
$R$	5,1E+04	5,5E+04	5,8E+04	6,2E+04	6,8E+04	7,6E+04	9,2E+04	1,1E+05	1,2E+05	1,2E+05	1,4E+05	1,6E+05
$f_r$	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335
$f_{\text{achour}}$	0,0354	0,0353	0,0352	0,0351	0,0350	0,0348	0,0346	0,0345	0,0344	0,0344	0,0343	0,0342
$\lambda$	1,0109	1,0103	1,0098	1,0093	1,0086	1,0078	1,0066	1,0056	1,0054	1,0051	1,0046	1,0041
Observation	Transition											
$\Lambda(m)$	0,036743	0,035708	0,036028	0,036448	0,036343	0,036753	0,036468	0,036531	0,036481	0,037000	0,035911	0,036261
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}}(m)$	0,056551	0,054958	0,055450	0,056097	0,055935	0,056567	0,056127	0,056225	0,056147	0,056946	0,055270	0,055808
$D_{\text{corrigé}}(m)$	0,057166	0,055523	0,055992	0,056620	0,056418	0,057010	0,056500	0,056542	0,056451	0,057236	0,055525	0,056038
$D_{\text{réel}}(m)$	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
$\Delta D/D(\%)$	2,08	0,86	0,01	1,11	0,75	1,80	0,89	0,97	0,81	2,21	0,85	0,07

Tableau A19 (suite et fin): calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=56\text{mm}$  et  $\varepsilon_{\text{moy}}=3,8\text{E-}4\text{m}$ ,  $T=31^\circ\text{C}$ ,  $v=7,8897\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,98\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	0,075	0,082	0,1	0,135	0,145	0,16	0,165	0,19	0,21	0,25	0,32
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,00595	0,00622	0,00688	0,00802	0,00831	0,00874	0,00888	0,00954	0,01003	0,01096	0,01243
$\Delta H(m)$	0,36	0,38	0,5	0,69	0,75	0,8	0,857	1	1,05	1,2	1,56
$J=\Delta H/L$	0,1818	0,1919	0,2525	0,3485	0,3788	0,4040	0,4328	0,5051	0,5303	0,6061	0,7879
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,01395	0,01420	0,01370	0,01358	0,01351	0,01375	0,01349	0,01342	0,01378	0,01408	0,01400
$\varepsilon_{\text{moy}} (m)$	3,8E-04										
$\varepsilon/D$	6,9E-03										
$R$	1,7E+05	1,8E+05	2,0E+05	2,3E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,6E+05	2,7E+05	2,9E+05	3,2E+05	3,6E+05
$f_r$	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335	0,0335
$f_{\text{achour}}$	0,0342	0,0341	0,0341	0,0340	0,0340	0,0340	0,0340	0,0339	0,0339	0,0339	0,0339
$\lambda$	1,0039	1,0037	1,0034	1,0030	1,0029	1,0027	1,0027	1,0025	1,0024	1,0022	1,0020
Observation	Rugueux										
$\Lambda (m)$	0,036233	0,036483	0,035988	0,035872	0,035800	0,036040	0,035786	0,035713	0,036070	0,036367	0,036289
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}} (m)$	0,055765	0,056151	0,055388	0,055211	0,055099	0,055468	0,055078	0,054965	0,055515	0,055973	0,055852
$D_{\text{corrigé}} (m)$	0,055980	0,056359	0,055576	0,055374	0,055257	0,055621	0,055227	0,055105	0,055650	0,056098	0,055964
$D_{\text{réel}} (m)$	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
$\Delta D/D (\%)$	0,03	0,64	0,76	1,13	1,34	0,68	1,40	1,62	0,63	0,18	0,06

Tableau A20 : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=124\text{mm}$  et  $\varepsilon_{\text{moy}}=2,9\text{E-}4\text{m}$ ,  $T=33^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,5691\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,5\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	0,78	0,87	0,91	0,94	1	1,08	1,12	1,17	1,23	1,32	1,45	1,55
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,01955	0,02066	0,02114	0,02149	0,02218	0,02306	0,02349	0,02402	0,02464	0,02554	0,02679	0,02771
$\Delta H(m)$	0,045	0,05	0,052	0,05	0,053	0,055	0,06	0,065	0,068	0,07	0,072	0,075
$J=\Delta H/L$	0,0300	0,0333	0,0347	0,0333	0,0353	0,0367	0,0400	0,0433	0,0453	0,0467	0,0480	0,0500
$Q/J^{1/2}(\text{m}^3/\text{s})$	0,11287	0,11318	0,11355	0,11772	0,11800	0,12045	0,11747	0,11540	0,11573	0,11823	0,12228	0,12394
$\varepsilon_{\text{moy}}(m)$	2,9E-04											
$\varepsilon/D$	2,4E-03											
$R$	2,7E+05	2,8E+05	2,9E+05	2,9E+05	3,0E+05	3,1E+05	3,2E+05	3,3E+05	3,3E+05	3,5E+05	3,6E+05	3,8E+05
$f_r$	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245
$f_{\text{achour}}$	0,0253	0,0252	0,0252	0,0252	0,0252	0,0252	0,0252	0,0252	0,0251	0,0251	0,0251	0,0251
$\lambda$	1,0063	1,0060	1,0059	1,0058	1,0057	1,0055	1,0054	1,0053	1,0052	1,0050	1,0048	1,0047
Observation	Transition											
$\Lambda(m)$	0,078632	0,078716	0,078813	0,079899	0,079969	0,080596	0,079835	0,079297	0,079383	0,080029	0,081058	0,081473
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}}(m)$	0,121022	0,121151	0,121300	0,122972	0,123080	0,124045	0,122873	0,122045	0,122177	0,123173	0,124755	0,125395
$D_{\text{corrigé}}(m)$	0,121785	0,121879	0,122015	0,123686	0,123775	0,124723	0,123534	0,122688	0,122807	0,123788	0,125353	0,125978
$D_{\text{réel}}(m)$	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124
$\Delta D/D(\%)$	1,82	1,74	1,63	0,25	0,18	0,58	0,38	1,07	0,97	0,17	1,09	1,60

Tableau A20 (suite et fin) : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=124\text{mm}$  et  $\varepsilon_{\text{moy}}=2,9\text{E-}4\text{m}$ ,  $T=33^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,5691\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,5\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	1,57	1,67	1,72	1,75	1,83	1,98	2,34	2,57	2,73	2,9	3,1	3,3
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,02789	0,02878	0,02922	0,02948	0,03015	0,03139	0,03417	0,03583	0,03695	0,03810	0,03942	0,04069
$\Delta H(m)$	0,08	0,082	0,085	0,09	0,095	0,098	0,12	0,135	0,14	0,15	0,16	0,17
$J=\Delta H/L$	0,0533	0,0547	0,0567	0,0600	0,0633	0,0653	0,0800	0,0900	0,0933	0,1000	0,1067	0,1133
$Q/J^{1/2}(\text{m}^3/\text{s})$	0,12079	0,12311	0,12274	0,12034	0,11982	0,12279	0,12080	0,11945	0,12095	0,12049	0,12069	0,12086
$\varepsilon_{\text{moy}}(m)$	2,9E-04	2,9E-04	2,9E-04	2,9E-04	2,9E-04	2,9E-04						
$\varepsilon/D$	2,4E-03	2,4E-03	2,4E-03	2,4E-03	2,4E-03	2,4E-03						
$R$	3,8E+05	3,9E+05	4,0E+05	4,0E+05	4,1E+05	4,3E+05	4,6E+05	4,9E+05	5,0E+05	5,2E+05	5,3E+05	5,5E+05
$f_r$	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245	0,0245
$f_{\text{achour}}$	0,0251	0,0251	0,0251	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250	0,0250	0,0249	0,0249	0,0249	0,0249
$\lambda$	1,0046	1,0045	1,0044	1,0044	1,0043	1,0042	1,0039	1,0037	1,0036	1,0035	1,0034	1,0033
Observation	Transition	Rugueux	Rugueux	Rugueux	Rugueux	Rugueux						
$\Lambda(m)$	0,080681	0,081266	0,081174	0,080567	0,080435	0,081186	0,080684	0,080340	0,080722	0,080606	0,080656	0,080700
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}}(m)$	0,124176	0,125075	0,124934	0,124000	0,123797	0,124953	0,124179	0,123651	0,124239	0,124060	0,124136	0,124205
$D_{\text{corrigé}}(m)$	0,124750	0,125639	0,125490	0,124547	0,124332	0,125474	0,124660	0,124109	0,124687	0,124496	0,124560	0,124617
$D_{\text{réel}}(m)$	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124
$\Delta D/D(\%)$	0,60	1,32	1,20	0,44	0,27	1,19	0,53	0,09	0,55	0,40	0,45	0,50

Tableau A21 : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=130\text{mm}$  et  $\varepsilon_{\text{moy}}=1,1\text{E-}4\text{m}$ ,  $T=32^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,7261\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,5\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	0,45	0,58	0,65	0,68	0,71	0,82	0,89	0,93	0,99	0,96	1,05	1,32
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,01478	0,01682	0,01782	0,01823	0,01864	0,02005	0,02090	0,02138	0,02207	0,02172	0,02274	0,02554
$\Delta H(m)$	0,02	0,024	0,026	0,027	0,029	0,026	0,029	0,034	0,03	0,036	0,038	0,047
$J=\Delta H/L$	0,0133	0,0160	0,0173	0,0180	0,0193	0,0173	0,0193	0,0227	0,0200	0,0240	0,0253	0,0313
$Q/J^{1/2}(\text{m}^3/\text{s})$	0,12801	0,13295	0,13535	0,13590	0,13403	0,15231	0,15034	0,14199	0,15604	0,14023	0,14285	0,14429
$\varepsilon_{\text{moy}}(m)$	1,1E-04											
$\varepsilon/D$	8,7E-04											
$R$	1,9E+05	2,1E+05	2,3E+05	2,3E+05	2,4E+05	2,5E+05	2,6E+05	2,7E+05	2,8E+05	2,8E+05	2,9E+05	3,2E+05
$f_r$	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190
$f_{\text{achour}}$	0,0208	0,0206	0,0205	0,0205	0,0205	0,0204	0,0203	0,0203	0,0203	0,0203	0,0202	0,0201
$\lambda$	1,0185	1,0167	1,0160	1,0157	1,0154	1,0145	1,0141	1,0138	1,0135	1,0136	1,0131	1,0120
Observation	Transition											
$\Lambda(m)$	0,078726	0,079870	0,080417	0,080542	0,080119	0,084124	0,083709	0,081901	0,084905	0,081513	0,082091	0,082405
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}}(m)$	0,121166	0,122927	0,123769	0,123961	0,123310	0,129474	0,128835	0,126053	0,130676	0,125456	0,126345	0,126829
$D_{\text{corrigé}}(m)$	0,123410	0,124985	0,125748	0,125907	0,125213	0,131358	0,130648	0,127795	0,132436	0,127167	0,128006	0,128345
$D_{\text{réel}}(m)$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
$\Delta D/D(\%)$	5,34	4,01	3,38	3,25	3,82	1,04	0,50	1,73	1,87	2,23	1,56	1,29

