

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE : SCIENCE TECHNOLOGIE

FILIERE : HYDRAULIQUE

OPTION : HYDRAULIQUE URBAINE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : YOUNES BOUMDOUHA

Intitulé

**DETERMINATION DE COEFFICIENT DE CHEZY
PAR VOIE EXPERIMENTAL**

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

Mr : MARZOUK BELKACEM

Université M'SILA

Président

Mr : NEBBAR MOHAMED LAKHDAR

Université M'SILA

Rapporteur

Mr : BERGHOUT ALI

Université M'SILA

Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

REMERCIEMENTS

Merci à notre bon Dieu, notre guide, notre force, notre bonheur, et la raison de notre existence. C'est lui qui nous a fait comprendre le but de cette vie, et qui nous a donné le pouvoir d'aimer les gens et d'apprécier les choses.

Je tiens tout d'abord à examiner mes remerciements les plus sincères à notre encadreur MR Nebbar Mohamed Lakhdar, pour ses efforts fournis afin de mener à bien ce projet.

J'adresse ma profonde gratitude à mon cher père Boumdouha Omar qui a tout mis à ma disposition pour que mon travail se déroule dans les meilleures conditions possibles.

A tous les enseignants de l'université de M'SILA en particulier ceux du département hydraulique pour la formation qu'ils m'ont offert et leurs orientations.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance en témoignage de ma profonde affection à :

Ma chère mère qui me protège pendant toute ma vie, et qui a fait tout pour que je devienne ce que je suis.

Mon père qui m'a tant aidé et encourager

Tous mes frères et sœurs.

Toute la famille.

Tous mes amies.

Toute personne qui a contribué de près ou de loin à ma réussite.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1 : ECOULEMENT UNIFORME

Introduction	01
I-1-Formule de <i>Chézy</i>	05
I-1-1- Détermination du coefficient <i>C</i> de <i>Chézy</i> par la formule de <i>Ganguillet – Kutter</i>	06
I-1-2- Détermination du coefficient <i>C</i> de <i>Chézy</i> par la formule de <i>Bazin</i>	07
I-1-3- Détermination du coefficient <i>C</i> de <i>Chézy</i> par la formule de <i>Powell</i>	07
I-2- Formule de <i>Manning-Strickler</i>	08
I-3- Formule de <i>Darcy – Weisbach</i> et évaluation du coefficient de frottement	10
Conclusion	12

CHAPITRE 2 : COEFFICIENT DE CHEZY EN ECOULEMENT UNIFORME DANS UN CANAL RECTANGULAIRE PAR LA METHODE DU MODELE RUGUEUX DE REFERENCE MMR

Introduction	15
II-1- Caractéristiques géométriques et hydrauliques	15
II-2-. Caractéristiques du modèle rugueux de référence	16
II-3- Relation de Darcy-Weisbach appliquée au modèle rugueux	18
II-4- Facteur de correction des dimensions linéaires	18
II-5- Expression du coefficient de Chézy dans un canal rectangulaire	22
II-6- Variation du coefficient de Chézy	24
II-7-. Calcul du paramètre de forme η	30
II-8- Etapes de calcul du coefficient <i>C</i> de Chézy	35
II-9- Exemple de calcul du coefficient <i>C</i> de Chézy	36
Conclusion	40

CHAPITRE 3 : CHAPITRE 3 VOIE EXPERIMENTAL

Introduction	42
III-1- DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	43
III-1-1- Description du modèle	43
III-1-2- Installation	44
a- Implantation	44
b - Montage	45
c - Mise en service	45
III-2- MANIPULATIONS	46

III-3- INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	46
III-4- DESCRIPTION DES ESSAIS	47
III-4-1- Essais 1 détermination de coefficient de Chézy dans un canal rectangulaire à fond lisse	50
a- RÉSULTATS ET DISCUSSION	50
b- Exemple 01 de calcul du coefficient C de Chézy pour $(\varepsilon / b = 0)$:	55
III-4-2- Essais 2 détermination de coefficient de Chézy dans un canal rectangulaire à fond rugueux	59
a- Rugosité artificielle du canal d'essais	59
b- RÉSULTATS ET DISCUSSION	60
c- Exemple 02 de calcul du coefficient C de Chézy pour $(\varepsilon / b = 0,034)$	66
III-5-Exemple 03 de calcul de coefficient de Chézy en fonction de la rugosité équivalente	70
III-6-Exemple 04 de calcul de coefficient de Chézy en fonction de la rugosité équivalente	71
Conclusion	73

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

NOTIONS PRINCIPALES

Liste du tableau

Nom du tableau	Page
Tableau 2.1 : Valeurs de C/\sqrt{g} pour $\varepsilon/b=0$	25
Tableau 2.2 : Valeurs de C/\sqrt{g} pour $\varepsilon / b = 10^{-4}$	27
Tableau 2.3 : Valeurs de C/\sqrt{g} pour $\varepsilon / b = 10^{-3}$	29
Tableau 3.1 : valeur de C Pour une pente $i=1$ %	50
Tableau 3.1 : valeur de C Pour une pente $i=1$ %	51
Tableau 3.2 : valeur de C Pour une pente $i=2$ %	52
Tableau 3.3 : valeur de C Pour une pente $i=3$ %	53
Tableau 3.4 : valeur de C Pour une pente $i=4$ %	54
Tableau 3.5 : Coefficient α Valeurs dans la relation (4,9)	55
Tableau 3.6 : valeur de C Pour une pente $i=1$ %	61
Tableau 3.7 : valeur de C Pour une pente $i=2$ %	62
Tableau 3.8 : valeur de C Pour une pente $i=3$ %	63
Tableau 3.9 : valeur de C Pour une pente $i=4$ %	64
Tableau 3.10 : Coefficient α Valeurs dans la relation (4,9)	66

Listes du figures et des photos

Nom de la figure et de la photo	Page
Figure 1.1 : Établissement de l'écoulement uniforme dans un canal de grande longueur	3
Figure 1.2: Schéma de définition ayant servi de base à l'établissement de la formule de <i>Chézy</i>	6
Figure 2.1 : Schéma de définition du canal ouvert de forme rectangulaire	15
Figure 2.2 : Schéma de définition du modèle rugueux de référence du canal ouvert de forme rectangulaire	17
Figure 2.3 : Comparaison entre les valeurs exactes et approchées du coefficient ψ	21
Figure 2.4 : Variation de C/\sqrt{g} en fonction de η , pour $\varepsilon/b = 0$	26
Figure 2.5 : Variation de C / \sqrt{g} en fonction de , pour $\varepsilon / b = 10^{-4}$	28
Figure 2.6 : Variation de C / \sqrt{g} en fonction de , pour $\varepsilon / b = 10^{-3}$	30
Photo 3,1 : Vue d'ensemble du canal d'essais	44
Photo 3,2 : l'écoulement évoluant dans un canal rectangulaire à pente variable à fond lisse . Vue de l'amont	49

Photo 3.3 : l'écoulement évoluant dans un canal rectangulaire à pente variable à fond rugueux. Vue de l'aval	49
Figure 3.1 : Variation de $Vf (\sqrt{R_h i})$. Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond lisse	51
Figure 3.2 : Variation de $Vf (\sqrt{R_h i})$. Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond lisse	52
Figure 3.3 : Variation de $Vf (\sqrt{R_h i})$. Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond lisse	53
Figure 3.4 : Variation de $Vf (\sqrt{R_h i})$. Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond lisse	54
Figure 3.5 : La variation du Coefficient C dans l'équation (14) selon la pente relative i	55
Photo 3.4 : Echantillon de grains de gravier de rugosité équivalente $\varepsilon = 4,5\text{mm}$	59
Photo 3.5 : Grains de gravier uniformément répartis sur le fond plat du canal rectangulaire à pente variable testé	60
Figure 3.6 : Variation de $Vf (\sqrt{R_h i})$. Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond rugueux	62
Figure 3.7 : Variation de $Vf (\sqrt{R_h i})$. Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond rugueux	63
Figure 3.8 : Variation de $Vf (\sqrt{R_h i})$. Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond rugueux	64
Figure 3.9 : Variation de $Vf (\sqrt{R_h i})$. Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond rugueux	65
Figure 3.10 : La variation du Coefficient C dans l'équation (14) selon la pente i	66

INTRODUCTION GENERALE :

Les écoulements uniformes dans les canaux et conduites sont régis par les relations de *Chézy et de Manning*, dites « relations de l'écoulement uniforme ». Ces relations expriment le débit volume écoulé par le canal en fonction des paramètres géométriques de l'ouvrage et hydrauliques de l'écoulement. Dans ces relation, nous pouvons relever la présence de coefficient de résistance à l'écoulement, dits de *Chézy* et que l'on note souvent par le lettre C .

Dans la pratique, il existe des tableaux qui donnent la valeur de coefficient C en fonction de la nature du matériau constituant le canal. Ces valeurs de C sont tabulées de manière indépendante de la profondeur de l'écoulement ou du rayon hydraulique et encore moins du nombre de *Reynolds* caractérisant l'écoulement.

Donner des valeurs constantes au coefficient C , suppose que l'écoulement est en régime turbulent rugueux où le nombre de *Reynolds* n'a aucune influence. Cependant, cette démarche peut paraître peu fiable eu égard au fait que le coefficient de résistance à l'écoulement doit en principe dépendre des caractéristiques hydrauliques de l'écoulement, en particulier du rayon hydraulique, de la pente géométrique et de la viscosité cinématique du liquide. Cette vision est beaucoup plus moderne et nécessite une étude particulière en observant l'évolution de ce coefficient de résistance lorsque l'écoulement est supposé être uniforme.

Pour mener à bien notre étude, le mémoire a été subdivisé en trois chapitres.

Le premier chapitre est entièrement consacré à une étude bibliographique sur l'écoulement uniforme, englobant ses propriétés, ses définitions ainsi que la théorie qui la gouverne et qui mène à l'établissement de la relation de *Chézy*.

Le deuxième chapitre du mémoire concerne d'une part la définition de la MMR et l'étude de coefficient " C " de *Chézy* dans un canal rectangulaire d'autre part.

L'application de la formule de *Chézy* au cas de l'écoulement uniforme dans un canal de forme rectangulaire mène à une équation de troisième ordre. Sa résolution analytique conduit à l'expression exacte de le paramètre de forme, en ayant recours aux fonctions trigonométriques. Cependant, l'évaluation de la valeur du coefficient C de *Chézy* est possible à l'aide de la méthode du modèle.

La Méthode du Modèle Rugueux est caractérisé par une rugosité relative arbitrairement choisie et dont l'écoulement est considéré comme étant en régime turbulent rugueux.

Des exemples d'applications sont proposés pour mieux apprécier la facilité d'exécution de la méthode ainsi que sa fiabilité.

Le troisième chapitre concerne d'une part la détermination de coefficient C de Chézy par la voie expérimental dans un canal rectangulaire à pente variable à fond lisse et à fond rugueux et étudie l'effet de la rugosité du fond du canal et la variation de coefficient C de Chézy selon la variation des caractéristiques géométriques et hydrauliques, et l'étude de l'effet de la rugosité relatif du fond du canal au lieu de la rugosité équivalente de tous les parois du canal dans la calcul du coefficient C d'autre part.

Des exemples d'applications sont proposés pour mieux apprécier la facilité d'exécution des trois méthode celles de Achour et bedjaoui (2006), Chézy et Manning, et MMR ainsi que ses fiabilité.

CHAPITRE 1

ÉCOULEMENT UNIFORME

INTRODUCTION :

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 ou y_n de l'écoulement appelée aussi profondeur normale, l'aire de la section mouillée A , la vitesse V de l'écoulement et le débit Q . La ligne de charge totale est à la fois parallèle à la ligne piézométrique et à la pente géométrique du canal.

D'un point de vue pratique, la constance de la vitesse V est généralement associée à la constance de la vitesse moyenne de l'écoulement; 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.

Bien que la condition d'un écoulement uniforme, dans le sens stricte du terme, ne soit pratiquement jamais satisfaite, elle est cependant fréquemment admise lors du calcul des caractéristiques d'un écoulement en canaux et rivières. Cette approche, bien que simplifiée, donne des résultats assez satisfaisants dans bon nombre de cas pratiques.

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.

- **Les différents types des régimes d'écoulements :**

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 résistances sont proportionnelles à V^2 .

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 1.1 montre l'état d'un écoulement à l'entrée et à l'intérieur d'un canal rectangulaire de grande longueur et de différentes pentes géométriques i . La pente i est comparée à la pente critique i_c .