Tableau A21 (suite) : calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=130\text{mm}$  et  $\varepsilon_{\text{moy}}=1,1\text{E-}4\text{m}$   $T=32^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,7261\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,5\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	1,16	1,26	1,41	1,52	1,61	1,73	1,84	1,96	1,95	2,05	2,09	2,2
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,02392	0,02494	0,02641	0,02744	0,02825	0,02930	0,03024	0,03122	0,03114	0,03194	0,03226	0,03311
$\Delta H(m)$	0,04	0,044	0,05	0,051	0,052	0,053	0,054	0,055	0,055	0,06	0,061	0,065
$J=\Delta H/L$	0,0267	0,0293	0,0333	0,0340	0,0347	0,0353	0,0360	0,0367	0,0367	0,0400	0,0407	0,0433
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,14647	0,14564	0,14466	0,14881	0,15175	0,15590	0,15936	0,16306	0,16264	0,15972	0,15997	0,15906
$\varepsilon_{\text{moy}}(m)$	1,1E-04											
$\varepsilon/D$	8,7E-04											
$R$	3,0E+05	3,2E+05	3,3E+05	3,5E+05	3,6E+05	3,7E+05	3,8E+05	4,0E+05	3,9E+05	4,0E+05	4,1E+05	4,2E+05
$f_r$	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190
$f_{\text{achour}}$	0,0202	0,0201	0,0201	0,0201	0,0200	0,0200	0,0200	0,0199	0,0199	0,0199	0,0199	0,0199
$\lambda$	1,0126	1,0122	1,0116	1,0113	1,0110	1,0107	1,0104	1,0101	1,0101	1,0099	1,0098	1,0096
Observation	Transition											
$\Lambda (m)$	0,082877	0,082699	0,082487	0,083382	0,084005	0,084876	0,085591	0,086344	0,086258	0,085664	0,085715	0,085529
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}}(m)$	0,127556	0,127282	0,126954	0,128332	0,129292	0,130632	0,131732	0,132891	0,132759	0,131845	0,131924	0,131637
$D_{\text{corrigé}}(m)$	0,129165	0,128833	0,128430	0,129778	0,130714	0,132025	0,133102	0,134236	0,134106	0,133154	0,133223	0,132906
$D_{\text{réel}}(m)$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
$\Delta D/D (\%)$	0,65	0,91	1,22	0,17	0,55	1,56	2,39	3,26	3,16	2,43	2,48	2,24

Tableau A21 (suite et fin): calcul des diamètres théoriques pour  $D_{\text{réel}}=130\text{mm}$  et  $\varepsilon_{\text{moy}}=1,1\text{E-}4\text{m}$ ,  $T=32^\circ\text{C}$ ,  $\nu=7,7261\text{E-}7\text{m}^2/\text{s}$ ,  $L=1,5\text{m}$ 

$\Delta h(m)$	2,38	2,51	2,8	2,93	3,05	3,19	3,33	3,5	3,62	3,75	3,84
$Q(\text{m}^3/\text{s})$	0,03446	0,03541	0,03743	0,03830	0,03909	0,03999	0,04088	0,04192	0,04265	0,04342	0,04395
$\Delta H(m)$	0,07	0,074	0,08	0,082	0,084	0,085	0,088	0,09	0,093	0,095	0,098
$J=\Delta H/L$	0,0467	0,0493	0,0533	0,0547	0,0560	0,0567	0,0587	0,0600	0,0620	0,0633	0,0653
$Q/J^{1/2} (\text{m}^3/\text{s})$	0,15953	0,15941	0,16207	0,16382	0,16519	0,16801	0,16876	0,17115	0,17128	0,17253	0,17193
$\varepsilon_{\text{moy}}(m)$	1,1E-04										
$\varepsilon/D$	8,7E-04										
$R$	4,4E+05	4,5E+05	4,7E+05	4,9E+05	5,0E+05	5,1E+05	5,2E+05	5,3E+05	5,4E+05	5,5E+05	5,6E+05
$f_r$	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190	0,0190
$f_{\text{achour}}$	0,0199	0,0198	0,0198	0,0198	0,0198	0,0198	0,0197	0,0197	0,0197	0,0197	0,0197
$\lambda$	1,0093	1,0091	1,0087	1,0085	1,0084	1,0082	1,0081	1,0079	1,0078	1,0077	1,0076
Observation	Transition										
$\Lambda(m)$	0,085625	0,085600	0,086143	0,086497	0,086773	0,087334	0,087484	0,087955	0,087980	0,088225	0,088108
$D_{h0}$	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391	1,5391
$D_{\text{calculé}}(m)$	0,131784	0,131746	0,132583	0,133126	0,133551	0,134415	0,134646	0,135371	0,135409	0,135786	0,135605
$D_{\text{corrigé}}(m)$	0,133012	0,132946	0,133735	0,134261	0,134670	0,135519	0,135731	0,136439	0,136462	0,136826	0,136633
$D_{\text{réel}}(m)$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
$\Delta D/D(\%)$	2,32	2,27	2,87	3,28	3,59	4,25	4,41	4,95	4,97	5,25	5,10

Tableau A22: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,04m$  et  $\varepsilon=2 mm$ Tableau A23: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,05m$  et  $\varepsilon=2 mm$ 

$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D$ (%)	$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D$ (%)
0,0005652	0,018576	0,004147	0,0259553	1,5391	0,039948	0,1313	0,0006872	0,008237	0,007572	0,0323685	1,5391	0,049818	0,3654
0,0006280	0,022868	0,004153	0,0259689	1,5391	0,039968	0,0790	0,0007854	0,010690	0,007596	0,0324069	1,5391	0,049877	0,2463
0,0006908	0,027640	0,004155	0,0259741	1,5391	0,039976	0,0589	0,0008836	0,013458	0,007617	0,0324388	1,5391	0,049926	0,1477
0,0007538	0,032856	0,0041590	0,0259821	1,5391	0,039989	0,0281	0,0009817	0,016587	0,007622	0,0324479	1,5391	0,049940	0,1198
0,0008164	0,038512	0,004160	0,0259855	1,5391	0,039994	0,0150	0,0010799	0,020046	0,007627	0,0324554	1,5391	0,049952	0,0965
0,0008792	0,044652	0,004161	0,0259869	1,5391	0,039996	0,0097	0,0011781	0,023826	0,007632	0,0324633	1,5391	0,049964	0,0722
0,0009420	0,051212	0,004163	0,0259912	1,5391	0,040003	0,0069	0,0012763	0,027924	0,007638	0,0324718	1,5391	0,049977	0,0462
0,0010048	0,058227	0,004164	0,0259945	1,5391	0,040008	0,0198	0,0013744	0,032374	0,007639	0,0324732	1,5391	0,049979	0,0418
0,0010676	0,065742	0,004164	0,0259939	1,5391	0,040007	0,0172	0,0014726	0,037128	0,007642	0,0324792	1,5391	0,049988	0,0233
0,0011304	0,073703	0,004164	0,0259939	1,5391	0,040007	0,0175	0,0015708	0,042210	0,007646	0,0324841	1,5391	0,049996	0,0081
0,0011932	0,082110	0,004164	0,0259945	1,5391	0,040008	0,0196	0,0016690	0,047658	0,007645	0,0324834	1,5391	0,049995	0,0102
0,0012566	0,090981	0,004166	0,0259990	1,5391	0,040015	0,0370	0,0017671	0,053429	0,007645	0,0324830	1,5391	0,049994	0,0116
0,0013194	0,100299	0,004166	0,0259992	1,5391	0,040015	0,0376	0,0018653	0,059524	0,007645	0,0324838	1,5391	0,049995	0,0090
0,0013822	0,110081	0,004166	0,0259989	1,5391	0,040015	0,0365	0,0019635	0,065955	0,007646	0,0324839	1,5391	0,049996	0,0086
0,0014451	0,120327	0,004166	0,0259989	1,5391	0,040015	0,0365	0,0020617	0,072710	0,007646	0,0324845	1,5391	0,049997	0,0068
0,0015079	0,131019	0,004166	0,0259987	1,5391	0,040014	0,0357	0,0021598	0,079801	0,007646	0,0324840	1,5391	0,049996	0,0085
0,0015707	0,142157	0,004166	0,0259987	1,5391	0,040014	0,0359	0,0022580	0,087229	0,007645	0,0324836	1,5391	0,049995	0,0098
0,0016335	0,153760	0,004166	0,0259985	1,5391	0,040014	0,0350	0,0023562	0,094980	0,007645	0,0324836	1,5391	0,049995	0,0096
0,0016963	0,165809	0,004166	0,0259985	1,5391	0,040014	0,0351	0,0024544	0,103054	0,007646	0,0324841	1,5391	0,049996	0,0082
0,0017592	0,178322	0,004166	0,0259988	1,5391	0,040015	0,0363	0,0025525	0,111465	0,007645	0,0324836	1,5391	0,049995	0,0096
0,0018220	0,191281	0,004166	0,0259988	1,5391	0,040014	0,0362	0,0026507	0,120200	0,007646	0,0324840	1,5391	0,049996	0,0086
0,0018846	0,204704	0,004165	0,0259976	1,5391	0,040013	0,0315	0,0027489	0,129271	0,007646	0,0324840	1,5391	0,049996	0,0086
0,0019474	0,218591	0,004165	0,0259972	1,5391	0,040012	0,0300	0,0028471	0,138665	0,007646	0,0324843	1,5391	0,049996	0,0076
0,0020105	0,232907	0,004166	0,0259988	1,5391	0,040015	0,0363	0,0029452	0,148396	0,007645	0,0324838	1,5391	0,049996	0,0089
0,0020733	0,247704	0,004166	0,0259984	1,5391	0,040014	0,0348	0,0030434	0,158463	0,007645	0,0324836	1,5391	0,049995	0,0097
0,0021362	0,262931	0,004166	0,0259990	1,5391	0,040015	0,0370	0,0031416	0,168841	0,007646	0,0324841	1,5391	0,049996	0,0082
0,0021990	0,278639	0,004166	0,0259986	1,5391	0,040014	0,0356	0,0032397	0,179568	0,007645	0,0324835	1,5391	0,049995	0,0100
0,0022608	0,294775	0,004164	0,0259945	1,5391	0,040008	0,0198	0,0033379	0,190606	0,007645	0,0324839	1,5391	0,049996	0,0088
0,0023236	0,311375	0,004164	0,0259946	1,5391	0,040008	0,0199	0,0034361	0,201993	0,007645	0,0324837	1,5391	0,049995	0,0095
0,0023864	0,328440	0,004164	0,0259945	1,5391	0,040008	0,0196	0,0035343	0,213691	0,007646	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0084
0,0024499	0,345951	0,004165	0,0259972	1,5391	0,040012	0,0302	0,0036324	0,225725	0,007645	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0089
0,0025132	0,363926	0,004166	0,0259990	1,5391	0,040015	0,0369	0,0037306	0,238096	0,007645	0,0324837	1,5391	0,049995	0,0090
0,0025760	0,382347	0,004166	0,0259989	1,5391	0,040015	0,0366	0,0038288	0,250790	0,007646	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0086
0,0026388	0,401232	0,004166	0,0259987	1,5391	0,040014	0,0359	0,0039270	0,263821	0,007646	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0087
0,0027016	0,420564	0,004166	0,0259986	1,5391	0,040014	0,0356	0,0040251	0,277175	0,007645	0,0324837	1,5391	0,049995	0,0093
0,0027645	0,440342	0,004166	0,0259990	1,5391	0,040015	0,0370	0,0041233	0,290865	0,007645	0,0324837	1,5391	0,049995	0,0093
0,0028273	0,460601	0,004166	0,0259988	1,5391	0,040014	0,0360	0,0042215	0,304879	0,007645	0,0324839	1,5391	0,049996	0,0090
0,0028888	0,481290	0,004164	0,0259945	1,5391	0,040008	0,0195	0,0043197	0,319217	0,007646	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0084
0,0029516	0,502442	0,004164	0,0259945	1,5391	0,040008	0,0196	0,0044179	0,333904	0,007645	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0088
0,0030158	0,524058	0,004166	0,0259988	1,5391	0,040015	0,0363	0,0045160	0,348901	0,007645	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0090
0,0030786	0,546121	0,004166	0,0259987	1,5391	0,040014	0,0359	0,0046142	0,364235	0,007645	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0088
0,0031412	0,568630	0,004166	0,0259981	1,5391	0,040013	0,0336	0,0047124	0,379905	0,007645	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0088
0,0037698	0,818833	0,004166	0,0259990	1,5391	0,040015	0,0369	0,0048106	0,395899	0,007646	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0086
0,0043981	1,114518	0,004166	0,0259990	1,5391	0,040015	0,0369	0,0049087	0,412217	0,007645	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0089
0,0050264	1,455703	0,004166	0,0259990	1,5391	0,040015	0,0369	0,0058905	0,593597	0,007646	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0087
							0,0068723	0,807948	0,007646	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0084
							0,0078540	1,055283	0,007646	0,0324837	1,5391	0,049996	0,0087

Tableau A24: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,06m$  et  $\varepsilon=2mm$ Tableau A25: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,08m$  et  $\varepsilon=2mm$ 

$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D$ (%)	$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D$ (%)
0,0009896	0,006354	0,012415	0,0388297	1,5391	0,059762	0,3975	0,002011	0,005539	0,027015	0,0517534	1,5391	0,07965	0,4355
0,0011310	0,008262	0,012443	0,0388622	1,5391	0,059812	0,3137	0,002262	0,006969	0,027096	0,0518107	1,5391	0,07974	0,3245
0,0012723	0,010406	0,012472	0,0388961	1,5391	0,059865	0,2262	0,002513	0,008568	0,027152	0,0518503	1,5391	0,07980	0,2478
0,0014137	0,012803	0,012494	0,0389210	1,5391	0,059903	0,1621	0,002765	0,010347	0,027178	0,0518689	1,5391	0,07983	0,2118
0,0015551	0,015466	0,012505	0,0389332	1,5391	0,059922	0,1308	0,003267	0,014396	0,027230	0,0519056	1,5391	0,07989	0,1410
0,0016965	0,018374	0,012516	0,0389458	1,5391	0,059941	0,0983	0,003519	0,016680	0,027244	0,0519152	1,5391	0,07990	0,1224
0,0018378	0,021530	0,012525	0,0389565	1,5391	0,059958	0,0707	0,003770	0,019120	0,027264	0,0519291	1,5391	0,07992	0,0956
0,0019792	0,024955	0,012529	0,0389610	1,5391	0,059964	0,0593	0,004021	0,021733	0,027277	0,0519384	1,5391	0,07994	0,0777
0,0021206	0,028612	0,012537	0,038970	1,5391	0,059978	0,0361	0,004273	0,024515	0,027288	0,0519464	1,5391	0,07995	0,0623
0,0022619	0,032522	0,012543	0,0389767	1,5391	0,059989	0,0191	0,004524	0,027458	0,027301	0,0519554	1,5391	0,07996	0,0450
0,0024033	0,036682	0,012548	0,0389832	1,5391	0,059999	0,0024	0,004775	0,030590	0,027302	0,0519564	1,5391	0,07997	0,0430
0,0025447	0,041084	0,012555	0,0389904	1,5391	0,060010	0,0162	0,005027	0,033895	0,027303	0,0519566	1,5391	0,07997	0,0426
0,0026861	0,045771	0,012555	0,0389913	1,5391	0,060011	0,0185	0,005278	0,037367	0,027303	0,0519571	1,5391	0,07997	0,0417
0,0028274	0,050715	0,012555	0,0389910	1,5391	0,060011	0,0178	0,005529	0,041011	0,027303	0,0519569	1,5391	0,07997	0,0422
0,0029688	0,055909	0,012556	0,0389917	1,5391	0,060012	0,0196	0,005781	0,044828	0,027302	0,0519559	1,5391	0,07996	0,0440
0,0031102	0,061361	0,012556	0,0389918	1,5391	0,060012	0,0197	0,006032	0,048811	0,027302	0,0519561	1,5391	0,07997	0,0436
0,0032516	0,067073	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,006283	0,052961	0,027303	0,0519565	1,5391	0,07997	0,0430
0,0033929	0,073033	0,012555	0,0389908	1,5391	0,060010	0,0172	0,006535	0,057283	0,027302	0,0519563	1,5391	0,07997	0,0432
0,0035343	0,079242	0,012555	0,0389913	1,5391	0,060011	0,0184	0,006786	0,061772	0,027303	0,0519566	1,5391	0,07997	0,0427
0,0036757	0,085709	0,012555	0,0389913	1,5391	0,060011	0,0185	0,007037	0,066434	0,027303	0,0519566	1,5391	0,07997	0,0422
0,0038170	0,092426	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0183	0,007289	0,071261	0,027303	0,0519569	1,5391	0,07997	0,0422
0,0039584	0,099401	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,007540	0,076262	0,027303	0,0519566	1,5391	0,07997	0,0427
0,0040998	0,106624	0,012556	0,0389916	1,5391	0,060011	0,0192	0,007791	0,081436	0,027302	0,0519559	1,5391	0,07996	0,0440
0,0042412	0,114106	0,012556	0,0389915	1,5391	0,060011	0,0191	0,008043	0,086769	0,027303	0,0519567	1,5391	0,07997	0,0423
0,0043825	0,121848	0,012555	0,0389908	1,5391	0,060010	0,0172	0,008294	0,092283	0,027302	0,0519558	1,5391	0,07996	0,0443
0,0045239	0,129828	0,012555	0,0389914	1,5391	0,060011	0,0186	0,008545	0,097955	0,027303	0,0519565	1,5391	0,07997	0,0429
0,0046653	0,138076	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0179	0,008797	0,103807	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0435
0,0048066	0,146564	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,009048	0,109818	0,027303	0,0519566	1,5391	0,07997	0,0427
0,0049480	0,155320	0,012555	0,0389909	1,5391	0,060011	0,0175	0,009299	0,116003	0,027303	0,0519566	1,5391	0,07997	0,0427
0,0050894	0,164314	0,012555	0,0389914	1,5391	0,060011	0,0186	0,009551	0,122360	0,027303	0,0519566	1,5391	0,07997	0,0427
0,0052308	0,173568	0,012555	0,0389915	1,5391	0,060011	0,0190	0,009802	0,128884	0,027303	0,0519566	1,5391	0,07997	0,0427
0,0053721	0,183080	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,010053	0,135580	0,027302	0,0519564	1,5391	0,07997	0,0432
0,0055135	0,192841	0,012555	0,0389913	1,5391	0,060011	0,0185	0,010304	0,142443	0,027302	0,0519564	1,5391	0,07997	0,0430
0,0056549	0,202861	0,012555	0,0389913	1,5391	0,060011	0,0184	0,010556	0,149479	0,027302	0,0519564	1,5391	0,07997	0,0431
0,0057963	0,213129	0,012555	0,0389914	1,5391	0,060011	0,0187	0,010807	0,156680	0,027302	0,0519565	1,5391	0,07997	0,0430
0,0059376	0,223656	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0179	0,011058	0,164049	0,027303	0,0519566	1,5391	0,07997	0,0427
0,0060790	0,234432	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,011310	0,171597	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0435
0,0062204	0,245457	0,012555	0,0389914	1,5391	0,060011	0,0188	0,011561	0,179304	0,027302	0,0519564	1,5391	0,07997	0,0432
0,0063617	0,256749	0,012555	0,0389910	1,5391	0,060011	0,0178	0,011812	0,187184	0,027303	0,0519565	1,5391	0,07997	0,0428
0,0065031	0,268282	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0183	0,012064	0,195238	0,027302	0,0519563	1,5391	0,07997	0,0433
0,0066445	0,280072	0,012555	0,0389913	1,5391	0,060011	0,0185	0,012315	0,203457	0,027302	0,0519563	1,5391	0,07997	0,0434
0,0067859	0,292122	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0183	0,012566	0,211842	0,027303	0,0519566	1,5391	0,07997	0,0428
0,0069272	0,304420	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0180	0,012817	0,220506	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0434
0,0070686	0,316967	0,012555	0,0389913	1,5391	0,060011	0,0184	0,013068	0,229213	0,027302	0,0519563	1,5391	0,07997	0,0432
0,0072100	0,329614	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,013319	0,237921	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0073514	0,342261	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0180	0,013570	0,246629	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0074928	0,354908	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,013821	0,255337	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0076342	0,367555	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0180	0,014072	0,264045	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0077756	0,380202	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,014323	0,272753	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0079170	0,392849	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0180	0,014574	0,281461	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0080584	0,405496	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,014825	0,290169	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0081998	0,418143	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0180	0,015076	0,298877	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0083412	0,430790	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,015327	0,307585	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0084826	0,443437	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0180	0,015578	0,316293	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0086240	0,456084	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,015829	0,325001	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0087654	0,468731	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0180	0,016080	0,333709	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0089068	0,481378	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,016331	0,342417	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0090482	0,494025	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0180	0,016582	0,351125	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0091896	0,506672	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,016833	0,359833	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0093310	0,519319	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0180	0,017084	0,368541	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0094724	0,531966	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,017335	0,377249	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0096138	0,544613	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0180	0,017586	0,385957	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0097552	0,557260	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,017837	0,394665	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0098966	0,569907	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0180	0,018088	0,403373	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0100380	0,582554	0,012555	0,0389912	1,5391	0,060011	0,0182	0,018339	0,412081	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432
0,0101794	0,595201	0,012555	0,0389911	1,5391	0,060011	0,0180	0,018590	0,420789	0,027302	0,0519562	1,5391	0,07997	0,0432</

Tableau A26: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,1m$  et  $\varepsilon=2mm$       Tableau A27: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,125m$  et  $\varepsilon=2mm$ 