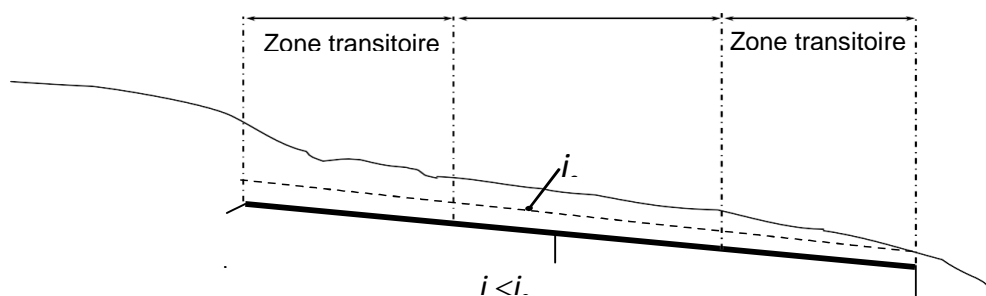
Lorsque la pente i est suave (figure 1.1.a), la zone transitoire se présente sous l'aspect d'ondulations. L'écoulement est uniforme au milieu du canal mais varie aux extrémités de celui-ci. D'un point de vue théorique, l'écoulement varié tend vers l'écoulement uniforme de manière graduelle et asymptotique. On considère généralement dans la pratique que la profondeur de l'écoulement reste constante si la variation qu'elle subit n'excède pas 1% de la valeur moyenne de la profondeur normale.

Lorsque la pente i correspond à la pente critique i_c (figure 1.1.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 i est supercritique ou prononcée (figure 1.1.c), la surface libre dans la zone transitoire chute de manière graduelle d'un niveau subcritique ou suave à un niveau supercritique ou prononcé. Au-delà de la zone transitoire, 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 transitoire ne doit pas être inférieure à la longueur pour laquelle, sous des conditions données de l'écoulement, la couche limite est pleinement développée.

Écoulement varié Écoulement uniforme Écoulement varié



(a)

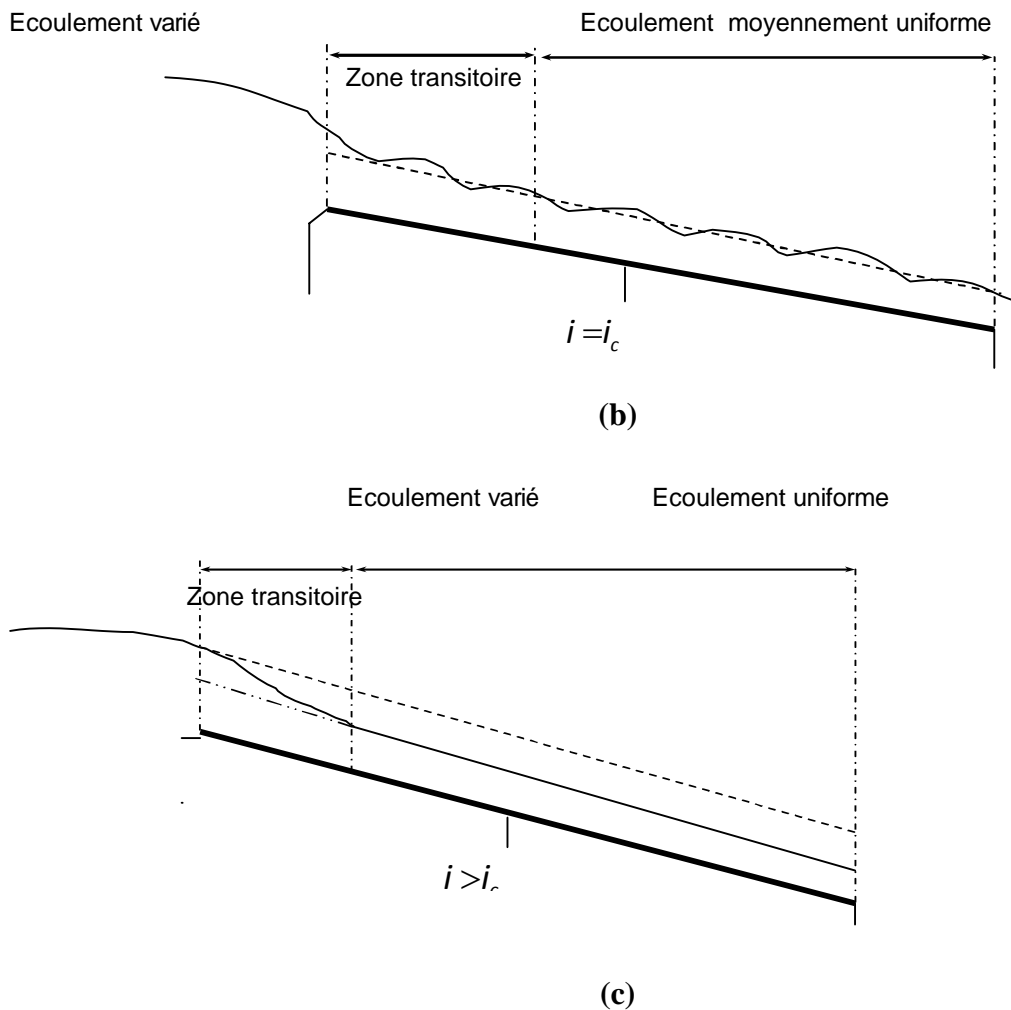


Figure 1.1 : Établissement de l'écoulement uniforme dans un canal de grande longueur.

(- - -): profondeur critique. (—): Profondeur normale de l'écoulement uniforme.

Le calcul de la profondeur d'un écoulement uniforme, appelée profondeur normale de l'écoulement est très important. Le classement des profils géométriques par exemple est tributaire de la valeur de la profondeur normale. Comme le montre la figure 1.1.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 i . Le paramètre C traduit la résistance de l'écoulement et dépend de V , de R_h , de la rugosité absolue ϵ caractérisant les parois du canal, de la viscosité

du liquide et de beaucoup d'autres facteurs.

La distinction doit être faite entre l'écoulement uniforme se produisant d'une part dans les canaux artificiels et dans les canaux naturels d'autre part. Dans la pratique, l'écoulement dans les canaux naturels est considéré comme étant uniforme à condition que la profondeur de l'écoulement ne subisse 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 ν du liquide et la température T .

Lorsque l'on se réfère à la bibliographie (*Houk*, 1918; *Forchheimer*, 1930 ; *Lindquist*, 1933; *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*.

Différentes approches ont été également présentées au calcul de la vitesse de l'écoulement dans les canaux naturels, telle que celle de *Toebe*s(1955). Dans cette approche, une analyse par corrélation multiple est appliquée aux différents facteurs influençant la vitesse de l'écoulement dans un canal naturel. Ces facteurs, selon *Toebe*s(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*s(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 exclut 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 $V = C R_h^\beta J^\gamma$ où les exposants β et γ 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* 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.

Notre travail se présente en deux grandes parties. La première partie est consacrée à un état de connaissances sur l'écoulement uniforme. Elle se propose de passer en revue les principales formules de l'écoulement uniforme, en mettant l'accent sur les relations de *Chézy*, *Manning – Strickler* et de *Darcy – Weisbach*.

Dans la deuxième partie de notre étude, nous avons tenté d'exposer notre contribution au calcul de l'écoulement uniforme. Notre recherche a pour principal objectif de proposer des relations approchées fiables au calcul de la profondeur normale ainsi que celles destinées au dimensionnement de la conduite considérée. Ces relations sont applicables dans tout le domaine de l'écoulement turbulent, comprenant l'écoulement lisse, de transition et turbulent rugueux.

I-1- Formule de Chézy :

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

$$V = C\sqrt{R_h J} \quad (1.1)$$

Rappelons que R_h est le rayon hydraulique, J est la pente de la ligne de charge totale ou gradient de perte de charge (J étant également la pente i du canal) et C est le facteur caractérisant la résistance de l'écoulement. Le facteur C est 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) = $K V^2$, où K est le facteur de proportionnalité. Comme le montre la figure 1.2, 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 :

$$F_r = K V^2 P L \quad (1.2)$$

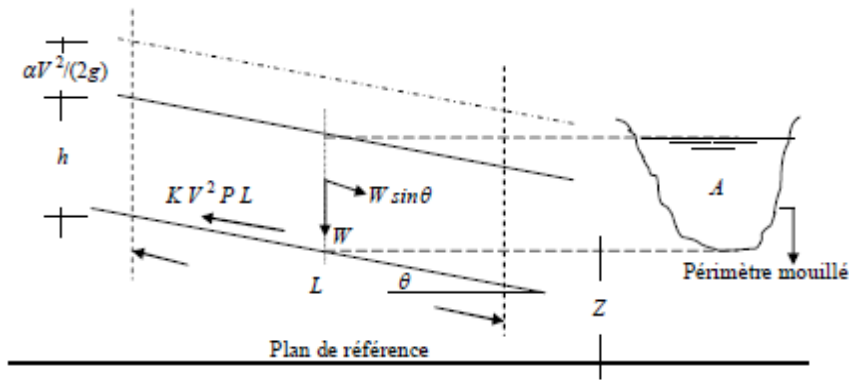


Figure 1.2: Schéma de définition ayant servi de base à l'établissement de la formule de Chézy.

Nous avons déjà indiqué que l'écoulement uniforme s'établit lorsque les forces de gravité sont équilibrées par les forces de résistance F_r . La quantité $(W \sin \theta)$, représentée sur la figure 1.2, 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 ρ est la masse volumique du liquide, g est l'accélération de la pesanteur. Le produit $(A L)$ désigne le volume de liquide sur toute la longueur L considérée. Ainsi, nous pouvons écrire $\rho g A L \sin \theta = K V^2 P L$, soit : $V^2 = (\rho g / K) (A / P) \sin \theta$. 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 vient que :

$$V = C R_h^{1/2} J^{1/2} \quad (1.3)$$

Comme l'exige la relation (1.3), le coefficient C de Chézy doit avoir pour unité $[L^{1/2} T^{-1}]$. Plusieurs relations ont été proposées au calcul du coefficient C et nous verrons dans ce qui suit les plus importantes d'entre elles.

I-1-1- 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 ou i 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 :

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

Le coefficient n de la relation (1.4) est connu sous le nom de " coefficient n de *Kutter*

". Bien que la relation (1.4) 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. On peut en effet s'apercevoir que le terme $0,00155/J$ n'a pas d'effet significatif 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 $R_h = 1,20$ m, C ne subit pratiquement aucun changement dans une large gamme de valeurs de J : $102 \leq C \leq 103$ lorsque $0,00005 \leq J \leq 0,01$.

I-1-2- 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 la relation :

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R_h}}} \quad (1.5)$$

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 d'aucune mesure commune avec celles qui correspondent au coefficient de rugosité n figurant dans la relation (1.4) de *Ganguillet – Kutter* 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* a été développée à l'origine pour de petits canaux, si bien que sa généralisation ne donne pas d'aussi bons résultats que ceux obtenus par la formule de *Ganguillet – Kutter*.

I-1-3- 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 une forme implicite :

$$C = -23,2 \log \left(\frac{1,811C}{R} \frac{\varepsilon}{R_h} \right) \quad (1.6)$$

" log " désigne le logarithme décimal, R est le nombre de *Reynolds*, ε est la rugosité absolue des parois du canal. A l'origine, la formule de *Powell* a été présentée en unité anglaise et les

constantes figurant dans la relation (1.6) sont alors différentes et beaucoup plus simples :

$$C = -42 \log \left(\frac{C}{4R} + \frac{\varepsilon}{R_h} \right) \quad (1.7)$$

Pour le cas des canaux rugueux, l'écoulement est en général turbulent correspondant aux valeurs élevées du nombre de Reynolds. Le terme $C/(4R) \rightarrow 0$ et la relation (1.7) devient :

$$C = -42 \log \left(\frac{\varepsilon}{R_h} \right) \quad (1.8)$$

Par contre, pour les canaux lisses, l'effet de la rugosité est tellement faible que la relation (1.7) peut s'écrire :

$$C = -42 \log \left(\frac{C}{4R} \right) \quad (1.9)$$

I-2- Formule de Manning-Strickler:

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

$$V = k R_h^{2/3} \sqrt{J} \quad (1.10)$$

La relation (1.10) a été ensuite modifiée par plusieurs auteurs pour s'écrire:

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} \sqrt{J} \quad (1.11)$$

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

La formule de *Manning – Strickler* est celle qui est largement utilisée pour les écoulements uniformes dans les canaux ouverts.

De nombreuses applications ont montré que les valeurs de n de *Manning* et n de *Kutter* 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 9m.