$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D$ (%)	$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D$ (%)
0,0031416	0,004060	0,049305	0,0646925	1,5391	0,099568	0,4343	0,004909	0,003004	0,089562	0,0807803	1,5391	0,124328	0,5404
0,0035343	0,005111	0,049437	0,0647569	1,5391	0,099667	0,3345	0,005522	0,003785	0,089762	0,0808476	1,5391	0,124432	0,4568
0,0039270	0,006281	0,049550	0,0648121	1,5391	0,099752	0,2490	0,006136	0,004656	0,089925	0,0809020	1,5391	0,124515	0,3892
0,0043197	0,007584	0,049603	0,0648375	1,5391	0,099791	0,2098	0,006750	0,005618	0,090051	0,0809442	1,5391	0,124580	0,3369
0,0047124	0,009006	0,049657	0,0648637	1,5391	0,099831	0,1693	0,007363	0,006668	0,090171	0,0809846	1,5391	0,124643	0,2868
0,0051051	0,010543	0,049719	0,0648940	1,5391	0,099878	0,1226	0,007977	0,007804	0,090296	0,0810264	1,5391	0,124707	0,2351
0,0054978	0,012215	0,049744	0,0649062	1,5391	0,099896	0,1037	0,008590	0,009037	0,090365	0,0810494	1,5391	0,124742	0,2066
0,0058905	0,014000	0,049784	0,0649254	1,5391	0,099926	0,0741	0,009204	0,010356	0,090444	0,0810758	1,5391	0,124783	0,1740
0,0062832	0,015912	0,049810	0,0649382	1,5391	0,099946	0,0544	0,009818	0,011769	0,090497	0,0810935	1,5391	0,124810	0,1521
0,0066759	0,017951	0,049827	0,0649464	1,5391	0,099958	0,0418	0,010431	0,013279	0,090521	0,0811016	1,5391	0,124823	0,1421
0,0070686	0,020108	0,049848	0,0649565	1,5391	0,099974	0,0261	0,011045	0,014878	0,090549	0,0811109	1,5391	0,124837	0,1306
0,0074613	0,022402	0,049851	0,0649578	1,5391	0,099976	0,0242	0,011658	0,016567	0,090577	0,0811201	1,5391	0,124851	0,1193
0,0078540	0,024822	0,049851	0,0649579	1,5391	0,099976	0,0241	0,012272	0,018349	0,090596	0,0811265	1,5391	0,124861	0,1114
0,0082467	0,027365	0,049852	0,0649584	1,5391	0,099977	0,0232	0,012886	0,020228	0,090600	0,0811278	1,5391	0,124863	0,1098
0,0086394	0,030033	0,049852	0,0649585	1,5391	0,099977	0,0231	0,013499	0,022201	0,090599	0,0811274	1,5391	0,124862	0,1103
0,0090321	0,032829	0,049849	0,0649572	1,5391	0,099975	0,0251	0,014113	0,024268	0,090593	0,0811256	1,5391	0,124860	0,1125
0,0094248	0,035746	0,049849	0,0649571	1,5391	0,099975	0,0253	0,014726	0,026424	0,090594	0,0811257	1,5391	0,124860	0,1124
0,0098175	0,038785	0,049850	0,0649577	1,5391	0,099976	0,0244	0,015954	0,031010	0,090596	0,0811264	1,5391	0,124861	0,1115
0,0102102	0,041950	0,049850	0,0649576	1,5391	0,099976	0,0244	0,016567	0,033440	0,090597	0,0811270	1,5391	0,124862	0,1108
0,0106029	0,045237	0,049851	0,0649581	1,5391	0,099976	0,0236	0,017181	0,035964	0,090596	0,0811265	1,5391	0,124861	0,1114
0,0109956	0,048651	0,049851	0,0649579	1,5391	0,099976	0,0240	0,017794	0,038578	0,090597	0,0811268	1,5391	0,124861	0,1110
0,0113883	0,052187	0,049851	0,0649581	1,5391	0,099976	0,0236	0,018408	0,041285	0,090596	0,0811266	1,5391	0,124861	0,1113
0,0117810	0,055849	0,049851	0,0649580	1,5391	0,099976	0,0239	0,019022	0,044086	0,090593	0,0811256	1,5391	0,124860	0,1125
0,0121737	0,059638	0,049850	0,0649572	1,5391	0,099975	0,0250	0,019635	0,046973	0,090596	0,0811266	1,5391	0,124861	0,1112
0,0125664	0,063544	0,049851	0,0649579	1,5391	0,099976	0,0240	0,020249	0,049957	0,090594	0,0811259	1,5391	0,124860	0,1121
0,0129591	0,067581	0,049850	0,0649573	1,5391	0,099975	0,0249	0,020862	0,053028	0,090597	0,0811267	1,5391	0,124861	0,1112
0,0133518	0,071735	0,049851	0,0649580	1,5391	0,099976	0,0239	0,021476	0,056196	0,090594	0,0811259	1,5391	0,124860	0,1121
0,0137445	0,076021	0,049850	0,0649573	1,5391	0,099975	0,0250	0,022090	0,059450	0,090597	0,0811267	1,5391	0,124861	0,1112
0,0141372	0,080423	0,049851	0,0649579	1,5391	0,099976	0,0240	0,022703	0,062798	0,090597	0,0811268	1,5391	0,124861	0,1110
0,0145299	0,084952	0,049851	0,0649580	1,5391	0,099976	0,0238	0,023317	0,066240	0,090596	0,0811265	1,5391	0,124861	0,1114
0,0149226	0,089608	0,049851	0,0649578	1,5391	0,099976	0,0242	0,023930	0,069772	0,090596	0,0811265	1,5391	0,124861	0,1114
0,0153153	0,094385	0,049851	0,0649579	1,5391	0,099976	0,0239	0,024544	0,073397	0,090595	0,0811263	1,5391	0,124861	0,1117
0,0157081	0,099290	0,049851	0,0649578	1,5391	0,099976	0,0242	0,025158	0,077112	0,090596	0,0811264	1,5391	0,124861	0,1115
0,0161007	0,104315	0,049851	0,0649578	1,5391	0,099976	0,0242	0,025771	0,080921	0,090595	0,0811261	1,5391	0,124860	0,1118
0,0164934	0,109468	0,049850	0,0649575	1,5391	0,099975	0,0246	0,026385	0,084820	0,090595	0,0811262	1,5391	0,124860	0,1118
0,0168861	0,114742	0,049850	0,0649576	1,5391	0,099976	0,0244	0,026998	0,088808	0,090597	0,0811267	1,5391	0,124861	0,1112
0,0172788	0,120138	0,049851	0,0649579	1,5391	0,099976	0,0240	0,027612	0,092894	0,090595	0,0811261	1,5391	0,124860	0,1118
0,0176715	0,125665	0,049850	0,0649575	1,5391	0,099975	0,0246	0,028226	0,097067	0,090596	0,0811264	1,5391	0,124861	0,1116
0,0180642	0,131310	0,049851	0,0649577	1,5391	0,099976	0,0243	0,028839	0,101333	0,090596	0,0811264	1,5391	0,124861	0,1115
0,0184569	0,137081	0,049851	0,0649577	1,5391	0,099976	0,0243	0,029454	0,105692	0,090598	0,0811273	1,5391	0,124862	0,1104
0,0188496	0,142978	0,049850	0,0649576	1,5391	0,099976	0,0245	0,030066	0,110142	0,090595	0,0811262	1,5391	0,124860	0,1118
0,0192423	0,148998	0,049850	0,0649575	1,5391	0,099975	0,0246	0,030680	0,114682	0,090596	0,0811264	1,5391	0,124861	0,1115
0,0196350	0,155139	0,049851	0,0649577	1,5391	0,099976	0,0242	0,036816	0,165143	0,090595	0,0811263	1,5391	0,124861	0,1116
0,0235620	0,223402	0,049850	0,0649576	1,5391	0,099976	0,0244	0,042952	0,224777	0,090596	0,0811200	1,5391	0,124851	0,1194
0,0274890	0,304073	0,049851	0,0649577	1,5391	0,099976	0,0243	0,049088	0,293587	0,090596	0,0811263	1,5391	0,124861	0,1116
0,0314160	0,397158	0,049850	0,0649577	1,5391	0,099976	0,0243							

Tableau A28: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,15m$  et  $\epsilon=2mm$ Tableau A29: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,2m$  et  $\epsilon=2mm$ 

$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$	$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$
0,0070686	0,002347	0,145907	0,0969095	1,5391	0,149152	0,5683	0,012566	0,001581	0,316042	0,1293957	1,5391	0,199151	0,4261
0,0079522	0,002948	0,146462	0,0970468	1,5391	0,149364	0,4260	0,014137	0,001989	0,316990	0,1295410	1,5391	0,199375	0,3134
0,0088357	0,003622	0,146814	0,0971339	1,5391	0,149498	0,3360	0,015708	0,002443	0,317804	0,1296654	1,5391	0,199567	0,2171
0,0097193	0,004374	0,146959	0,0971697	1,5391	0,149553	0,2990	0,017279	0,002945	0,318398	0,1297563	1,5391	0,199706	0,1470
0,0106029	0,005187	0,147220	0,0972341	1,5391	0,149652	0,2325	0,018850	0,003491	0,319027	0,1298521	1,5391	0,199854	0,0730
0,0114865	0,006070	0,147433	0,0972865	1,5391	0,149733	0,1785	0,020420	0,004080	0,319694	0,1299538	1,5391	0,200010	0,0052
0,0123700	0,007028	0,147555	0,0973167	1,5391	0,149779	0,1475	0,021991	0,004734	0,319621	0,1299426	1,5391	0,199993	0,0033
0,0132536	0,008054	0,147682	0,0973480	1,5391	0,149827	0,1153	0,023562	0,005433	0,319663	0,1299491	1,5391	0,200003	0,0016
0,0141372	0,009155	0,147752	0,0973653	1,5391	0,149854	0,0975	0,025133	0,006181	0,319677	0,1299512	1,5391	0,200007	0,0033
0,0150208	0,010329	0,147796	0,0973761	1,5391	0,149871	0,0864	0,026704	0,006979	0,319649	0,1299469	1,5391	0,200000	0,0000
0,0159043	0,011572	0,147846	0,0973884	1,5391	0,149889	0,0738	0,028274	0,007824	0,319653	0,1299476	1,5391	0,200001	0,0005
0,0167879	0,012883	0,147907	0,0974033	1,5391	0,149912	0,0585	0,029845	0,008741	0,319662	0,1299489	1,5391	0,200003	0,0015
0,0176715	0,014268	0,147942	0,0974120	1,5391	0,149926	0,0495	0,031416	0,009659	0,319657	0,1299482	1,5391	0,200002	0,0010
0,0185550	0,015722	0,147981	0,0974216	1,5391	0,149941	0,0396	0,032987	0,010648	0,319673	0,1299506	1,5391	0,200006	0,0028
0,0194386	0,017247	0,148016	0,0973774	1,5391	0,149873	0,0850	0,034558	0,011686	0,319676	0,1299511	1,5391	0,200006	0,0032
0,0203222	0,018852	0,148010	0,0974287	1,5391	0,149952	0,0323	0,036128	0,012774	0,319658	0,1299483	1,5391	0,200002	0,0010
0,0212058	0,020257	0,148010	0,0974287	1,5391	0,149952	0,0323	0,037699	0,013909	0,319657	0,1299482	1,5391	0,200002	0,0009
0,0220893	0,022273	0,148011	0,0974288	1,5391	0,149952	0,0323	0,039270	0,015092	0,319659	0,1299485	1,5391	0,200002	0,0012
0,0229729	0,024091	0,148009	0,0974228	1,5391	0,149942	0,0384	0,040841	0,016324	0,319655	0,1299478	1,5391	0,200001	0,0006
0,0238565	0,025978	0,148014	0,0974297	1,5391	0,149953	0,0313	0,042412	0,017603	0,319662	0,1299490	1,5391	0,200003	0,0015
0,0247401	0,027939	0,148012	0,0974291	1,5391	0,149952	0,0320	0,043982	0,018931	0,319663	0,1299491	1,5391	0,200003	0,0016
0,0256237	0,029970	0,148013	0,0974293	1,5391	0,149952	0,0318	0,045553	0,020307	0,319666	0,1299495	1,5391	0,200004	0,0019
0,0265072	0,032072	0,148013	0,0974295	1,5391	0,149953	0,0316	0,047124	0,021737	0,319626	0,1299435	1,5391	0,199995	0,0027
0,0273908	0,034248	0,148009	0,0974283	1,5391	0,149951	0,0327	0,048695	0,023206	0,319656	0,1299480	1,5391	0,200002	0,0008
0,0282744	0,036491	0,148013	0,0974295	1,5391	0,149953	0,0316	0,050266	0,024726	0,319664	0,1299493	1,5391	0,200004	0,0018
0,0291580	0,038809	0,148010	0,0974287	1,5391	0,149951	0,0324	0,051836	0,026297	0,319655	0,1299479	1,5391	0,200001	0,0007
0,0300415	0,041195	0,148013	0,0974294	1,5391	0,149952	0,0317	0,053407	0,027913	0,319666	0,1299496	1,5391	0,200004	0,0020
0,0309251	0,043656	0,148009	0,0974285	1,5391	0,149951	0,0326	0,054978	0,029581	0,319656	0,1299480	1,5391	0,200002	0,0008
0,0318087	0,046184	0,148013	0,0974262	1,5391	0,149948	0,0349	0,056549	0,031294	0,319663	0,1299491	1,5391	0,200003	0,0017
0,0326922	0,048785	0,148013	0,0974295	1,5391	0,149953	0,0315	0,058120	0,033056	0,319667	0,1299497	1,5391	0,200004	0,0021
0,0335758	0,051459	0,148012	0,0974291	1,5391	0,149952	0,0320	0,059690	0,034868	0,319662	0,1299489	1,5391	0,200003	0,0015
0,0344594	0,054202	0,148013	0,0974294	1,5391	0,149953	0,0316	0,061261	0,036727	0,319663	0,1299491	1,5391	0,200003	0,0017
0,0353430	0,057018	0,148012	0,0974292	1,5391	0,149952	0,0318	0,062832	0,038635	0,319662	0,1299489	1,5391	0,200003	0,0015
0,0362265	0,059905	0,148011	0,0974290	1,5391	0,149952	0,0321	0,064403	0,040591	0,319661	0,1299488	1,5391	0,200003	0,0014
0,0371101	0,062863	0,148011	0,0974290	1,5391	0,149952	0,0321	0,065974	0,042596	0,319658	0,1299484	1,5391	0,200002	0,0011
0,0379937	0,065892	0,148011	0,0974290	1,5391	0,149952	0,0320	0,067544	0,044648	0,319660	0,1299486	1,5391	0,200003	0,0013
0,0388772	0,068991	0,148013	0,0974293	1,5391	0,149952	0,0317	0,069115	0,046748	0,319663	0,1299491	1,5391	0,200003	0,0016
0,0397608	0,072165	0,148010	0,0974287	1,5391	0,149952	0,0323	0,070686	0,048899	0,319656	0,1299481	1,5391	0,200002	0,0009
0,0406444	0,075406	0,148012	0,0974292	1,5391	0,149952	0,0318	0,072257	0,051095	0,319661	0,1299488	1,5391	0,200003	0,0014
0,0415279	0,078720	0,148012	0,0974292	1,5391	0,149952	0,0318	0,073828	0,053340	0,319663	0,1299491	1,5391	0,200003	0,0016
0,0424115	0,082107	0,148011	0,0974289	1,5391	0,149952	0,0322	0,075398	0,055635	0,319660	0,1299486	1,5391	0,200003	0,0013
0,0432951	0,085564	0,148011	0,0974288	1,5391	0,149952	0,0322	0,076969	0,057978	0,319658	0,1299483	1,5391	0,200002	0,0010
0,0441787	0,089090	0,148013	0,0974293	1,5391	0,149952	0,0318	0,078540	0,060367	0,319662	0,1299489	1,5391	0,200003	0,0015
0,0530145	0,128291	0,148012	0,0974229	1,5391	0,149943	0,0383	0,094248	0,086929	0,319661	0,1299488	1,5391	0,200003	0,0014
0,0618503	0,174618	0,148012	0,0974292	1,5391	0,149952	0,0319	0,109956	0,118320	0,319661	0,1299488	1,5391	0,200003	0,0014
0,0706860	0,228073	0,148012	0,0974291	1,5391	0,149952	0,0319	0,125664	0,154541	0,319661	0,1299487	1,5391	0,200003	0,0013

Tableau A30: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,25m$  et  $\varepsilon=2mm$ Tableau A31: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,3m$  et  $\varepsilon=2mm$ 

$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$	$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$
0,0220894	0,001477	0,574769	0,1619371	1,5391	0,249236	0,3067	0,038877	0,001725	0,936055	0,1945154	1,5391	0,299377	0,2082
0,0245437	0,001815	0,576105	0,1620783	1,5391	0,249453	0,2193	0,042412	0,002046	0,937631	0,1946385	1,5391	0,299566	0,1449
0,0269981	0,002188	0,577178	0,1621916	1,5391	0,249627	0,1493	0,045946	0,002393	0,939237	0,1947639	1,5391	0,299759	0,0804
0,0294525	0,002594	0,578279	0,1623077	1,5391	0,249806	0,0776	0,049480	0,002769	0,940308	0,1948474	1,5391	0,299887	0,0375
0,0319069	0,003034	0,579264	0,1624115	1,5391	0,249966	0,0137	0,053015	0,003170	0,941597	0,1949478	1,5391	0,300042	0,0140
0,0343612	0,003511	0,579900	0,1624784	1,5391	0,250069	0,0275	0,056549	0,003603	0,942088	0,1949860	1,5391	0,300101	0,0336
0,0368156	0,004024	0,580367	0,1625276	1,5391	0,250144	0,0578	0,060083	0,004064	0,942487	0,1950171	1,5391	0,300149	0,0496
0,0392700	0,004573	0,580711	0,1625638	1,5391	0,250200	0,0801	0,063617	0,004556	0,942506	0,1950186	1,5391	0,300151	0,0503
0,0417244	0,005159	0,580908	0,1625844	1,5391	0,250232	0,0928	0,067152	0,005076	0,942532	0,1950206	1,5391	0,300154	0,0514
0,0441787	0,005781	0,581047	0,1625991	1,5391	0,250254	0,1018	0,070686	0,005624	0,942564	0,1950231	1,5391	0,300158	0,0527
0,0466331	0,006440	0,581101	0,1626047	1,5391	0,250263	0,1052	0,074220	0,006200	0,942599	0,1950258	1,5391	0,300162	0,0541
0,0490875	0,007136	0,581090	0,1626036	1,5391	0,250261	0,1046	0,077755	0,006804	0,942636	0,1950287	1,5391	0,300167	0,0555
0,0515418	0,007867	0,581106	0,1626052	1,5391	0,250264	0,1056	0,081289	0,007438	0,942547	0,1950218	1,5391	0,300156	0,0520
0,0539962	0,008634	0,581108	0,1626055	1,5391	0,250264	0,1058	0,084823	0,008099	0,942538	0,1950211	1,5391	0,300155	0,0516
0,0564506	0,009437	0,581101	0,1626047	1,5391	0,250263	0,1053	0,088358	0,008787	0,942591	0,1950252	1,5391	0,300161	0,0537
0,0589050	0,010276	0,581086	0,1626031	1,5391	0,250261	0,1043	0,091892	0,009504	0,942592	0,1950253	1,5391	0,300161	0,0538
0,0613593	0,011150	0,581089	0,1626035	1,5391	0,250261	0,1045	0,095426	0,010249	0,942598	0,1950258	1,5391	0,300162	0,0540
0,0638137	0,012060	0,581086	0,1626031	1,5391	0,250261	0,1043	0,098960	0,011022	0,942608	0,1950266	1,5391	0,300163	0,0544
0,0662681	0,013005	0,581098	0,1626044	1,5391	0,250263	0,1051	0,102495	0,011823	0,942622	0,1950276	1,5391	0,300165	0,0550
0,0687225	0,013986	0,581102	0,1626048	1,5391	0,250263	0,1053	0,106029	0,012653	0,942601	0,1950260	1,5391	0,300162	0,0541
0,0711769	0,015002	0,581118	0,1626065	1,5391	0,250266	0,1064	0,109563	0,013511	0,942587	0,1950249	1,5391	0,300161	0,0536
0,0736312	0,016055	0,581108	0,1626054	1,5391	0,250264	0,1057	0,113098	0,014397	0,942578	0,1950242	1,5391	0,300160	0,0532
0,0760856	0,017144	0,581094	0,1626040	1,5391	0,250262	0,1048	0,116632	0,015311	0,942574	0,1950239	1,5391	0,300159	0,0531
0,0785400	0,018267	0,581109	0,1626055	1,5391	0,250264	0,1058	0,120166	0,016252	0,942603	0,1950262	1,5391	0,300163	0,0542
0,0809944	0,019428	0,581087	0,1626032	1,5391	0,250261	0,1043	0,123701	0,017223	0,942577	0,1950242	1,5391	0,300160	0,0532
0,0834487	0,020622	0,581104	0,1626051	1,5391	0,250264	0,1055	0,127235	0,018221	0,942583	0,1950246	1,5391	0,300160	0,0534
0,0859031	0,021854	0,581090	0,1626036	1,5391	0,250261	0,1046	0,130769	0,019247	0,942592	0,1950253	1,5391	0,300161	0,0538
0,0883575	0,023120	0,581098	0,1626044	1,5391	0,250263	0,1051	0,134303	0,020302	0,942579	0,1950243	1,5391	0,300160	0,0533
0,0908118	0,024422	0,581101	0,1626047	1,5391	0,250263	0,1053	0,137838	0,021384	0,942592	0,1950253	1,5391	0,300161	0,0538
0,0932662	0,025760	0,581101	0,1626047	1,5391	0,250263	0,1052	0,141372	0,022495	0,942585	0,1950247	1,5391	0,300160	0,0535
0,0957206	0,027133	0,581108	0,1626054	1,5391	0,250264	0,1057	0,144906	0,023633	0,942601	0,1950260	1,5391	0,300162	0,0541
0,0981750	0,028543	0,581100	0,1626046	1,5391	0,250263	0,1052	0,148441	0,024801	0,942580	0,1950243	1,5391	0,300160	0,0533
0,1006293	0,029988	0,581100	0,1626046	1,5391	0,250263	0,1052	0,151975	0,025996	0,942581	0,1950244	1,5391	0,300160	0,0533
0,1030837	0,031469	0,581097	0,1626043	1,5391	0,250263	0,1050	0,155509	0,027218	0,942601	0,1950260	1,5391	0,300162	0,0542
0,1055381	0,032985	0,581100	0,1626046	1,5391	0,250263	0,1052	0,159044	0,028470	0,942589	0,1950250	1,5391	0,300161	0,0536
0,1079924	0,034537	0,581100	0,1626046	1,5391	0,250263	0,1052	0,162578	0,029749	0,942595	0,1950255	1,5391	0,300162	0,0539
0,1104468	0,036126	0,581090	0,1626035	1,5391	0,250261	0,1045	0,166112	0,031057	0,942587	0,1950249	1,5391	0,300161	0,0536
0,1129012	0,037748	0,581101	0,1626047	1,5391	0,250263	0,1053	0,169646	0,032393	0,942582	0,1950245	1,5391	0,300160	0,0534
0,1153555	0,039407	0,581101	0,1626047	1,5391	0,250263	0,1053	0,173181	0,033756	0,942593	0,1950253	1,5391	0,300161	0,0538
0,1178099	0,041103	0,581092	0,1626038	1,5391	0,250262	0,1047	0,176715	0,035148	0,942591	0,1950252	1,5391	0,300161	0,0537
0,1202643	0,042833	0,581095	0,1626041	1,5391	0,250262	0,1049	0,212058	0,050613	0,942592	0,1950253	1,5391	0,300161	0,0538
0,1227187	0,044598	0,581103	0,1626049	1,5391	0,250263	0,1054	0,247401	0,068890	0,942591	0,1950252	1,5391	0,300161	0,0538
0,1472625	0,064222	0,581099	0,1626045	1,5391	0,250263	0,1052	0,282744	0,089979	0,942590	0,1950251	1,5391	0,300161	0,0537
0,1718063	0,087413	0,581100	0,1626046	1,5391	0,250263	0,1052							
0,1963500	0,114173	0,581098	0,1626044	1,5391	0,250263	0,1051							

Tableau A32: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,35m$  et  $\varepsilon=2mm$ Tableau A33: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,4m$  et  $\varepsilon=2mm$ 