En comparant la formule de *Manning – Strickler*, à celle de *Chézy*, on peut écrire C

$= (1/n)R_h^{1/6}$. Ainsi, la formule de *Manning – Strickler* est souvent considérée comme une variante de la formule de *Chézy*.

De nombreuses études dont celle de *Bazin*, 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*, mais sa valeur moyenne varie entre 0,6499 et 0,8395 suivant la forme du canal et la rugosité de celui-ci. Des études 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 de n mais aussi de R_h et 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:

$$C = (1/n)R_h^y \quad (1.12)$$

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

La relation (1.12) est applicable pour un rayon hydraulique variant entre 0,10 m et 3 m et pour n compris entre 0,011 et 0,04. Des relations approchées au calcul de l'exposant y ont été

également proposées : $y = 1.5\sqrt{n}$ pour $R_h < 1m$ et $y = 1.3\sqrt{n}$ pour $R_h > 1m$.

L'application de la formule de *Manning – Strickler*, comme celle d'ailleurs de *Ganguillet – Kutter* est tributaire de la valeur du coefficient n . 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. En se référant à la bibliographie, plusieurs auteurs concluent que pour estimer n les étapes suivantes sont nécessaires:

- *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 matériaux constituant les parois du canal, l'irrégularité du canal due à la présence de courbures ou de variation même réduite de la section transversale de l'écoulement, etc...

- *Consulter les tables de valeurs de n déjà évalué pour des canaux de différents types.

- *Examiner et s'informer de l'état physique caractérisant des canaux existants et dont la valeur de n a déjà été déterminée.

- *Déterminer la valeur de n par une approche analytique basée sur la répartition théorique de la vitesse dans les sections transversales de l'écoulement.

I-3- Formule de Darcy – Weisbach évaluation du coefficient de frottement :

La formule de *Darcy – Weisbach* exprime la proportionnalité entre le gradient de la perte de charge J , la vitesse moyenne V de l'écoulement et le diamètre hydraulique $D_h = 4A/P$

$= 4R_h$. Le facteur de proportionnalité étant le coefficient de frottement f . Le gradient J est inversement proportionnel à D_h et proportionnel au carré de la vitesse V :

$$J = \frac{f}{D_h} \frac{V^2}{2g} \quad (1,13)$$

La formule (1.13) est aussi bien valable pour les canaux ouverts que pour les conduites fermées.

Le coefficient de frottement f peut être évalué par diverses relations, selon la nature du régime d'écoulement.

La formule de *Colebrook – White* permet d'évaluer le coefficient de frottement f lorsque l'écoulement est en régimes de transition, turbulent rugueux et lisse :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D_h}}{3,7} + \frac{2,51}{R\sqrt{f}} \right) , \quad R < 2300 \quad (1,14)$$

Dans le cas où le régime d'écoulement est de transition, le coefficient de frottement dépend à la fois de la rugosité relative ε / D_h et du nombre de *Reynolds* R . La représentation graphique de la relation (1.14) dans un système d'axes de coordonnées à divisions logarithmiques montre que, pour la même valeur de ε / D_h , le coefficient de frottement f diminue lorsque R augmente. Pour des valeurs données de ε / D_h et de R , l'évaluation du coefficient de frottement f , par application de la relation (1.14), nécessite un procédé itératif. Une excellente relation approchée de (1.14) a été proposée par *Achour* (*Achour, 2007*):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D_h}}{3,7} + \frac{4,5}{R} \log \frac{R}{6,97} \right) \quad (1,15)$$

A partir d'une valeur $R = R_{lim}$ dépendant de la valeur de ε / 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 :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D_h}}{3,7} \right) \quad (1,16)$$

La relation (1.16) peut être obtenue à partir des relations (1.14) ou (1.15), en écrivant que $R \rightarrow \infty$.

Dans le domaine pratiquement lisse correspondant à $\varepsilon / D_h \rightarrow 0$, la relation (1.14) mène à écrire :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{R\sqrt{f}} \right) \quad (1,17)$$

et l'évaluation de f nécessite également un procédé itératif. Dans le même domaine d'écoulement, ce procédé itératif peut être évité par l'application de la relation (1.15) :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{4,5}{R} \log \frac{R}{6,97} \right) \quad (1,18)$$

Dans la large gamme $2,35 \cdot 10^3 \leq R \leq 10^9$, l'application de la relation (1.18) occasionne un écart relatif inférieur à 0,7% par rapport à (1.17).

La formule de *Swamee et Jain* (1976) permet également d'évaluer de manière explicite le coefficient f dans le domaine pratiquement lisse:

$$f = \left[2 \log \left(\frac{5,74}{R^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (1,19)$$

Mais, dans la même gamme de valeurs ci-dessus indiquée de R , l'application de (1.19) occasionne un écart relatif atteignant 2,8% par rapport à (1.17). Dans une gamme plus restreinte de R telle que $5 \cdot 10^3 < R < 10^8$, cet écart se réduit mais atteint tout de même 1,5%.

En comparant les relations (1.1) et (1.13), on peut montrer que le coefficient C de *Chézy* est étroitement lié au coefficient de frottement f :

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (1,20)$$

Conclusion :

Le chapitre précédent a eu pour objectif de passer en revue les principaux résultats connus sur l'écoulement uniforme. Nous avons précisé les conditions d'établissement d'un écoulement uniforme dont les caractéristiques ont été représentées sur la figure 1.1, en comparant la pente du canal à la pente critique.

A partir d'un schéma de définition, nous avons montré les différentes forces intervenant dans un volume de contrôle de l'écoulement uniforme, ce qui a conduit à la démonstration de la formule universellement connue de *Chézy*. Nous avons montré que le coefficient de résistance C de *Chézy* est tel que $C = \sqrt{\rho g / K}$, où ρ est la masse volumique du liquide en écoulement, g est l'accélération de la pesanteur et K est un facteur de proportionnalité intervenant dans l'expression de la force de résistance à l'écoulement (Relation 1.2). Nous avons présenté trois relations permettant d'évaluer le coefficient de résistance à l'écoulement C de *Chézy*. La première relation est celle de *Ganguillet – Kutter* dans laquelle le coefficient C est tel que $C(J, R_h, n)$, où J est la pente de la ligne de charge totale égale à la pente géométrique du canal, R_h est le rayon hydraulique et n est le coefficient de rugosité. La seconde relation est celle de *Bazin* dans laquelle le coefficient C est tel que $C(R_h, m)$, où m est le coefficient de rugosité dépendant de la nature du matériau constituant le canal considéré. La troisième relation est celle de *Powell*. Elle exprime de manière implicite le coefficient C en fonction du nombre de *Reynolds*, du rayon hydraulique et de la rugosité absolue des parois du canal.

Nous avons présenté la formule de *Manning* ou de *Manning-Strickler* qui exprime la vitesse moyenne du liquide en écoulement. Le coefficient n selon *Manning* et $1/n = k$ selon *Strickler* a été discuté et son unité a été précisée. Le coefficient k est lié à la rugosité absolue ϵ par la relation de *Hager* (1989). Nous avons surtout précisé qu'il n'existe aucune méthode analytique d'évaluation du coefficient n de *Manning*, à l'exception du cas d'un canal de grande largeur à parois rugueuses et dans l'hypothèse que la distribution de la vitesse suit une loi logarithmique.

La relation de *Darcy-Weisbach* a été présentée (Relation 1.16). Elle exprime la pente de la ligne de charge totale comme étant un paramètre inversement proportionnel au diamètre hydraulique et directement proportionnel à la hauteur capable de la vitesse de l'écoulement. Le facteur de proportionnalité est représenté par le coefficient f , appelé coefficient de frottement. Celui-ci peut être évalué par la relation de *Colebrook-White* en s'appuyant sur un

procédé itératif. Des relations explicites au calcul de f ont été proposées par certains auteurs, tels que *Achour* et *Swamee*.

CHAPITRE 2

COEFFICIENT DE CHEZY

EN ECOULEMENT UNIFORME DANS UN CANAL

RECTANGULAIRE PAR LA METHODE DU MODELE

RUGUEUX DE REFERENCE MMR

Introduction :

Dans ce contexte que nous proposons le présent chapitre dans lequel nous établissons des relations générales destinées non seulement à l'évaluation des coefficients de résistance à l'écoulement de Chézy, mais à examiner aussi leur variation en fonction de la profondeur de l'écoulement et de d'autres paramètres hydrauliques qui influencent l'écoulement.

L'application de la formule de Chézy au cas de l'écoulement uniforme dans un canal de forme rectangulaire mène à une équation de troisième ordre. Sa résolution analytique conduit à l'expression exacte de la profondeur normale, en ayant recours aux fonctions trigonométriques. Cependant, l'évaluation de la valeur requise du coefficient C de Chézy demeure encore quasi impossible sans l'aide d'un procédé itératif. La méthode du modèle est alors une solution alternative à ce problème.

Initiée et développée par l'auteur Achour B durant la période de 2002 jusqu'à 2006 au sein du laboratoire de recherche en hydraulique souterraine et de surface (LARHYSS) de l'université de Biskra.

II-1- Caractéristiques géométriques et hydrauliques :

Pour les canaux ouverts, le modèle rugueux de référence est caractérisé par une rugosité relative arbitrairement choisie égale à $\varepsilon / D_h = 0,037$.

Où ε et D_h désignent respectivement la rugosité absolue et le diamètre hydraulique du modèle.

L'écoulement dans le modèle rugueux de référence est considéré comme étant en régime turbulent rugueux et le coefficient de frottement \bar{f} est alors donné par la relation (1.14).

Le canal de forme rectangulaire est l'un des ouvrages le plus connu et le plus rencontré dans les aménagements hydrauliques. La figure 2.1 montre schématiquement ce canal et ses caractéristiques géométriques.

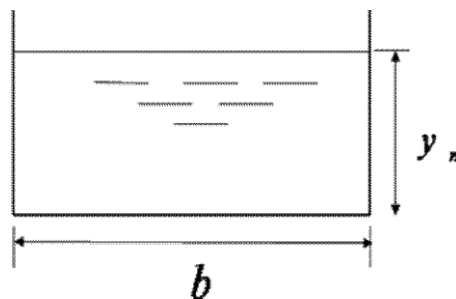


Figure 2.1 : Schéma de définition du canal ouvert de forme rectangulaire

Les parois internes du canal sont caractérisées par la rugosité absolue ε . Le canal écoule le débit volume Q , d'un liquide de viscosité cinématique ν , sous la pente i qui correspond à la pente géométrique de l'ouvrage.

La forme du canal considéré est définie par le paramètre de forme $\eta = y_n / b$, appelé aussi rapport d'aspect, y_n est la profondeur normale de l'écoulement et b désigne la largeur du canal.

•L'aire de la section mouillée A de l'écoulement s'écrit:

$$A = b y_n \quad (2,1)$$

qui peut également s'écrire :

$$A = b^2 \eta \quad (2,2)$$

•Le périmètre mouillé P :

$$P = b + 2y_n \quad (2,3)$$

Ou bien :

$$P = b(1 + 2\eta)$$

•Le diamètre hydraulique est par suite:

$$D_h = 4 \frac{A}{P} = 4 \frac{b^2 \eta}{b(1 + 2\eta)}$$

Soit :

$$D_h = 4b \frac{\eta}{1 + 2\eta}$$

II-2- Caractéristiques du modèle rugueux de référence :

Le modèle rugueux de référence du canal étudié est représenté schématiquement sur la figure 2.2. Il est caractérisé par la largeur \bar{b} et l'écoulement est de profondeur \bar{y}_n .