$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$	$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$
0,0529163	0,001396	1,416272	0,2273302	1,5391	0,349881	0,0339	0,075398	0,001400	2,015107	0,2596488	1,5391	0,399623	0,0944
0,0577269	0,001657	1,418133	0,2274426	1,5391	0,350055	0,0156	0,081682	0,001640	2,016983	0,2597399	1,5391	0,399763	0,0593
0,0625375	0,001942	1,419109	0,2275016	1,5391	0,350145	0,0415	0,087965	0,001899	2,018582	0,2598176	1,5391	0,399882	0,0294
0,0673480	0,002252	1,419190	0,2275065	1,5391	0,350153	0,0437	0,094248	0,002177	2,019961	0,2598845	1,5391	0,399985	0,0037
0,0721586	0,002584	1,419521	0,2275265	1,5391	0,350184	0,0524	0,100531	0,002473	2,021570	0,2599625	1,5391	0,400106	0,0264
0,0769692	0,002940	1,419526	0,2275268	1,5391	0,350184	0,0526	0,106814	0,002790	2,022217	0,2599939	1,5391	0,400154	0,0385
0,0817798	0,003320	1,419309	0,2275137	1,5391	0,350164	0,0468	0,113098	0,003128	2,022181	0,2599922	1,5391	0,400151	0,0378
0,0865903	0,003722	1,419322	0,2275145	1,5391	0,350165	0,0472	0,119381	0,003485	2,022242	0,2599951	1,5391	0,400156	0,0389
0,0914009	0,004147	1,419330	0,2275150	1,5391	0,350166	0,0474	0,125664	0,003861	2,022372	0,2600014	1,5391	0,400165	0,0413
0,0962115	0,004595	1,419333	0,2275151	1,5391	0,350166	0,0474	0,131947	0,004257	2,022313	0,2599986	1,5391	0,400161	0,0403
0,1010221	0,005065	1,419471	0,2275235	1,5391	0,350179	0,0511	0,138230	0,004672	2,022331	0,2599994	1,5391	0,400162	0,0406
0,1058326	0,005559	1,419453	0,2275224	1,5391	0,350177	0,0506	0,144514	0,005106	2,022406	0,2600031	1,5391	0,400168	0,0420
0,1106432	0,006077	1,419319	0,2275143	1,5391	0,350165	0,0471	0,150797	0,005560	2,022343	0,2600000	1,5391	0,400163	0,0408
0,1154538	0,006616	1,419419	0,2275203	1,5391	0,350174	0,0497	0,157080	0,006033	2,022340	0,2599999	1,5391	0,400163	0,0408
0,1202644	0,007179	1,419401	0,2275192	1,5391	0,350172	0,0493	0,163363	0,006525	2,022386	0,2600021	1,5391	0,400166	0,0416
0,1250749	0,007765	1,419382	0,2275181	1,5391	0,350171	0,0488	0,169646	0,007037	2,022325	0,2599991	1,5391	0,400162	0,0405
0,1298855	0,008373	1,419450	0,2275222	1,5391	0,350177	0,0506	0,175930	0,007567	2,022447	0,2600050	1,5391	0,400171	0,0427
0,1346961	0,009005	1,419427	0,2275208	1,5391	0,350175	0,0500	0,182213	0,008117	2,022465	0,2600060	1,5391	0,400172	0,0431
0,1395067	0,009660	1,419406	0,2275195	1,5391	0,350173	0,0494	0,188496	0,008687	2,022401	0,2600028	1,5391	0,400168	0,0419
0,1443172	0,010338	1,419384	0,2275182	1,5391	0,350171	0,0488	0,194779	0,009276	2,022377	0,2600017	1,5391	0,400166	0,0415
0,1491278	0,011039	1,419364	0,2275170	1,5391	0,350169	0,0483	0,201062	0,009884	2,022388	0,2600022	1,5391	0,400167	0,0417
0,1539384	0,011762	1,419405	0,2275195	1,5391	0,350173	0,0494	0,207346	0,010512	2,022331	0,2599994	1,5391	0,400162	0,0406
0,1587490	0,012509	1,419383	0,2275182	1,5391	0,350171	0,0488	0,213629	0,011158	2,022398	0,2600027	1,5391	0,400167	0,0418
0,1635595	0,013278	1,419415	0,2275201	1,5391	0,350174	0,0496	0,219912	0,011825	2,022313	0,2599986	1,5391	0,400161	0,0403
0,1683701	0,014071	1,419392	0,2275187	1,5391	0,350172	0,0490	0,226195	0,012509	2,022423	0,2600039	1,5391	0,400169	0,0423
0,1731807	0,014886	1,419419	0,2275203	1,5391	0,350174	0,0497	0,232478	0,013214	2,022393	0,2600024	1,5391	0,400167	0,0417
0,1779913	0,015725	1,419396	0,2275519	1,5391	0,350223	0,0636	0,238762	0,013938	2,022387	0,2600021	1,5391	0,400167	0,0416
0,1828018	0,016586	1,419416	0,2275201	1,5391	0,350174	0,0497	0,245045	0,014681	2,022403	0,2600029	1,5391	0,400168	0,0419
0,1876124	0,017470	1,419434	0,2275212	1,5391	0,350175	0,0501	0,251328	0,015444	2,022372	0,2600014	1,5391	0,400165	0,0413
0,1924230	0,018378	1,419410	0,2275198	1,5391	0,350173	0,0495	0,257611	0,016226	2,022363	0,2600010	1,5391	0,400165	0,0412
0,1972336	0,019309	1,419388	0,2275184	1,5391	0,350171	0,0489	0,263894	0,017027	2,022372	0,2600014	1,5391	0,400165	0,0414
0,2020441	0,020262	1,419401	0,2275192	1,5391	0,350172	0,0493	0,269178	0,017848	2,014857	0,2596366	1,5391	0,399604	0,0991
0,2068547	0,021239	1,419379	0,2275179	1,5391	0,350170	0,0487	0,276461	0,018687	2,022385	0,2600020	1,5391	0,400166	0,0416
0,2116653	0,022237	1,419422	0,2275205	1,5391	0,350174	0,0498	0,282744	0,019547	2,022336	0,2599997	1,5391	0,400163	0,0407
0,2164759	0,023261	1,419369	0,2275173	1,5391	0,350169	0,0484	0,289027	0,020425	2,022356	0,2600007	1,5391	0,400164	0,0411
0,2212864	0,024305	1,419407	0,2275196	1,5391	0,350173	0,0494	0,295310	0,021322	2,022389	0,2600023	1,5391	0,400167	0,0417
0,2260970	0,025373	1,419413	0,2275200	1,5391	0,350174	0,0496	0,301594	0,022240	2,022343	0,2600000	1,5391	0,400163	0,0408
0,2309076	0,026465	1,419392	0,2275187	1,5391	0,350172	0,0490	0,307877	0,023176	2,022357	0,2600007	1,5391	0,400164	0,0411
0,2357182	0,027579	1,419397	0,2275190	1,5391	0,350172	0,0492	0,314160	0,024131	2,022382	0,2600019	1,5391	0,400166	0,0415
0,2405287	0,028716	1,419400	0,2275192	1,5391	0,350172	0,0492	0,376992	0,034749	2,022372	0,2600014	1,5391	0,400165	0,0413
0,2886345	0,041351	1,419401	0,2275193	1,5391	0,350172	0,0493	0,439824	0,047297	2,022377	0,2600017	1,5391	0,400166	0,0414
0,3367403	0,056283	1,419405	0,2275195	1,5391	0,350173	0,0494	0,502656	0,061276	2,030606	0,2604002	1,5391	0,400779	0,1948
0,3848460	0,073513	1,419400	0,2275192	1,5391	0,350172	0,0492							

Tableau A34: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,45m$  et  $\varepsilon=2mm$ Tableau A35: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,5m$  et  $\varepsilon=2mm$ 

$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$	$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$
0,1033783	0,001412	2,751136	0,2920178	1,5391	0,449441	0,1243	0,117810	0,001053	3,630513	0,3242692	1,5391	0,499079	0,1845
0,1113304	0,001634	2,754151	0,2921386	1,5391	0,449627	0,0829	0,127628	0,001233	3,634651	0,3244089	1,5391	0,499294	0,1414
0,1192826	0,001872	2,756920	0,2922495	1,5391	0,449798	0,0449	0,137445	0,001427	3,638455	0,3245371	1,5391	0,499492	0,1018
0,1272348	0,002127	2,758812	0,2923252	1,5391	0,449915	0,0190	0,147263	0,001635	3,641944	0,3246547	1,5391	0,499673	0,0655
0,1351870	0,002399	2,760068	0,2923754	1,5391	0,449992	0,0018	0,157080	0,001856	3,646128	0,3247955	1,5391	0,499889	0,0221
0,1431391	0,002688	2,760855	0,2924069	1,5391	0,450040	0,0090	0,166898	0,002093	3,648087	0,3248615	1,5391	0,499991	0,0018
0,1510913	0,002991	2,762684	0,2924800	1,5391	0,450153	0,0340	0,176715	0,002343	3,650794	0,3249525	1,5391	0,500131	0,0262
0,1590435	0,003313	2,763155	0,2924988	1,5391	0,450182	0,0404	0,186533	0,002606	3,653990	0,3250600	1,5391	0,500296	0,0593
0,1669957	0,003652	2,763376	0,2925076	1,5391	0,450195	0,0434	0,196350	0,002885	3,655594	0,3251139	1,5391	0,500379	0,0759
0,1749478	0,004008	2,763406	0,2925088	1,5391	0,450197	0,0438	0,206168	0,003180	3,656004	0,3251277	1,5391	0,500401	0,0801
0,1829000	0,004382	2,762979	0,2924918	1,5391	0,450171	0,0380	0,215985	0,003491	3,655516	0,3251113	1,5391	0,500375	0,0751
0,1908522	0,004771	2,763074	0,2924956	1,5391	0,450177	0,0393	0,225803	0,003815	3,655792	0,3251206	1,5391	0,500390	0,0779
0,1988044	0,005177	2,763038	0,2924941	1,5391	0,450175	0,0388	0,235620	0,004154	3,655770	0,3251198	1,5391	0,500388	0,0777
0,2067565	0,005599	2,763147	0,2924985	1,5391	0,450181	0,0403	0,245438	0,004508	3,655518	0,3251114	1,5391	0,500375	0,0751
0,2147087	0,006038	2,763141	0,2924983	1,5391	0,450181	0,0402	0,255255	0,004876	3,655463	0,3251095	1,5391	0,500373	0,0745
0,2226609	0,006494	2,763044	0,2924944	1,5391	0,450175	0,0389	0,265073	0,005258	3,655564	0,3251129	1,5391	0,500378	0,0756
0,2306131	0,006965	2,763271	0,2925034	1,5391	0,450189	0,0420	0,274890	0,005654	3,655788	0,3251205	1,5391	0,500389	0,0779
0,2385652	0,007454	2,763200	0,2925006	1,5391	0,450185	0,0410	0,284708	0,006065	3,655809	0,3251211	1,5391	0,500390	0,0781
0,2465174	0,007960	2,763065	0,2924952	1,5391	0,450176	0,0392	0,294525	0,006491	3,655665	0,3251163	1,5391	0,500383	0,0766
0,2544696	0,008481	2,763200	0,2925006	1,5391	0,450185	0,0410	0,304343	0,006931	3,655650	0,3251158	1,5391	0,500382	0,0765
0,2624218	0,009020	2,763100	0,2924966	1,5391	0,450178	0,0396	0,314160	0,007385	3,655743	0,3251189	1,5391	0,500387	0,0774
0,2703739	0,009574	2,763236	0,2925021	1,5391	0,450187	0,0415	0,323978	0,007854	3,655690	0,3251172	1,5391	0,500384	0,0769
0,2783261	0,010147	2,763027	0,2924937	1,5391	0,450174	0,0386	0,333795	0,008337	3,655737	0,3251187	1,5391	0,500387	0,0773
0,2862783	0,010734	2,763170	0,2924994	1,5391	0,450183	0,0406	0,343613	0,008835	3,655659	0,3251161	1,5391	0,500383	0,0765
0,2942305	0,011338	2,763245	0,2925024	1,5391	0,450187	0,0416	0,353430	0,009347	3,655673	0,3251166	1,5391	0,500383	0,0767
0,3021826	0,011960	2,763146	0,2924985	1,5391	0,450181	0,0403	0,363248	0,009873	3,655763	0,3251196	1,5391	0,500388	0,0776
0,3101348	0,012598	2,763120	0,2924974	1,5391	0,450180	0,0399	0,373065	0,010414	3,655744	0,3251189	1,5391	0,500387	0,0774
0,3180870	0,013252	2,763155	0,2924988	1,5391	0,450182	0,0404	0,382883	0,010970	3,655630	0,3251151	1,5391	0,500381	0,0762
0,3260392	0,013923	2,763143	0,2924983	1,5391	0,450181	0,0402	0,392700	0,011540	3,655594	0,3251139	1,5391	0,500379	0,0759
0,3339913	0,014611	2,763091	0,2924962	1,5391	0,450178	0,0395	0,402518	0,012124	3,655626	0,3251150	1,5391	0,500381	0,0762
0,3419435	0,015315	2,763095	0,2924962	1,5391	0,450178	0,0395	0,412335	0,012723	3,655573	0,3251132	1,5391	0,500378	0,0757
0,3498957	0,016035	2,763148	0,2924985	1,5391	0,450181	0,0403	0,422153	0,013336	3,655582	0,3251135	1,5391	0,500379	0,0758
0,3578479	0,016773	2,763078	0,2924957	1,5391	0,450177	0,0393	0,431970	0,013963	3,655647	0,3251157	1,5391	0,500382	0,0764
0,3658000	0,017526	2,763136	0,2924981	1,5391	0,450181	0,0401	0,441788	0,014605	3,655633	0,3251152	1,5391	0,500381	0,0763
0,3737522	0,018296	2,763158	0,2924989	1,5391	0,450182	0,0404	0,451605	0,015261	3,655672	0,3251165	1,5391	0,500383	0,0767
0,3815044	0,019083	2,761698	0,2924058	1,5391	0,450039	0,0086	0,461423	0,015932	3,655642	0,3251155	1,5391	0,500382	0,0764
0,3896566	0,019887	2,763105	0,2924968	1,5391	0,450179	0,0397	0,471240	0,016617	3,655660	0,3251162	1,5391	0,500383	0,0766
0,3976087	0,020706	2,763171	0,2924994	1,5391	0,450183	0,0406	0,481058	0,017317	3,655617	0,3251147	1,5391	0,500381	0,0761
0,4771305	0,029817	2,763155	0,2924988	1,5391	0,450182	0,0404	0,490875	0,018030	3,655721	0,3251182	1,5391	0,500386	0,0772
0,5566523	0,040585	2,763129	0,2924978	1,5391	0,450180	0,0400	0,589050	0,025964	3,655665	0,3251163	1,5391	0,500383	0,0766
0,6361740	0,053009	2,763129	0,2924978	1,5391	0,450180	0,0400	0,687225	0,035340	3,655659	0,3251161	1,5391	0,500383	0,0765
							0,785400	0,046158	3,655674	0,3251166	1,5391	0,500383	0,0767