Le paramètre de forme $\eta = b / y_n$ du modèle rugueux de référence est égal à celui du canal à dimensionner, représenté par la figure 2.1, soit :

$$\bar{\eta} = \frac{\bar{y}_n}{b} = \eta = \frac{y_n}{b}$$

Le modèle rugueux écoule le même débit volume que celui du canal à dimensionner et sous la même pente i , soit :

$$\bar{Q} = Q; \bar{i} = i \quad (2,7)$$

En tenant compte de la relation (2.6), l'aire de la section mouillée \bar{A} du modèle rugueux de référence est donc :

$$\bar{A} = \bar{b}^2 \eta \quad (2,8)$$

Le périmètre mouillé

$$\bar{P} = \bar{b} + 2y_n \quad (2,9)$$

qui peut s'écrire :

$$\bar{P} = \bar{b}(1 + 2\eta) \quad (2,10)$$

Le diamètre hydraulique est par suite :

$$\bar{D}_h = 4 \frac{\bar{A}}{\bar{P}} = 4 \bar{b} \frac{\eta}{1 + 2\eta} \quad (2,11)$$

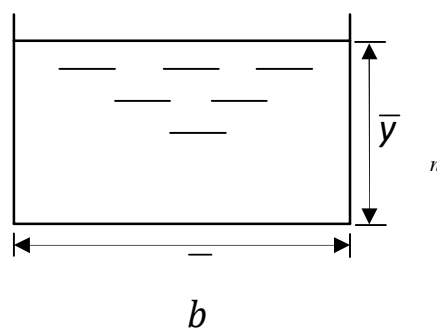


Figure 2.2 : Schéma de définition du modèle rugueux de référence du canal ouvert de forme rectangulaire

Etant donné que la rugosité relative du modèle rugueux de référence est $\varepsilon/D_h = 0,037$ et que le régime d'écoulement est turbulent rugueux, alors le coefficient de frottement f de l'écoulement est donné par la relation bien connue de *Nikuradse*, soit :

$$\bar{f} = \left[-2 \log \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{3,7} \right) \right]^{-2} \quad (2,12)$$

Après calcul, le coefficient de frottement \bar{f} prend alors la valeur $\bar{f} = 1/16$

L'écoulement turbulent rugueux se produisant dans le canal de forme rectangulaire de référence est donc caractérisé par un coefficient de frottement constant égal à 1/16.

II-3- Relation de Darcy-Weisbach appliquée au modèle rugueux :

La relation de Darcy-Weisbach s'applique également aux canaux à ciel ouvert. Cette relation a été rappelée au cours du premier chapitre de notre étude (relation 1.13) dans laquelle le gradient J de la perte correspond à la pente géométrique i du canal étudié, soit:

$$i = \frac{f V^2}{D_h 2g} \quad (2,13)$$

La vitesse moyenne V figurant dans la relation (2.13) peut s'écrire, en tenant compte de l'équation de continuité :

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2,14)$$

Le diamètre hydraulique est par définition :

$$D_h = 4A/P \quad (2,15)$$

En tenant compte des relations (2.14) et (2.15), la relation (2.13) s'écrit alors :

$$i = \frac{f}{8g} P \frac{Q^2}{A^3} \quad (2,16)$$

En appliquant la relation (2.16) au modèle rugueux de référence, nous obtenons :

$$i = \frac{\bar{f}}{8g} \bar{P} \frac{Q^2}{A^3} \quad (2,17)$$

II-4- Facteur de correction des dimensions linéaires :

Selon la méthode du modèle rugueux, toute dimension linéaire b d'un canal donné est égale à la dimension linéaire correspondante \bar{b} du modèle rugueux, corrigée par les effets d'un facteur de correction ψ . Cela se traduit par la relation fondamentale :

$$b = \psi \bar{b} \quad (2,18)$$

Etant donné que la dimension linéaire b est plus grande que la dimension linéaire \bar{b} , alors le facteur de correction ψ est inférieur à l'unité, ou bien $0 < \psi < 1$

Comme le périmètre mouillé P est une dimension linéaire, alors nous pouvons écrire :

$$P = \psi \bar{P} \quad (2.19)$$

En ce qui concerne l'aire de la section mouillée A , celle-ci étant proportionnelle à la dimension linéaire b au carré, nous pouvons alors écrire que :

$$A = \psi^2 \bar{A} \quad (2.20)$$

Appliquons les relations (2.19) et (2.20) à la relation (2.16). Nous obtenons :

$$i = \frac{f}{8_g} \psi \bar{P} \frac{Q^2}{\bar{A}^3}$$

$$i = \frac{f}{8_g} \bar{P} \frac{Q^2}{\bar{A}^3} \frac{1}{\psi^5} \quad (2.21)$$

Remarquons, en vertu de la relation (2.17) que :

$$\frac{1}{8_g} \bar{P} \frac{Q^2}{\bar{A}^3} = \frac{\bar{i}}{\bar{f}} \quad (2.22)$$

En combinant les relations (2.21) et (2.22), il vient alors que :

$$i = \frac{f}{\bar{f}} \bar{i} \frac{1}{\psi^5} \quad (2.23)$$

Comme d'une part $\bar{f} = 1/16$ et $i = \bar{i}$ en vertu de la condition (2,7) , la relation (2,23) s'écrit alors plus simplement :

$$1 = \frac{16f}{\psi^5}$$

$$f = \frac{\psi^5}{16} \quad (2.24)$$

Il faut donc noter que le facteur de correction des dimensions linéaires ψ est étroitement lié au coefficient de frottement f .

Dans cette étape de notre étude, il est nécessaire de faire appel à la formule de *Colebrook-White*

exprimant le coefficient de frottement f . Ainsi :

$$\frac{1}{f} = -2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D_h}}{3,7} + \frac{2,51}{R\sqrt{f}} \right) \quad (2.25)$$

Le diamètre hydraulique D_h figurant dans la relation (2.25) est une dimension linéaire et peut donc s'écrire, en vertu de la relation (2.18) :

$$D_h = \psi \bar{D}_h \quad (2.26)$$

Le nombre de Reynolds R figurant dans la relation (2.25) s'écrit, par définition :

$$R = \frac{4Q}{P_v} \quad (2.27)$$

Compte de la relation (2.19), la relation (2.27) devient :

$$R = \frac{4Q}{\psi \bar{P}_v} \quad (2.28)$$

Puisque $Q = \bar{Q}$ en vertu de la condition (2.7), nous pouvons alors remarquer que la quantité

$\frac{4Q}{P_v}$ figurant dans la relation (2.28) correspond au fait au nombre de *Reynolds*

\bar{R} caractérisant l'écoulement dans le modèle rugueux. Ainsi:

$$\bar{R} = \frac{4Q}{\bar{P}_v} \quad (2.29)$$

En combinant les relations (2,28) et (2,29), il ressort que :

$$R = \bar{\psi}^{-1} \bar{R} \quad (2.30)$$

$$\frac{4}{\psi^{5/2}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon / \bar{D}_h}{3,7\psi} + \frac{10,04}{\psi^{-1} R \psi^{5/2}} \right)$$

Ou bien :

$$\psi^{5/2} \log \left(\frac{\varepsilon / \bar{D}_h}{3,7\psi} + \frac{10,04}{\psi^{3/2} \bar{R}} \right) = -2 \quad (2.31)$$

Selon la relation (2.31), le facteur de correction des dimensions linéaires ψ est fonction de la Rugosité absolue ε et des caractéristiques hydrauliques D_h et R de l'écoulement dans le modèle rugueux. La relation (2.31) montre bien qu'elle est implicite vis-à-vis du facteur ψ

Une relation approchée de ψ (Achour 2007) été déterminée et les calculs ont montré que le facteur de correction pouvait s'écrire, avec une excellente approximation, sous la forme :

$$\Psi \cong 1,35 \left[-\log \left(\frac{\varepsilon / \bar{D}_h}{4,75} + \frac{8,5}{\bar{R}} \right) \right]^{-2/5} \quad (2.32)$$

La relation approchée (2.32) a été comparée à la relation exacte (2.31). La comparaison a été menée en respectant les étapes suivantes :

*On fixe une valeur de la rugosité relative ε / D_h entre les valeurs 0 et 0,05 afin de balayer l'ensemble du diagramme universel de Moody.

*On fait varier le nombre de *Reynolds* R avec un pas arbitrairement choisi.

* Par un procédé itératif, on calcule la valeur du coefficient de correction Ψ en application de la relation exacte (2.31).

*On calcule la valeur approchée de ψ selon la relation proposée (2.32).

* On calcule enfin l'écart relatif $\Delta\psi/\psi(\%)$ entre les valeurs de ψ déterminées au cours des étapes 3 et 4.

Les résultats de cette comparaison ont été tracés graphiquement dans le système d'axes de coordonnées à divisions semi logarithmiques de la figure 2.3.

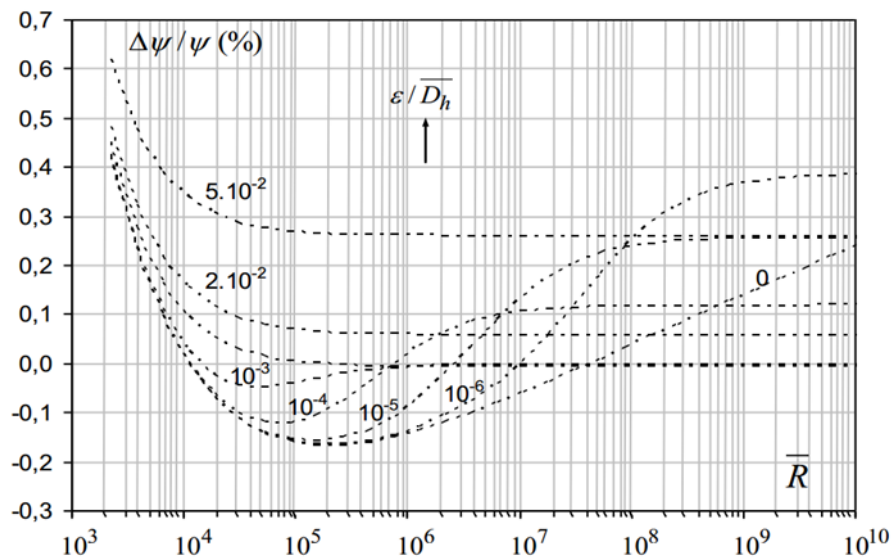


Figure 2.3 : Comparaison entre les valeurs exactes et approchées du coefficient ψ calculées selon les relations (2.31) et (2.32) ; (Achour B,2007).

Il ressort de la figure 2.3 que, pour les valeurs pratiques $R = 10^4$, l'écart relatif entre les valeurs exactes et approchées de ψ ne dépassent guère 0,4% seulement. Ceci montre clairement la fiabilité de la relation approchée (2.32) qui peut donc être appliquée avec une erreur très acceptable. Notons que la relation approchée (2.32) est applicables à l'ensemble du domaine de l'écoulement turbulent, comprenant le régime d'écoulement lisse, le régime d'écoulement de transition et le régime d'écoulement turbulent rugueux.

II-5- Expression du coefficient de Chézy dans un canal rectangulaire :

Le débit volume Q écoulé par un canal de forme quelconque s'exprime par la relation suivante de (Achour et Bedjaoui, 2006) :

$$Q = -4\sqrt{2g}A\sqrt{R_h i} \log\left(\frac{\varepsilon}{14,8R_h} + \frac{10,04}{R}\right) \quad (2,33)$$

Où :

A est l'aire de la section mouillée, R_h est le rayon hydraulique, i est la pente du canal et R est un nombre de Reynolds défini par la relation suivante de (Achour et Bedjaoui, 2006) :

$$R = 32\sqrt{2} \frac{\sqrt{gR_h^3}}{\nu} \quad (2,34)$$

ν est la viscosité cinématique du liquide en écoulement.

Pour un canal de forme rectangulaire, l'aire de la section mouillée A et le périmètre mouillé P s'écrivent respectivement :

$$A = b y_n \quad (2,35)$$

Où b est la largeur du canal et y_n est la profondeur normale de l'écoulement.

$$P = b + 2 y_n \quad (2,36)$$

A partir des relations (3.3) et (3.4), nous pouvons écrire que le rayon hydraulique $R_h = A / P$

est :

$$R_h = \frac{by_n}{b+2y_n} \quad (2,37)$$

La relation peut également s'écrire :

$$R_h = \frac{y_n}{y_n} \frac{b}{\left(\frac{b}{y_n} + 2\right)}$$

Soit :

$$R_h = \frac{b}{(\eta+2)} \quad (2,38)$$

Où $\eta = b/y_n$ exprime le paramètre de forme de la section mouillée, ou le rapport d'aspect.

Compte tenu de la relation (2.37), la relation (2.34) peut s'écrire :

$$R = \frac{32\sqrt{2}}{(\eta+2)^{3/2}} \frac{\sqrt{gib^3}}{v} \quad (2,39)$$

Désignons par :

$$\varphi(\eta) = \frac{32\sqrt{2}}{(\eta+2)^{3/2}} \quad (2,40)$$

$$R^* = \frac{\sqrt{gib^3}}{v} \quad (2,41)$$

Ainsi, la relation (2.39) s'écrit :

$$R = R^* \varphi(\eta) \quad (2,42)$$

D'autre part, la relation de Chézy s'écrit :

$$Q = CA\sqrt{R_h i} \quad (2,43)$$

Où C est le coefficient de Chézy.

En comparant les relations (2.33) et (2.43), nous pouvons déduire que le coefficient C de Chézy est tel que :

$$C = -4\sqrt{2g} \log\left(\frac{\varepsilon}{14,8R_h} + \frac{10,04}{R}\right) \quad (2,44)$$

La relation (2.43) peut s'écrire en termes adimensionnels sous la forme suivante :

$$C/\sqrt{g} = -4\sqrt{2} \log\left(\frac{\varepsilon}{14,8R_h} + \frac{10,04}{R}\right) \quad (2,45)$$

En introduisant les relations (2.38) et (2.42) dans la relation (2.45), il vient que :

$$C/\sqrt{g} = -4\sqrt{2} \log\left(\frac{\varepsilon/b}{14,8/(\eta+2)} + \frac{10,04}{R^*\varphi(\eta)}\right) \quad (2,46)$$

En tenant compte de la relation (2.40), la quantité $14,8 / (\eta + 2)$ peut s'écrire :

$$14,8/(\eta + 2) = \frac{14,8[\varphi(\eta)]^{2/3}}{(32\sqrt{2})^{2/3}}$$

Après calcul, il vient que :

$$14,8/(\eta + 2) = 1,165[\varphi(\eta)]^{2/3} \quad (2,47)$$

En substituant la relation (2.47) dans la relation (2.46), il vient que :

$$C / \sqrt{g} = -4\sqrt{2} \log \left(\frac{\varepsilon/b}{1,165/[\varphi(\eta)]^{2/3}} + \frac{10,04}{R^* \varphi(\eta)} \right) \quad (2.48)$$

Dans la relation (3.16), ε / b représente la rugosité relative du canal rectangulaire étudié. Au regard de la relation (3.16), il apparaît que C/\sqrt{g} dépend de trois paramètres qui sont la rugosité relative ε / b , le paramètre de forme η et le nombre de Reynolds modifié R^* . Nous pouvons alors écrire la relation fonctionnelle suivante :

$$C/\sqrt{g} = \mathcal{F}(\varepsilon/b; \eta; R^*) \quad (2.49)$$

II-6- Variation du coefficient de Chézy :

Pour représenter la variation du coefficient sans dimension C/\sqrt{g} en fonction du paramètre de forme η , nous pouvons faire appel à la relation (2.49). On fixe une valeur de la rugosité relative ε/b et l'on fait varier le nombre de Reynolds modifié R^* . Les tableaux suivants ont été établis selon cette procédure.

La valeur nulle du paramètre de forme η correspond, pour un canal rectangulaire donné, à une profondeur d'écoulement très élevée.

Sous chacun des tableaux, nous avons représenté et commenté la variation de C/\sqrt{g} en fonction du paramètre de forme η .

Tableau 2.1 : Valeurs de C/\sqrt{g} pour $\varepsilon/b=0$

$\varepsilon / b = 0$		$R^* = 10^4$	$R^* = 10^5$	$R^* = 10^6$	$R^* = 10^7$	$R^* = 10^8$
η	$\varphi(\eta)$	C/\sqrt{g}	C/\sqrt{g}	C/\sqrt{g}	C/\sqrt{g}	C/\sqrt{g}
0	16	23,772286	29,429140	35,085995	40,742849	46,399703
0,1	14,870858	23,592489	29,249343	34,906198	40,563052	46,219906
0,2	13,868546	23,421058	29,077912	34,734766	40,391620	46,048475
0,3	12,973979	23,257248	28,914102	34,570956	40,227811	45,884665
0,4	12,171612	23,100411	28,757265	34,41412	40,070974	45,727828
0,5	11,448668	22,949977	28,606832	34,263686	39,920540	45,577394
0,6	10,794560	22,805445	28,462299	34,119153	39,776008	45,432862
0,7	10,20045	22,666367	28,323222	33,980076	39,636930	45,293784
0,8	9,6589057	22,532349	28,189203	33,846057	39,502911	45,159766
0,9	9,1636391	22,403033	28,059888	33,716742	39,373596	45,030450
1	8,7092968	22,278102	27,934957	33,591811	39,248665	44,905519
1,1	8,2912963	22,157268	27,814122	33,470977	39,127831	44,784685
1,2	7,9056941	22,040271	27,697125	33,353979	39,010833	44,667688
1,3	7,5490806	21,926874	27,583728	33,240582	38,897436	44,554291
1,4	7,2184940	21,816862	27,473716	33,130571	38,787425	44,444279
1,5	6,9113503	21,710040	27,366894	33,023748	38,680603	44,337457
1,6	6,6253866	21,606227	27,263081	32,919936	38,576790	44,233644
1,7	6,3586129	21,505259	27,162113	32,818967	38,475822	44,132676
1,8	6,1092736	21,406983	27,063838	32,720692	38,377546	44,034400
1,9	5,8758143	21,311261	26,968115	32,624969	38,281824	43,938678
2	5,6568542	21,217962	26,874816	32,531670	38,188525	43,845379
2,1	5,4511632	21,126967	26,783821	32,440675	38,097530	43,754384
2,2	5,2576423	21,038165	26,695019	32,351873	38,008728	43,665582
2,3	5,0753067	20,951452	26,608307	32,265161	37,922015	43,578869
2,4	4,9032717	20,866733	26,523588	32,180442	37,837296	43,494150
2,5	4,7407407	20,783918	26,440773	32,097627	37,754481	43,411335
2,6	4,5869946	20,702924	26,359778	32,016632	37,673486	43,330341
2,7	4,4413826	20,623671	26,280525	31,937379	37,594234	43,251088
2,8	4,3033148	20,546087	26,202941	31,859795	37,51665	43,173504
2,9	4,1722551	20,470102	26,126957	31,783811	37,440665	43,097519
3	4,0477154	20,395653	26,052507	31,709362	37,366216	43,023070

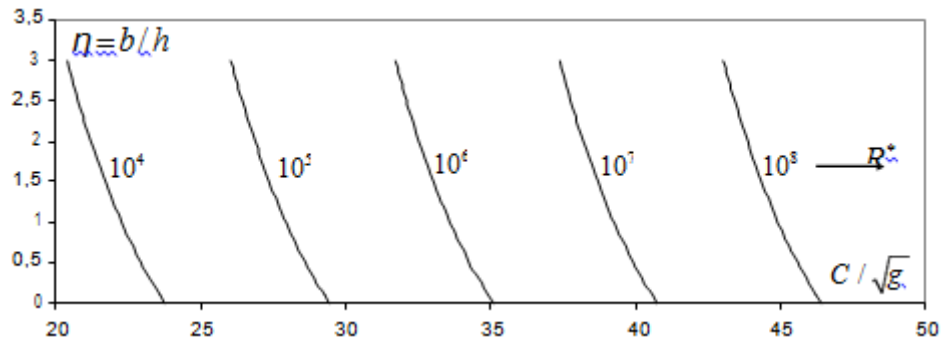
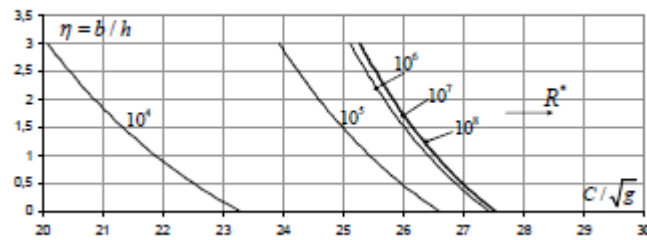


Figure 2.4 : Variation de C/\sqrt{g} en fonction de η , pour $\varepsilon/b = 0$ (Écoulement lisse).

La figure 2.4 montre clairement que pour un nombre de Reynolds modifié R^* fixé, le coefficient C/\sqrt{g} augmente au fur et à mesure que le paramètre de forme η diminue. Cela signifie que pour un canal donné dont la largeur b est connue, le coefficient C/\sqrt{g} augmente lorsque la profondeur de l'écoulement y_n augmente. Nous pouvons également constater que pour un paramètre de forme η fixé, le coefficient C/\sqrt{g} augmente avec l'accroissement du nombre de Reynolds modifié R^* .

Tableau 2.2 : Valeurs de C/\sqrt{g} pour $\varepsilon / b = 10^{-4}$

$\varepsilon / b = 10^{-4}$		$R^* = 10^4$	$R^* = 10^5$	$R^* = 10^6$	$R^* = 10^7$	$R^* = 10^8$
η	$\varphi(\eta)$	C/ g	C/ g	C/ g	C/ g	C/ g
0	16	23,292974	26,606890	27,4321645	27,5322566	27,542493
0,1	14,8708583	23,123693	26,467866	27,30961	27,4121115	27,422600
0,2	13,8685468	22,962094	26,335014	27,1926987	27,2975503	27,308285
0,3	12,9739799	22,807504	26,207795	27,0809304	27,1880763	27,199052
0,4	12,1716124	22,659335	26,085739	26,9738682	27,0832567	27,094468
0,5	11,448668	22,517073	25,968432	26,8711291	26,9827113	26,994153
0,6	10,7945602	22,380260	25,855510	26,7723748	26,8861051	26,897773
0,7	10,20045	22,248492	25,746649	26,6773054	26,7931405	26,805030
0,8	9,65890577	22,121407	25,641558	26,5856536	26,7035528	26,71566
0,9	9,16363916	21,998682	25,539980	26,4971804	26,617105	26,629425
1	8,70929686	21,880025	25,441680	26,4116709	26,5335843	26,546115
1,1	8,2912963	21,765175	25,346449	26,3289312	26,4527986	26,465535
1,2	7,90569415	21,653891	25,254096	26,2487862	26,3745744	26,387514
1,3	7,54908067	21,545959	25,164446	26,1710767	26,2987541	26,311894
1,4	7,21849401	21,441181	25,077344	26,0956576	26,2251942	26,238531
1,5	6,91135036	21,339376	24,992643	26,0223968	26,1537636	26,167295
1,6	6,6253866	21,240381	24,910212	25,951173	26,0843423	26,098065
1,7	6,35861295	21,144042	24,829929	25,8818749	26,0168204	26,030731
1,8	6,10927369	21,05022	24,751683	25,8144003	25,9510966	25,965194
1,9	5,87581435	20,958786	24,675369	25,7486548	25,8870774	25,901358
2	5,65685425	20,869621	24,600892	25,684551	25,8246766	25,839138
2,1	5,45116328	20,782614	24,528163	25,6220084	25,7638142	25,778455
2,2	5,25764236	20,697663	24,457100	25,5609518	25,7044161	25,719234
2,3	5,07530671	20,614672	24,387627	25,5013117	25,6464136	25,661406
2,4	4,90327173	20,533553	24,319672	25,4430231	25,5897423	25,604907
2,5	4,74074074	20,454222	24,253169	25,3860256	25,5343425	25,549678
2,6	4,5869946	20,376601	24,188055	25,3302626	25,4801583	25,495663
2,7	4,44138263	20,300619	24,124271	25,2756813	25,4271375	25,442809
2,8	4,30331483	20,226207	24,061763	25,2222321	25,375231	25,391068
2,9	4,17225512	20,153301	24,000481	25,1698685	25,324393	25,340393
3	4,04771541	20,081841	23,940374	25,1185468	25,2745803	25,290742

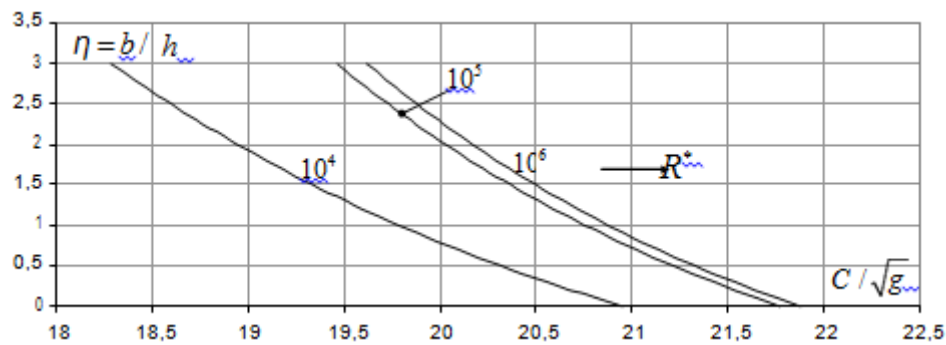


**Figure 2.5 : Variation de C / \sqrt{g} en fonction de R^* , pour $\varepsilon / b = 10^{-4}$
Les courbes se confondent pour $R^* \geq 10^6$.**

Il ressort de la figure 2.5 que pour une valeur fixée du nombre de Reynolds modifié R^* , le Coefficient C/\sqrt{g} augmente avec la diminution du paramètre de forme η , comme dans le cas de la figure 2.4. Nous pouvons également observer que pour un paramètre de forme η donné, le coefficient C/\sqrt{g} augmente avec le nombre de Reynolds modifié R^* . Ce qui ressort de particulier de la figure 2.5, c'est le fait qu'au-delà de $R^* = 10^7$ les courbes de variation du coefficient C/\sqrt{g} se confondent. Cela signifie qu'à partir de la valeur $R^* = 10^7$, le nombre de Reynolds modifié R^* n'a aucune influence sur la variation du coefficient C/\sqrt{g} et le régime d'écoulement turbulent rugueux est alors atteint. En d'autres termes, il n'y a plus aucune influence de la viscosité cinématique ν au-delà de $R^* = 10^7$.