Tableau A36: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,6m$  et  $\varepsilon=2mm$ Tableau A37: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=0,8m$  et  $\varepsilon=2mm$ 

$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$	$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$
0,1555092	0,000697	5,890331	0,3893856	1,5391	0,599299	0,1169	0,301594	0,000572	12,61026	0,5195314	1,5391	0,799605	0,0494
0,1696464	0,000827	5,899183	0,3896070	1,5391	0,599640	0,0600	0,326726	0,000670	12,62254	0,5197232	1,5391	0,799900	0,0125
0,1837836	0,000969	5,903980	0,3897268	1,5391	0,599824	0,0293	0,351859	0,000776	12,63101	0,5198554	1,5391	0,800104	0,0130
0,1979208	0,001122	5,908742	0,3898457	1,5391	0,600007	0,0012	0,376992	0,000890	12,63680	0,5199457	1,5391	0,800243	0,0304
0,2120580	0,001287	5,911060	0,3899036	1,5391	0,600096	0,0161	0,402125	0,001012	12,64068	0,5200063	1,5391	0,800336	0,0420
0,2261952	0,001463	5,913726	0,3899702	1,5391	0,600199	0,0331	0,427258	0,001142	12,64319	0,5200454	1,5391	0,800396	0,0495
0,2403324	0,001651	5,914783	0,3899965	1,5391	0,600239	0,0399	0,452390	0,001279	12,64964	0,5201460	1,5391	0,800551	0,0689
0,2544696	0,001849	5,917898	0,3900742	1,5391	0,600359	0,0598	0,477523	0,001425	12,64990	0,5201500	1,5391	0,800557	0,0697
0,2686068	0,002059	5,919552	0,3901155	1,5391	0,600423	0,0704	0,502656	0,001579	12,64969	0,5201467	1,5391	0,800552	0,0690
0,2827440	0,002279	5,922720	0,3901945	1,5391	0,600544	0,0907	0,527789	0,001741	12,64913	0,5201381	1,5391	0,800539	0,0674
0,2968812	0,002513	5,922246	0,3901827	1,5391	0,600526	0,0877	0,552922	0,001910	12,65164	0,5201772	1,5391	0,800599	0,0749
0,3110184	0,002758	5,922280	0,3901835	1,5391	0,600527	0,0879	0,578054	0,002088	12,65038	0,5201575	1,5391	0,800569	0,0711
0,3251556	0,003014	5,922698	0,3901939	1,5391	0,600543	0,0906	0,603187	0,002274	12,64902	0,5201363	1,5391	0,800536	0,0670
0,3392928	0,003282	5,922504	0,3901891	1,5391	0,600536	0,0893	0,628320	0,002467	12,65017	0,5201542	1,5391	0,800564	0,0705
0,3534300	0,003561	5,922668	0,3901932	1,5391	0,600542	0,0904	0,653453	0,002668	12,65090	0,5201656	1,5391	0,800581	0,0727
0,3675672	0,003852	5,922344	0,3901851	1,5391	0,600530	0,0883	0,678586	0,002877	12,65129	0,5201717	1,5391	0,800591	0,0738
0,3817044	0,004154	5,922348	0,3901852	1,5391	0,600530	0,0883	0,703718	0,003095	12,64936	0,5201416	1,5391	0,800544	0,0681
0,3958416	0,004467	5,922614	0,3901918	1,5391	0,600540	0,0900	0,728851	0,003319	12,65130	0,5201719	1,5391	0,800591	0,0739
0,4099788	0,004792	5,922472	0,3901883	1,5391	0,600535	0,0891	0,753984	0,003552	12,65102	0,5201676	1,5391	0,800584	0,0730
0,4241160	0,005128	5,922576	0,3901909	1,5391	0,600539	0,0898	0,779117	0,003793	12,65060	0,5201610	1,5391	0,800574	0,0718
0,4382532	0,005476	5,922341	0,3901850	1,5391	0,600530	0,0883	0,804250	0,004042	12,65006	0,5201526	1,5391	0,800561	0,0702
0,4523904	0,005835	5,922335	0,3901849	1,5391	0,600529	0,0882	0,829382	0,004298	12,65091	0,5201657	1,5391	0,800582	0,0727
0,4665276	0,006205	5,922519	0,3901895	1,5391	0,600536	0,0894	0,854515	0,004563	12,65012	0,5201534	1,5391	0,800563	0,0703
0,4806648	0,006587	5,922410	0,3901868	1,5391	0,600532	0,0887	0,879648	0,004835	12,65059	0,5201623	1,5391	0,800576	0,0720
0,4948020	0,006980	5,922482	0,3901885	1,5391	0,600535	0,0892	0,904781	0,005115	12,65087	0,5201653	1,5391	0,800581	0,0726
0,5089392	0,007384	5,922704	0,3901941	1,5391	0,600544	0,0906	0,929914	0,005403	12,65101	0,5201673	1,5391	0,800584	0,0730
0,5230764	0,007800	5,922674	0,3901933	1,5391	0,600542	0,0904	0,955046	0,005699	12,65101	0,5201673	1,5391	0,800584	0,0730
0,5372136	0,008228	5,922429	0,3901872	1,5391	0,600533	0,0888	0,980179	0,006003	12,65090	0,5201656	1,5391	0,800581	0,0727
0,5513508	0,008666	5,922685	0,3901936	1,5391	0,600543	0,0905	1,005312	0,006315	12,65069	0,5201624	1,5391	0,800576	0,0720
0,5654880	0,009117	5,922396	0,3901864	1,5391	0,600532	0,0886	1,030445	0,006635	12,65040	0,5201579	1,5391	0,800569	0,0712
0,5796252	0,009578	5,922565	0,3901906	1,5391	0,600538	0,0897	1,055578	0,006963	12,65004	0,5201523	1,5391	0,800561	0,0701
0,5937624	0,010051	5,922541	0,3901900	1,5391	0,600537	0,0895	1,080710	0,007298	12,65049	0,5201593	1,5391	0,800572	0,0714
0,6078996	0,010536	5,922349	0,3901852	1,5391	0,600530	0,0883	1,105843	0,007641	12,65081	0,5201643	1,5391	0,800579	0,0724
0,6220368	0,011031	5,922549	0,3901902	1,5391	0,600538	0,0896	1,130976	0,007993	12,65023	0,5201552	1,5391	0,800565	0,0707
0,6361740	0,011539	5,922319	0,3901845	1,5391	0,600529	0,0881	1,156109	0,008352	12,65038	0,5201575	1,5391	0,800569	0,0711
0,6503112	0,012057	5,922453	0,3901878	1,5391	0,600534	0,0890	1,181242	0,008719	12,65043	0,5201584	1,5391	0,800570	0,0713
0,6644484	0,012587	5,922433	0,3901873	1,5391	0,600533	0,0889	1,206374	0,009094	12,65041	0,5201580	1,5391	0,800570	0,0712
0,6785856	0,013128	5,922504	0,3901891	1,5391	0,600536	0,0893	1,231507	0,009477	12,65032	0,5201566	1,5391	0,800567	0,0709
0,6927228	0,013681	5,922439	0,3901875	1,5391	0,600533	0,0889	1,256640	0,009867	12,65081	0,5201642	1,5391	0,800579	0,0724
0,7068600	0,014245	5,922461	0,3901880	1,5391	0,600534	0,0890	1,507968	0,014209	12,65058	0,5201606	1,5391	0,800574	0,0717
0,8482320	0,020513	5,922432	0,3901873	1,5391	0,600533	0,0888	1,759296	0,019340	12,65059	0,5201608	1,5391	0,800574	0,0717
0,9896040	0,027920	5,922482	0,3901885	1,5391	0,600535	0,0892	2,010624	0,025261	12,65044	0,5201585	1,5391	0,800570	0,0713
1,1309760	0,036467	5,922477	0,3901884	1,5391	0,600535	0,0891							