Tableau 2.3 : Valeurs de C/\sqrt{g} pour $\varepsilon / b = 10^{-3}$

$\eta / b = 10^{-3}$		$R^* = 10^4$	$R^* = 10^5$	$R^* = 10^6$	$R^* = 10^7$	$R^* = 10^8$
η	$\varphi(\eta)$	C/ g	C/ g	C/ g	C/ g	C/ g
0	16	20,950036	21,775310	21,875402	21,885639	21,886665
0,1	14,870858	20,811012	21,652755	21,755257	21,765746	21,766798
0,2	13,868546	20,678160	21,535844	21,640696	21,651431	21,652507
0,3	12,973979	20,550941	21,424076	21,531222	21,542198	21,543298
0,4	12,171612	20,428884	21,317014	21,426402	21,437614	21,438738
0,5	11,448668	20,311578	21,214274	21,325857	21,337299	21,338446
0,6	10,794560	20,198656	21,115520	21,229250	21,240918	21,242088
0,7	10,20045	20,089795	21,020451	21,136286	21,148175	21,149368
0,8	9,6589057	19,984704	20,928799	21,046698	21,058805	21,060019
0,9	9,1636391	19,883126	20,840326	20,960250	20,972571	20,973807
1	8,7092968	19,784826	20,754816	20,87673	20,889260	20,890517
1,1	8,2912963	19,689595	20,672077	20,795944	20,808681	20,809959
1,2	7,9056941	19,597241	20,591932	20,717720	20,730660	20,731958
1,3	7,5490806	19,507592	20,514222	20,641899	20,655040	20,656358
1,4	7,2184940	19,42049	20,438803	20,568339	20,581677	20,583015
1,5	6,9113503	19,335789	20,365542	20,496909	20,510440	20,511798
1,6	6,6253866	19,253358	20,294318	20,427488	20,441210	20,442587
1,7	6,3586129	19,173075	20,225020	20,359966	20,373877	20,375273
1,8	6,1092736	19,094828	20,157546	20,294242	20,308339	20,309754
1,9	5,8758143	19,018514	20,091800	20,230223	20,244504	20,245936
2	5,6568542	18,944037	20,027696	20,167822	20,182284	20,183735
2,1	5,4511632	18,871309	19,965154	20,106959	20,121601	20,123070
2,2	5,2576423	18,800246	19,904097	20,047561	20,062380	20,063866
2,3	5,0753067	18,730773	19,844457	19,989559	20,004552	20,006056
2,4	4,9032717	18,662818	19,786168	19,932888	19,948053	19,949575
2,5	4,7407407	18,596315	19,729171	19,877488	19,892824	19,894363
2,6	4,5869946	18,531200	19,673408	19,823304	19,838809	19,840365
2,7	4,4413826	18,467417	19,618827	19,770283	19,785955	19,787528
2,8	4,3033148	18,404909	19,565377	19,718376	19,734214	19,735803
2,9	4,1722551	18,343626	19,513014	19,667538	19,683539	19,685145
3	4,0477154	18,283520	19,461692	19,617726	19,633888	19,635510



**Figure 2.6 : Variation de C / \sqrt{g} en fonction de R^* , pour $\varepsilon / b = 10^{-3}$.
Les courbes se confondent pour $R^* \geq 10^6$.**

Comme dans le cas des figures 2.4 et 2.5, il ressort de la figure 2.6 que pour une même valeur du nombre de Reynolds modifié R^* , le coefficient C / \sqrt{g} augmente au fur et à mesure que le paramètre de forme η diminue. Ceci signifie que le coefficient C / \sqrt{g} augmente lorsque la profondeur y_n de l'écoulement augmente. Nous pouvons également observer que pour un paramètre de forme η fixé, le coefficient C / \sqrt{g} augmente avec le nombre de Reynolds modifié R^* . Pour la valeur de la rugosité relative $\varepsilon / b = 10^{-3}$, les courbes de variation du coefficient C / \sqrt{g} se confondent à partir de la valeur $R^* = 10^6$. L'écoulement turbulent est atteint plus tôt que dans le cas des courbes des figures 2.4 et 2.5. Cela peut se justifier par le fait que plus la rugosité relative ε / b augmente et plus le régime d'écoulement turbulent rugueux est atteint rapidement.

Une conclusion peut être tirée au regard des tableaux 2.1, 2.2 et 2.3 et même des figures 2.4, 2.5 et 2.6, c'est que plus la rugosité relative ε / b augmente et plus le coefficient C / \sqrt{g} diminue, quelle que soit la valeur du nombre de Reynolds modifié R^* .

II-7- Calcul du paramètre de forme η :

Selon la relation fonctionnelle (2.48), pour évaluer le coefficient de Chézy C , il est nécessaire de connaître le paramètre de forme η . Rappelons que les données du problème sont le débit volume Q , le diamètre D du canal, la pente i du canal, la rugosité absolue ε

caractérisant l'état de la paroi interne du canal et la viscosité cinématique ν du liquide en écoulement. Pour calculer le paramètre de forme η , nous pouvons faire appel à la méthode du modèle rugueux (MMR).

Les caractéristiques du modèle rugueux sont affectés du symbole « $\bar{\quad}$ ». Le modèle rugueux est un canal de forme rectangulaire caractérisée par une rugosité relative $\bar{\epsilon}/\bar{D}_h = 0,037$ arbitrairement choisie, où D_h désigne le diamètre hydraulique. La rugosité relative ainsi choisie est tellement élevée que l'écoulement dans le modèle rugueux se situe dans le domaine turbulent rugueux. Pour ce domaine, la formule de Nikuradsé demeure en vigueur et nous pouvons alors écrire que :

$$\bar{f}^{-1/2} = -2 \log \left(\frac{\bar{\epsilon}/\bar{D}_h}{3.7} \right) \quad (2.50)$$

\bar{f} est le coefficient de frottement dans le modèle rugueux. Compte du fait que la rugosité relative $\bar{\epsilon}/D_h$ est $\bar{\epsilon}/D_h = 0,037$, la relation (2.50) mène à :

$$\bar{f} = \frac{1}{16} \quad (2.51)$$

Ainsi, le coefficient de frottement dans le modèle rugueux est une constante. Ceci était prévisible puisque l'écoulement dans le modèle rugueux est turbulent rugueux.

Considérons un modèle rugueux dont le débit volume \bar{Q} est égal au débit volume Q écoulé par le canal rectangulaire étudié. Admettons également que la pente \bar{i} du modèle rugueux est égale à la pente i du canal rectangulaire étudié. Admettons enfin que la largeur \bar{b} du modèle rugueux est égal à la largeur du canal considéré. Nous pouvons alors écrire les égalités suivantes :

$$\bar{Q} = Q, \bar{i} = i, \bar{b} = b \quad (2.52)$$

Rappelons que la relation de Darcy-Weisbach exprime la pente i du canal sous la forme suivante :

$$i = \frac{f}{D_h} \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (2.53)$$

Où f est le coefficient de frottement dans le canal rectangulaire étudié.

Appliquons la relation (2,53) au modèle rugueux, en tenant compte des égalités (2.52) . Il vient

que :

$$i = \frac{\bar{f}}{D_h} \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (2.54)$$

Dans cette dernière relation, le diamètre hydraulique \bar{D}_h est par définition $\bar{D}_h = 4 \bar{A} / \bar{P}$, où \bar{P} est le périmètre mouillé dans le modèle rugueux. En introduisant la définition du diamètre hydraulique \bar{D}_h dans la relation (2.54) et en tenant compte de la relation (2.51), nous pouvons écrire que :

$$i = \frac{1}{128g} \frac{\bar{P} Q^2}{\bar{A}^3} \quad (2.55)$$

L'aire de la section mouillée \bar{A} et le périmètre mouillé \bar{P} s'écrivent respectivement :

$$\bar{A} = b\bar{y}_n \quad (2.56)$$

$$\bar{P} = b + 2\bar{y}_n \quad (2.57)$$

Dans les relations (2,56) et(2.57), \bar{y}_n désigne la profondeur normale de l'écoulement dans le modèle rugueux. En substituant les relations (2,56) et (2.57) dans la relation (2,55), il vient que :

$$i = \frac{1}{128g} (b + 2\bar{y}_n) \frac{Q^2}{b^3\bar{y}_n^3} \quad (2.57)$$

Cette dernière relation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$i = \frac{1}{128g} \left(1 + 2\frac{\bar{y}_n}{b}\right) \frac{Q^2}{b^6\left(\frac{\bar{y}_n}{b}\right)^3} \quad (2.58)$$

Définissons le paramètre de forme $\bar{\eta}_0 = \bar{y}_n/b$ pour le modèle rugueux. La relation (2.58)

s'écrit alors :

$$i = \frac{1}{128g} (1 + 2\bar{\eta}_0) \frac{Q^2}{b^5\bar{\eta}_0^3} \quad (2.59)$$

La relation (2.59) peut également s'écrire sous la forme suivante :

$$1 = \frac{1}{128} \frac{(1+2\bar{\eta}_0)}{\bar{\eta}_0^3} \left(\frac{Q^2}{gib^5}\right) \quad (3.60)$$

Désignons par la quantité $Q_b^* = Q/\sqrt{gib^5}$, la conductivité relative du modèle rugueux rapportée à la largeur b. Elle est égale à la conductivité relative du canal rectangulaire étudié.

Ainsi, et après réarrangements, la relation (2.59) devient :

$$\overline{\eta}_0^3 - \frac{Q_b^{*2}}{64} \overline{\eta}_0 - \frac{Q_b^{*2}}{128} = 0 \quad (2.61)$$

On obtient ainsi que équation du troisième degré en $\overline{\eta}_0$, sans terme de second ordre. Dans la

relation (3.30), la conductivité relative Q_b^* est connue, puisque Q, i, g et b sont des paramètres donnés. Pour résoudre l'équation de troisième degré (3.30), nous pouvons faire appel aux fonctions trigonométriques ou hyperboliques.

La relation (2.61) est de la forme :

$$x^3 - px - q = 0 \quad (2.62)$$

$$\text{Avec : } p = \frac{Q_b^{*2}}{64} \text{ et } q = \frac{Q_b^{*2}}{128}$$

Le discriminant Δ de la relation (2.61) est donné par la relation :

$$\Delta = \left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3 \quad (2.63)$$

Après calculs, le discriminant Δ s'écrit :

$$\Delta = \left(\frac{Q_b^*}{16}\right)^4 \left(1 - \frac{Q_b^*}{6\sqrt{3}}\right) \left(1 + \frac{Q_b^*}{6\sqrt{3}}\right) \quad (2.64)$$

Nous pouvons ainsi constater que le discriminant Δ peut être négatif, nul ou positif selon la valeur de la conductivité relative Q_b^* . Ainsi :

i. Lorsque $Q_b^* \geq 6\sqrt{3}$, il vient que $\Delta \leq 0$ et la racine réelle de l'équation est :

$$\overline{\eta}_0 = \frac{Q_b^*}{4\sqrt{3}} \cos(\beta/3) \quad (2.65)$$

où l'angle β est tel que :

$$\cos(\beta) = \frac{6\sqrt{3}}{Q_b^*} \quad (2.66)$$

ii. Lorsque $Q_b^* \leq 6\sqrt{3}$, il vient que $\Delta \geq 0$ et la racine réelle de l'équation est :

$$\bar{\eta}_0 = \left(\frac{Q_b^*}{256}\right)^{1/3} \left[\left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}}\right)^{1/3} + \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}}\right)^{1/3} \right] \quad (2.67)$$

Une fois calculé le paramètre de forme $\bar{\eta}_0$ par l'une des relations (3.34) ou (3.36), selon le signe du discriminant Δ dépendant de la valeur de la conductivité relative Q_b^* , les étapes suivantes indiquent la procédure de calcul du paramètre de forme η , selon la MMR. Nous rappelons que les paramètres connus du problème sont Q , b , i , ε et v .