Tableau A38: Vérification du diamètre de la conduite pour $D=1m$ et $\varepsilon=2mm$							Tableau A39: Vérification du diamètre de la conduite pour $D=1,25m$ et $\varepsilon=2mm$						
$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$	$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$
0,4712334	0,000433	22,64603	0,6487984	1,5391	0,998559	0,1443	0,797648	0,000382	40,81120	0,8115773	1,5391	1,249090	0,0729
0,5105028	0,000507	22,67223	0,6490834	1,5391	0,998997	0,1004	0,859005	0,000443	40,81256	0,8115876	1,5391	1,249106	0,0716
0,5497723	0,000587	22,69153	0,6492932	1,5391	0,999320	0,0680	0,920363	0,000509	40,79435	0,8114498	1,5391	1,248894	0,0886
0,5890417	0,000673	22,70589	0,6494492	1,5391	0,999560	0,0440	0,981720	0,000579	40,79889	0,8114842	1,5391	1,248947	0,0843
0,6283112	0,000765	22,71664	0,6495660	1,5391	0,999740	0,0260	1,043078	0,000653	40,81878	0,8116346	1,5391	1,249178	0,0658
0,6675806	0,000863	22,72471	0,6496536	1,5391	0,999875	0,0125	1,104435	0,000732	40,82109	0,8116521	1,5391	1,249205	0,0636
0,7068501	0,000966	22,74253	0,6498471	1,5391	1,000173	0,0173	1,165793	0,000815	40,83593	0,8117643	1,5391	1,249378	0,0498
0,7461195	0,001076	22,74585	0,6498832	1,5391	1,000228	0,0228	1,227150	0,000903	40,83699	0,8117724	1,5391	1,249390	0,0488
0,7853980	0,001193	22,73891	0,6498077	1,5391	1,000112	0,0112	1,288508	0,000995	40,84843	0,8118589	1,5391	1,249523	0,0382
0,8246584	0,001315	22,74109	0,6498314	1,5391	1,000149	0,0149	1,349865	0,001092	40,84877	0,8118614	1,5391	1,249527	0,0378
0,8639279	0,001443	22,74282	0,6498502	1,5391	1,000178	0,0178	1,411223	0,001193	40,85783	0,8119299	1,5391	1,249633	0,0294
0,9031973	0,001577	22,74400	0,6498630	1,5391	1,000197	0,0197	1,472580	0,001299	40,85774	0,8119292	1,5391	1,249632	0,0295
0,9424668	0,001718	22,73812	0,6497992	1,5391	1,000099	0,0099	1,533938	0,001409	40,86506	0,8119846	1,5391	1,249717	0,0227
0,9717362	0,001864	22,50741	0,6472872	1,5391	0,996233	0,3781	1,595295	0,001524	40,86472	0,8119820	1,5391	1,249713	0,0230
1,0210057	0,002016	22,73960	0,6498153	1,5391	1,000124	0,0124	1,656653	0,001644	40,85832	0,8119336	1,5391	1,249638	0,0289
1,0502751	0,002174	22,52544	0,6474841	1,5391	0,996536	0,3476	1,718010	0,001767	40,87026	0,8120238	1,5391	1,249777	0,0178
1,0995446	0,002338	22,74001	0,6498197	1,5391	1,000131	0,0131	1,779368	0,001895	40,87531	0,8120620	1,5391	1,249836	0,0131
1,1388140	0,002508	22,73993	0,6498188	1,5391	1,000129	0,0129	1,840725	0,002028	40,87473	0,8120576	1,5391	1,249829	0,0137
1,1780835	0,002684	22,73970	0,6498164	1,5391	1,000125	0,0125	1,902083	0,002166	40,86958	0,8120187	1,5391	1,249769	0,0185
1,2173529	0,002866	22,73937	0,6498128	1,5391	1,000120	0,0120	1,963440	0,002307	40,87840	0,8120853	1,5391	1,249872	0,0103
1,2566224	0,003053	22,74267	0,6498486	1,5391	1,000175	0,0175	2,024798	0,002454	40,87373	0,8120501	1,5391	1,249818	0,0146
1,2958918	0,003247	22,74194	0,6498407	1,5391	1,000163	0,0163	2,086155	0,002604	40,88143	0,8121082	1,5391	1,249907	0,0074
1,3351613	0,003447	22,74119	0,6498325	1,5391	1,000150	0,0150	2,147513	0,002760	40,87720	0,8120763	1,5391	1,249858	0,0114
1,3744307	0,003653	22,74040	0,6498239	1,5391	1,000137	0,0137	2,208870	0,002920	40,87697	0,8120746	1,5391	1,249855	0,0116
1,4137002	0,003864	22,74253	0,6498471	1,5391	1,000173	0,0173	2,270228	0,003084	40,88012	0,8120984	1,5391	1,249892	0,0086
1,4529696	0,004082	22,74155	0,6498364	1,5391	1,000156	0,0156	2,331585	0,003253	40,87984	0,8120962	1,5391	1,249889	0,0089
1,4922381	0,004306	22,74056	0,6498257	1,5391	1,000140	0,0140	2,392943	0,003427	40,87664	0,8120721	1,5391	1,249851	0,0119
1,5315075	0,004535	22,74210	0,6498424	1,5391	1,000165	0,0165	2,454300	0,003605	40,87662	0,8120719	1,5391	1,249851	0,0119
1,5707780	0,004771	22,74103	0,6498308	1,5391	1,000148	0,0148	2,515658	0,003787	40,87934	0,8120924	1,5391	1,249883	0,0094
1,6100474	0,005012	22,74223	0,6498439	1,5391	1,000168	0,0168	2,577015	0,003974	40,87926	0,8120918	1,5391	1,249882	0,0095
1,6493169	0,005260	22,74109	0,6498314	1,5391	1,000149	0,0149	2,638373	0,004166	40,87676	0,8120730	1,5391	1,249853	0,0118
1,6885863	0,005513	22,74203	0,6498417	1,5391	1,000164	0,0164	2,699730	0,004361	40,88154	0,8120910	1,5391	1,249881	0,0096
1,7278558	0,005773	22,74085	0,6498289	1,5391	1,000145	0,0145	2,761088	0,004562	40,87921	0,8120915	1,5391	1,249881	0,0095
1,7671252	0,006038	22,74159	0,6498368	1,5391	1,000157	0,0157	2,822445	0,004767	40,87925	0,8120918	1,5391	1,249882	0,0095
1,8063947	0,006309	22,74220	0,6498434	1,5391	1,000167	0,0167	2,883803	0,004976	40,88136	0,8120770	1,5391	1,249859	0,0113
1,8456641	0,006587	22,74096	0,6498301	1,5391	1,000146	0,0146	2,945160	0,005191	40,87741	0,8120779	1,5391	1,249860	0,0112
1,8849336	0,006870	22,74143	0,6498351	1,5391	1,000154	0,0154	3,006518	0,005409	40,87947	0,8120934	1,5391	1,249884	0,0093
1,9242030	0,007159	22,74179	0,6498391	1,5391	1,000160	0,0160	3,067875	0,005632	40,87957	0,8120942	1,5391	1,249885	0,0092
1,9634725	0,007454	22,74208	0,6498422	1,5391	1,000165	0,0165	3,681570	0,008110	40,88111	0,8120579	1,5391	1,249830	0,0136
2,3561940	0,010734	22,74208	0,6498422	1,5391	1,000165	0,0165	4,295165	0,011039	40,88039	0,8120035	1,5391	1,249746	0,0203
2,7488930	0,014610	22,74221	0,6498436	1,5391	1,000167	0,0167	4,908760	0,014418	40,88079	0,8120341	1,5391	1,249793	0,0166
3,1415920	0,019083	22,74188	0,6498401	1,5391	1,000162	0,0162							

Tableau A40: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=1,5m$  et  $\varepsilon=2mm$       Tableau A41: Vérification du diamètre de la conduite pour  $D=1,75m$  et  $\varepsilon=2mm$ 

$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$	$Q$ ( $m^3/s$ )	$J$	$Q/J^{1/2}$ ( $m^3/s$ )	$\Lambda$ (m)	$D_{h0}$	$D$ (m)	$\Delta D/D(\%)$
1,325325	0,000405	65,85593	0,9736860	1,5391	1,498590	0,0941	1,924225	0,000380	98,71066	1,1360052	1,5391	1,748413	0,0907
1,413680	0,000461	65,84164	0,9736055	1,5391	1,498466	0,1024	2,044489	0,000429	98,70886	1,1359973	1,5391	1,748401	0,0914
1,502035	0,000521	65,80535	0,9734011	1,5391	1,498151	0,1234	2,164753	0,000481	98,70424	1,1359770	1,5391	1,748370	0,0932
1,590390	0,000584	65,81081	0,9734319	1,5391	1,498199	0,1202	2,285017	0,000536	98,69770	1,1359484	1,5391	1,748326	0,0958
1,678745	0,000651	65,79520	0,9733440	1,5391	1,498063	0,1293	2,405281	0,000594	98,68987	1,1359140	1,5391	1,748273	0,0988
1,767100	0,000721	65,81024	0,9734287	1,5391	1,498194	0,1206	2,525545	0,000654	98,75662	1,1362068	1,5391	1,748724	0,0730
1,855455	0,000795	65,80621	0,9734060	1,5391	1,498159	0,1229	2,645809	0,000718	98,74071	1,1361370	1,5391	1,748616	0,0791
1,943810	0,000872	65,82571	0,9735158	1,5391	1,498328	0,1116	2,766073	0,000785	98,72538	1,1360698	1,5391	1,748513	0,0851
2,032165	0,000953	65,82828	0,9735303	1,5391	1,498350	0,1101	2,886337	0,000854	98,76842	1,1362585	1,5391	1,748803	0,0684
2,120520	0,001038	65,81785	0,9734716	1,5391	1,498260	0,1162	3,006601	0,000927	98,74973	1,1361766	1,5391	1,748677	0,0756
2,208875	0,001126	65,82668	0,9735213	1,5391	1,498336	0,1110	3,126865	0,001003	98,73217	1,1360995	1,5391	1,748559	0,0824
2,297230	0,001218	65,82348	0,9735033	1,5391	1,498308	0,1129	3,247129	0,001081	98,76128	1,1362272	1,5391	1,748755	0,0712
2,385585	0,001314	65,81081	0,9734319	1,5391	1,498199	0,1202	3,367393	0,001163	98,74246	1,1361447	1,5391	1,748628	0,0785
2,473940	0,001412	65,83727	0,9735809	1,5391	1,498428	0,1049	3,487657	0,001247	98,76443	1,1362410	1,5391	1,748776	0,0700
2,562295	0,001515	65,82984	0,9735391	1,5391	1,498364	0,1092	3,607922	0,001335	98,74532	1,1361572	1,5391	1,748647	0,0774
2,650650	0,001621	65,83561	0,9735716	1,5391	1,498414	0,1059	3,728186	0,001425	98,76206	1,1362306	1,5391	1,748760	0,0709
2,739005	0,001731	65,83310	0,9735574	1,5391	1,498392	0,1073	3,848500	0,001519	98,74443	1,1361533	1,5391	1,748641	0,0777
2,827360	0,001844	65,84164	0,9736055	1,5391	1,498466	0,1024	3,968714	0,001615	98,75601	1,1362041	1,5391	1,748720	0,0732
2,915715	0,001961	65,84249	0,9736103	1,5391	1,498473	0,1019	4,088978	0,001715	98,73763	1,1361235	1,5391	1,748596	0,0803
3,004070	0,002082	65,83695	0,9735791	1,5391	1,498425	0,1051	4,209242	0,001817	98,74757	1,1361671	1,5391	1,748663	0,0765
3,092425	0,002206	65,84100	0,9736019	1,5391	1,498460	0,1028	4,329506	0,001922	98,75558	1,1362022	1,5391	1,748717	0,0734
3,180780	0,002334	65,83900	0,9735907	1,5391	1,498443	0,1039	4,449770	0,002030	98,76192	1,1362300	1,5391	1,748759	0,0709
3,269135	0,002466	65,83189	0,9735506	1,5391	1,498381	0,1080	4,570034	0,002142	98,74377	1,1361504	1,5391	1,748637	0,0780
3,357490	0,002601	65,83314	0,9735577	1,5391	1,498392	0,1073	4,690298	0,002256	98,74859	1,1361715	1,5391	1,748669	0,0761
3,445845	0,002739	65,84150	0,9736047	1,5391	1,498465	0,1025	4,810562	0,002373	98,75224	1,1361876	1,5391	1,748694	0,0747
3,534200	0,002882	65,83307	0,9735573	1,5391	1,498392	0,1073	4,930826	0,002493	98,75487	1,1361991	1,5391	1,748712	0,0737
3,622555	0,003027	65,84287	0,9736125	1,5391	1,498477	0,1017	5,051090	0,002617	98,73775	1,1361240	1,5391	1,748596	0,0803
3,710910	0,003177	65,83727	0,9735809	1,5391	1,498428	0,1049	5,171354	0,002742	98,75760	1,1362111	1,5391	1,748730	0,0726
3,799265	0,003330	65,83813	0,9735858	1,5391	1,498435	0,1044	5,291618	0,002872	98,74071	1,1361370	1,5391	1,748616	0,0791
3,887620	0,003487	65,83515	0,9735690	1,5391	1,498410	0,1061	5,411882	0,003004	98,74119	1,1361391	1,5391	1,748620	0,0789
3,975975	0,003647	65,83787	0,9735843	1,5391	1,498433	0,1046	5,532146	0,003138	98,75684	1,1362077	1,5391	1,748725	0,0729
4,064330	0,003811	65,83692	0,9735789	1,5391	1,498425	0,1051	5,652410	0,003277	98,74053	1,1361362	1,5391	1,748615	0,0792
4,152685	0,003978	65,84103	0,9736021	1,5391	1,498461	0,1027	5,772674	0,003417	98,75397	1,1361951	1,5391	1,748706	0,0740
4,241040	0,004149	65,84164	0,9736055	1,5391	1,498466	0,1024	5,892938	0,003561	98,75200	1,1361865	1,5391	1,748692	0,0748
4,329395	0,004324	65,83917	0,9735916	1,5391	1,498444	0,1038	6,013203	0,003708	98,74975	1,1361766	1,5391	1,748677	0,0756
4,417750	0,004502	65,84130	0,9736036	1,5391	1,498463	0,1026	7,215843	0,005340	98,74530	1,1361571	1,5391	1,748647	0,0774
5,301450	0,006483	65,84255	0,9736107	1,5391	1,498474	0,1019	8,418484	0,007268	98,74757	1,1361671	1,5391	1,748663	0,0765
6,185025	0,008825	65,83913	0,9735914	1,5391	1,498444	0,1038	9,621124	0,009493	98,74704	1,1361647	1,5391	1,748659	0,0767
7,068600	0,011526	65,84065	0,9735999	1,5391	1,498457	0,1030							