- * Avec la valeur calculée de $\bar{\eta}_0$, on détermine la valeur de l'aire de la section mouillée \bar{A} , du périmètre mouillé \bar{P} de l'écoulement dans le modèle rugueux, du diamètre hydraulique \bar{D}_h et celle du nombre de Reynolds \bar{R} , selon les relations suivantes :

$$\bar{A} = \bar{b} \bar{y}_n = b^2 \bar{\eta}_0 \quad (2.68)$$

$$\bar{P} = b + 2\bar{y}_n = b(1 + 2\bar{\eta}_0) \quad (2.69)$$

$$\bar{D}_h = 4\bar{A}/\bar{P} \quad (2.70)$$

$$\bar{R} = \frac{4Q}{Pv} \quad (2.71)$$

- * Avec la valeur donnée de la rugosité absolue ε et la valeur calculée du diamètre hydraulique \bar{D}_h et celle du nombre de Reynolds \bar{R} , on détermine la valeur du facteur de correction des dimensions linéaires Ψ en application de la relation suivante :

$$\Psi = 1,35 \left[-\log \left(\frac{\varepsilon/\bar{D}_h}{4,75} + \frac{8,5}{\bar{R}} \right) \right]^{-2/5} \quad (2.72)$$

- * On affecte au modèle rugueux la nouvelle dimension linéaire suivante, issue de la relation fondamentale de la MMR :

$$\bar{b} = b/\Psi$$

- * Avec la nouvelle dimension linéaire calculée à l'étape précédant, on détermine la nouvelle valeur de la conductivité relative selon la relation suivante :

$$Q_b^* = \frac{Q}{\sqrt{g_i(b/\Psi)^5}} \quad (2.73)$$

* Avec cette nouvelle valeur de la conductivité relative, on calcule le paramètre de forme $\bar{\eta}_0$ par application de l'une des relations (2.64) ou (2.66), selon le signe du discriminant Δ . Cette valeur calculée de $\bar{\eta}_0$ correspond à la valeur du paramètre de forme $\eta_0 = y_0/b$ de l'écoulement dans le canal rectangulaire étudié. Soit :

$$\bar{\eta}_0 = \eta_0 \quad (2.74)$$

* Finalement le paramètre de forme $\eta = b/y_n$ recherché est tel que :

$$\eta = \frac{1}{\eta_0} \quad (2.75)$$

II-8- Etapes de calcul du coefficient *C* de Chézy :

Pour calculer le coefficient *C* de Chézy, il est nécessaire que les paramètres suivants soient connus : le débit volume *Q*, la pente *i* du canal, la rugosité absolue ε , la largeur *b* du canal, la viscosité cinématique ν du liquide en écoulement et l'accélération de la pesanteur *g*. Avec ces paramètres connus, le paramètre de forme η est déduit, selon les étapes de calcul précédemment présentées. C'est la relation (2.47) qui régit le coefficient *C* de Chézy et selon cette relation, les étapes suivantes sont recommandées pour le calcul de *C* :

- * On calcule le paramètre de forme η en suivant les étapes indiquées lors du paragraphe précédent.
- * Avec la valeur ainsi calculée de η , on calcule la valeur de la fonction $\varphi(\eta)$ en application de la relation (2.40). Soit :

$$\varphi(\eta) = \frac{32\sqrt{2}}{(\eta+2)^{3/2}}$$

- * On détermine la valeur de la rugosité relative ε / b .
- * On calcule la valeur du nombre de Reynolds modifié R^* selon la relation (2.41). Soit :

$$R^* = \frac{\sqrt{gib^3}}{v}$$

* Finalement, le coefficient C de Chézy est déduit de la relation (2.48). Soit :

$$C = -4\sqrt{2g} \log \left[\frac{\varepsilon/b}{1,165[\varphi(\eta)]^{2/3}} + \frac{10,04}{R^*\varphi(\eta)} \right]$$

II-9- Exemple de calcul du coefficient C de Chézy :

On souhaite calculer la valeur du coefficient C de Chézy pour le cas d'un canal rectangulaire, connaissant les données suivantes :

$$Q = 3,861 \text{ m}^3/\text{s}, b = 2 \text{ m}, \varepsilon = 0,001 \text{ m}, i = 0,001, v = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

* On calcule la conductivité relative Q_h^* telle que :

$$Q_h^* = Q/\sqrt{gib^5} = 3,861/\sqrt{9,81 \times 0,001 \times 2^5} = 6,89112787$$

On peut constater que $Q_h^* < 6\sqrt{3} = 10,3923048$.

* Conformément à la relation (2.64), le discriminant Δ de l'équation de troisième

degré (2.61) est positif. Le paramètre de forme $\bar{\eta}_0$ est donc régi par la relation (2.67). Soit :

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_0 &= \left(\frac{Q_b^{*2}}{256} \right)^{1/3} \left[\left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}} \right)^{1/3} + \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}} \right)^{1/3} \right] \\ &= \left(\frac{6,89112787^2}{256} \right)^{1/3} \times \left[\left(1 + \sqrt{1 - \frac{6,89112887^2}{108}} \right)^{1/3} + \left(1 - \sqrt{1 - \frac{6,89112887^2}{108}} \right)^{1/3} \right] \end{aligned}$$

=1,047052833

* Avec la valeur ainsi calculée du paramètre de forme $\bar{\eta}_0$, les caractéristiques

hydrauliques du modèle rugueux sont :

L'Aire de la section mouillée \bar{A} , donnée par la relation (2.68). Soit :

$$\bar{A} = b^2 \bar{\eta}_0 = 2^2 \times 1,047052833 = 4,18821133 \text{ m}^3$$

Le périmètre mouillé \bar{P} , donné par la relation (2.69). Soit :

$$\bar{P} = b(1 + 2\bar{\eta}_0) = 2 \times (1 + 2 \times 1,047052833) = 6,188211332 \text{ m}$$

Le diamètre hydraulique \bar{D}_h , donné par la relation (2.70). Soit :

$$\bar{D}_h = 4 \bar{A} / \bar{P} = 4 \times 4,18821133 / 6,188211332 = 2,70721933 \text{ m}$$

Le nombre de Reynolds \bar{R} , donné par la relation (2.71). Soit :

$$\bar{R} = \frac{4Q}{\bar{P}v} = \frac{4 \times 3,861}{6,19011332 \times 10^{-6}} = 2495713,09$$

* Les caractéristiques hydrauliques du modèle rugueux ainsi calculées permettent de déterminer le facteur de correction des dimensions linéaires Ψ , selon la relation (2.72). Soit :

$$\begin{aligned} \Psi &= 1,35 \left[-\log \left(\frac{\varepsilon / \bar{D}_h}{4,75} + \frac{8,5}{\bar{R}} \right) \right]^{-2/5} \\ &= 1,35 \times \left[-\log \left(\frac{0,001/2,7063875}{4,75} + \frac{8,5}{2494946,25} \right) \right]^{-2/5} = 0,76845584 \end{aligned}$$

* Affectons au modèle rugueux la nouvelle dimension linéaire suivante :

$$\bar{b} = b / \Psi = 2 / 0,76845584 = 2,60262191 \text{ m}$$

* Avec cette nouvelle dimension linéaire, calculons la conductivité relative selon la relation (2.73). Soit :

$$Q_b^* = \frac{Q}{\sqrt{g i (b/\Psi)^5}} = \frac{3,861}{\sqrt{9,81 \times 0,001 \times 2,60262191^5}} = 3,56728326$$

* Nous pouvons constater que la valeur de la conductivité relative ainsi calculée est inférieure à $6\sqrt{3} = 10,3923048$. Ceci permet de conclure que le paramètre de forme $\bar{\eta}_0$ est régi par la relation (2.66). Soit :

$$\bar{\eta}_0 = \left(\frac{Q_b^*}{256} \right)^{1/3} \left[\left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}} \right)^{1/3} + \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}} \right)^{1/3} \right]$$

$$= \left(\frac{3,56728326^3}{256} \right)^{1/3} \left[\left(1 + \sqrt{1 - \frac{3,56728326^3}{108}} \right)^{1/3} + \left(1 - \sqrt{1 - \frac{3,56728326^3}{108}} \right)^{1/3} \right]$$

$$= 0,603067235$$

Cette valeur calculée du paramètre de forme $\bar{\eta}_0$ correspond exactement au paramètre de forme η_0 de l'écoulement dans le canal rectangulaire étudié. Soit :

$$\eta_0 = y_n/b = 0,603067235$$

* Le paramètre de forme $\eta = b/y_n$ est donc :

$$\eta = \frac{1}{\eta_0} = \frac{1}{0,603067235} = 1,6581899$$

* Selon la relation (2.40), la fonction $\varphi(\eta)$ est telle que :

$$\varphi(\eta) = \frac{32\sqrt{2}}{(\eta+2)^{3/2}} = \frac{32\sqrt{2}}{(1,6581899+2)^{3/2}} = 6,46793439$$

* La valeur de la rugosité relative ε / b est :

$$\varepsilon / b = 0,001 / 2 = 0,0005$$

* La valeur du nombre de Reynolds modifié R^* est, selon la relation (2.41) :

$$R^* = \frac{\sqrt{g} b^3}{v} = \frac{\sqrt{9,81 \times 0,001 \times 2^3}}{v} = 280142,821$$

* Finalement, la valeur recherchée du coefficient C de Chézy est, selon la relation (2.48) :

$$C = -4\sqrt{2g} \log \left[\frac{\varepsilon/b}{1,165[\varphi(\eta)]^{2/3}} + \frac{10,04}{R^* \varphi(\eta)} \right]$$

$$= -4 \times \sqrt{2 \times 9,81} \times \log \left[\frac{0,0005}{1,165 \times 6,46793439^{2/3}} + \frac{10,04}{280142,821 \times 6,46793439} \right]$$

$$= 68,9013858 \approx 69 \text{ m}^{0,5} / \text{s}$$

* Vérifions la valeur ainsi calculée de C par celle issue de la MMR. Selon la MMR, le coefficient C de Chézy est donné par la relation suivante de Achour :

$$C = \frac{8\sqrt{2g}}{\Psi^{5/2}} \tag{2,76}$$

Le facteur de correction des dimensions linéaires Ψ a été calculé à l'étape 4 et vaut : $\Psi = 0,76845584$

Le coefficient C de Chézy est par suite, selon la relation (2.76) :

$$C = \frac{8\sqrt{2g}}{\Psi^{5/2}} = \frac{8 \times \sqrt{2 \times 9,81}}{0,76845584^{5/2}} = 68,4529552 \text{ m}^{0,5} / \text{s} \approx 68,5 \text{ m}^{0,5} / \text{s}$$

Ainsi, nous pouvons constater que l'écart relatif entre les valeurs de C calculées selon la méthode que nous avons présentée et la MMR est de :

$$\frac{\Delta C}{C} = 100 \times \frac{(68,9013858 - 68,4529552)}{68,9013858} = 0,65\%$$

Nous pouvons alors conclure, tenant compte du faible écart relatif obtenu, que les deux méthodes aboutissent pratiquement au même résultat.

Conclusion :

Le chapitre précédent s'est intéressé à l'étude des coefficients de Chézy en écoulement uniforme dans un canal de forme rectangulaire.

En comparant les relations d'Achour et de Bedjaoui (2006) et celle de Chézy, nous avons pu exprimer la relation générale du coefficient de résistance à l'écoulement C de Chézy. Celle-ci a été transformée en une relation adimensionnelle qui montre que C / \sqrt{g} dépend à la fois de la rugosité relative ε/b , du paramètre de forme $\eta=b/y_n$ et du nombre de Reynolds modifié R^* . La relation obtenue est de type $C/\sqrt{g} = f(\varepsilon/b; \eta; R^*)$. Dans ces paramètres ε est la rugosité absolue caractérisant l'état de la paroi interne du canal, b est la largeur du canal et y_n est la profondeur normale de l'écoulement. Nous avons montré que le nombre de Reynolds modifié R^* dépend de la largeur b , de la pente i du canal et de la viscosité cinématique ν du liquide en écoulement. La relation adimensionnelle obtenue montre que tous les paramètres influençant l'écoulement sont pris en considération, notamment la viscosité cinématique ν .

Après avoir établi la relation adimensionnelle de C / \sqrt{g} , nous avons procédé au tracé graphique de sa variation. Les graphiques obtenus ont montré que le nombre de Reynolds R^* joue un rôle important. Plus la rugosité relative ε/b augmente et plus l'écoulement turbulent rugueux est atteint rapidement, se traduisant par la non influence du nombre de Reynolds modifié R^* ou de la viscosité cinématique ν . Les courbes obtenues se resserrent d'autant plus que la rugosité relative ε/b augmente. Elles finissent par se confondre à partir d'une certaine valeur de R^* .

L'étude s'est poursuivie par le calcul explicite du coefficient de résistance à l'écoulement C de Chézy. Pour cela, il a fallu d'abord calculer le paramètre de forme $\eta = b/y_n$, paramètre dont dépend le coefficient C . La méthode choisie pour le calcul de $\eta = b/y_n$ a été la méthode du modèle rugueux. Elle se base sur les trois relations bien connues de l'écoulement turbulent, appliquées à un modèle rugueux dont la rugosité relative a été arbitrairement choisie dans le domaine turbulent rugueux. Une équation du troisième degré a alors été obtenue et dont la résolution a été effectuée en ayant recours aux fonctions trigonométriques et hyperboliques. Par l'intermédiaire du facteur de correction de la dimension linéaire Ψ , il a été alors possible de déduire l'expression du paramètre de forme recherché $\eta = b/y_n$. Une fois la méthode de calcul du paramètre de forme exposée, nous avons précisé les étapes de calcul du coefficient de résistance à l'écoulement C de Chézy et nous avons donné un exemple de calcul numérique.

CHAPITRE 3 VOIE EXPERIMENTAL

Introduction :

Rappelons tout d'abord les hypothèses de l'écoulement uniforme.

Dans un canal de pente constante et de section transversale invariable (canal cylindrique ou prismatique), l'écoulement est uniforme si :

la profondeur (maximale ou moyenne), la section mouillée, la vitesse moyenne restent constantes d'une section à l'autre du canal, la ligne de charge, la surface libre et le fond du canal sont parallèles, L'hypothèse de la constance des vitesses concerne bien l'égalité des vitesses moyennes d'une section à l'autre, mais dans une section la vitesse n'est pas obligatoirement constante d'un point à un autre. Souvent, on suppose que la distribution des vitesses est la même d'une section à l'autre, ou alors on néglige les effets de cette distribution. L'écoulement uniforme peut être laminaire ou turbulent: seul ce dernier cas est d'utilisation courante pour l'ingénieur.

L'écoulement uniforme au sens strict est très rare, mais certains écoulements dans des canaux artificiels peuvent être considérés comme tels. Par exemple, dans un canal artificiel de section et de pente constantes et à condition de se placer suffisamment loin de toute singularité comme le cas d'un canal rectangulaire, l'écoulement qui se présente est "à peu près uniforme". C'est souvent le cas dans les canaux d'irrigation, Même dans le cas de rivières naturelles (non strictement prismatiques), on peut utiliser de manière approximative certains résultats du mouvement uniforme, quand la ligne d'eau est sensiblement parallèle au fond.

Enfin, comme nous le verrons dans notre expérience, l'écoulement uniforme constitue toujours le régime de référence,

La formule de Chézy est la formule "historique" à laquelle la plupart des auteurs font référence, mais à laquelle les praticiens préfèrent des variantes plus précises ou mieux documentées.

Le principe de base de la formule repose sur un équilibre des forces en présence. Supposons un bief élémentaire de longueur dans lequel l'écoulement est uniforme.

Remarquons tout d'abord que le canal ou la rivière doivent être prismatique.

[POURQUOI : Parce que la constance de la profondeur et de la vitesse moyenne d'une section à l'autre ne se conçoit que si le cours d'eau est prismatique.]

L'étude se propose de déterminer par voie expérimentale le coefficient de Chézy dans un canal rectangulaire à fond lisse et rugueux à pente variable, écoulant un débit volume Q .

L'étude bibliographique montre que les principaux paramètres adimensionnel qui fait partie de l'étude et influençant le coefficient de Chézy dans un canal rectangulaire sont : le rayon hydraulique R_h , la pente considéré i , la hauteur moyenne de l'écoulement h , le coefficient de Manning n , la surface mouillée de l'écoulement A .

En outre, aucune étude n'est à signaler concernant l'influence de la rugosité du fond du canal sur les caractéristiques de ce type d'expérience.

L'objectif principal de cette étude est donc d'étudier la variation de coefficient de Chézy dans un canal rectangulaire à pente variable au fond lisse et au fond rugueux avec la variation de débit et de la pente au sien de notre laboratoire de mesure d'hydraulique, université de M'sila.

III-1- DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL :

III-1-1- Description du modèle :

Le banc d'essais expérimental est composé d'un canal de mesures hydraulique rectangulaire qui est un canal à pente variable, ses parois sont en Plexiglas transparentes permettent de visualiser l'écoulement sur toute la longueur de la veine , L'écoulement permanent dans le canal d'essais est assuré en circuit fermé. L'eau est aspirée d'un bassin d'alimentation par l'intermédiaire d'une pompe qui la refoule ensuite dans la conduite d'alimentation débouchant dans la boîte sous pression. Celle-ci alimente à son tour le canal et l'eau sortant de celui-ci est alors recueillie par le bassin d'alimentation raccordé à la pompe qui peut débiter jusqu'à $16 \text{ m}^3/\text{h}$.

Il s'agit d'un canal qui se compose de :

Une cuve d'alimentation en PVC, fixée sur un châssis en tubes d'acier protégé

Une pompe (débit : $16 \text{ m}^3/\text{h}$) , fixée sur le châssis.

Un débitmètre à lecture directe (flotteur) gamme de $1,6$ à $16 \text{ m}^3/\text{h}$.

Une vanne de réglage manuelle.

Un canal en 3 éléments, de longueur totale 6m et largeur de 75 mm et hauteur de 160 mm .

Un dispositif de réglage de l'inclinaison.

Un jeu de profils.

Un tube de Pitot.

Deux limnimétries à vernier

Une entretoise.



Photo 3,1 : Vue d'ensemble du canal d'essais.

III-1-2- Installation :

a- Implantation :

Installer le canal sans un local à l'abri des intempéries, sur une dalle plate.

La température de la salle doit être comprise entre 20C et 30C .

Afin d'éviter toutes déformations des tronçons dues aux variations de température , le canal ne doit pas être placé près d'une baie vitrée .

Prévoir une alimentation en eau pour le remplissage de la cuve , une vidange et une alimentation électrique 230v-50Hz-monophasé.

L'éclairage nécessaire dans le local d'utilisation est de 500 Lux minimum.

Aucune disposition particulière n'est à prendre concernant le bruit émis par l'appareil , celui-là restant inférieur à 50 dBA .

Aucune disposition particulière n'est à prendre concernant la zone d'utilisation : le ou les utilisateurs peuvent intervenir debout face à la zone d'intérêt.

b - Montage

Positionner la cuve d'alimentation .la mettre à niveau à l'aide des pieds réglables .

Assembler les 3 tronçons du canal selon les repères marqués sur les brides (au préalable , mettre un cordon de silicone pour l'étanchéité entre brides) .

Fixer sur la cuve d'alimentation le coté du canal muni d'une articulation (coté vanne guillotine) –repère A- .

Fixer le dispositif d'inclinaison sur le tronçon ,coté bec de canard-repère C- .

Fixer le câble de réglage de la flexion du canal entre le système d'inclinaison et le châssis cuve.

Monter les tuyauteries sous le canal , monter la manchette souple .

L'ensemble est prêt pour la mise en service !

c - Mise en service :

Brancher la pompe (prise 220 mono) ,

Remplir d'eau la cuve d'alimentation , 200 mm au-dessous du bord supérieur , mettre en route la pompe vanne fermée,

Ouvrir progressivement la vanne pour remplir les ci et le canal,

Régler la vanne de sortie pour maintenir un niveau dans le canal , réduire le débit au minimum,

Mettre le canal de niveau :

A l'aide de 2 limnimètres placés à l'amont et à l'aval du canal ,régler le niveau d'eau dans le canal étant horizontal , repositionner la réglette graduée à zéro, en utilisant les lumières prévues à cet effet sur le châssis,

Déplacer les limnimètres pour contrôler la flexion ; si le niveau est plus haut dans le milieu du canal , tendre le câble pour régler la flexion .

Lorsque toutes ces opérations ont été effectuées avec succès, le canal d'essais est prêt à fonctionner !

III-2- MANIPULATIONS

Vérification de la formule de Manning et détermination du coefficient de Manning et Chézy dans un canal au fond lisse et au fond rugueux

On vous demande de calculer le coefficient de Manning et coefficient de Chézy (coefficient de rugosité du canal) et de vérifier la formule de Manning. Pour cela on utilisera 4 pentes (i_1, i_2, i_3, i_4). Utiliser la gamme complète des pentes possibles sur le canal mais n'utilisez pas de pente nulle ou négative puisque l'écoulement uniforme y est impossible !

Après avoir réglé le canal à une pente donnée, on prend des mesures de profondeur le long du canal à différentes positions suffisamment loin en amont de la sortie (ou l'écoulement est à la profondeur critique) pour déterminer la profondeur moyenne du canal ,la mesure de la profondeur moyenne est donnée en retranchant la valeur lue sur le vernier à la profondeur du canal à vide, soit 160mm, le coefficient de frottement C est calculée à partir de la loi de Chézy qui est la formule de Manning- Strickler ainsi que le coefficient de Manning.

On procéde de même pour la mesure du coefficient de frottement avec le fond rugueux , en prend soin de l'introduire par l'extrémité aval du canal afin d'éviter de rayer les parois, l'épaisseur du support ou sont collés les grains de sable est de 2mm, elle doit être retranchée à la mesure de profondeur .

Pour chacune des pentes répétez les opérations suivantes:

- * Sélectionner une pente.
- * Fixer et lire un débit .
- * Mesurer la profondeur moyenne d'écoulement (y_n) .
- * Répéter ces opérations pour 3 valeurs du débit.

Vous avez donc 4 mesures de débit et de profondeur à prendre pour 4 pentes différentes.

III-3- INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS :

Calcul du coefficient de Chézy pour les deux essais

* Pour les résultats de quatre différentes pentes , calculez le coefficient de Chézy expérimental dans un canal à fond lisse .

* Pour les résultats de quatre différentes pentes, calculez le coefficient de Chézy expérimental dans un canal à fond rugueux .

III-4- DESCRIPTION DES ESSAIS :

L'étude expérimentale s'est intéressée au variation de coefficient de Chézy dans le canal à fond lisse et à fond rugueux ci-dessus décrit.

L'expérimentation a été menée sous quatre pentes initiales :

$i=1\%$, $i=2\%$ et $i=3\%$, $i=4\%$. Une large gamme des valeurs d'hauteurs a été ainsi obtenue,

Des seuils de différentes débit Q ont été testés, afin d'observer leur influence sur la variation de profondeur d'écoulement et également sur le coefficient de Chézy .

Pour chaque valeur des paramètres y_n , i l'augmentation du débit volume Q_i provoque la variation de coefficient de Chézy (figure 4,1) et (figure 4,2) ,Le couple de valeur (Q, y_n) a permis en outre le calcul du coefficient de Chézy par la relation de Manning –Strickler :

$$Q = \frac{1}{n} R_h^{(2/3)} i^{1/2} A \quad (3,1)$$

Et on peut conclure que :

$$n = Q^{-1} R_h^{(2/3)} i^{1/2} A \quad (3,2)$$

Et d'après le formule de Chézy :

$$Q = C \sqrt{R_h} J A \quad (3,3)$$

Et il apparait clairement que :

$$V = C \sqrt{R_h} J \quad (3,4)$$

En comparant la formule de Manning – Strickler, à celle de Chézy, on peut

$$\text{écrire : } C = \frac{1}{n} R_h^{1/6} \quad (3,5)$$

Où :

l'aire de la section mouillée A et le périmètre mouillé P s'écrivent respectivement :

$$A = b y_n = 0,075 y_n \quad (3,6)$$

Où b est la largeur du canal et y_n est la profondeur moyenne de l'écoulement

$$P = b + 2 y_n = 0,075 + 2h \quad (3.7)$$

ET : $y_n = h = H - h_{\text{mesurée}}$, Où :

H : la profondeur totale du canal qui 160 mm ,

$h_{\text{mesurée}}$: c'est le profondeur d'eau mesurée par le limnimètre .

A partir des relations (4.5) et (4.6), nous pouvons écrire que le rayon hydraulique

$$R_h = A / P$$

est :

$$R_h = \frac{b y_n}{b + 2 y_n} \quad (3.8)$$

La relation peut également s'écrire :

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{b y_n}{b + 2 y_n} = \frac{0,075 y_n}{0,075(1 + 2 y_n)} = \frac{y_n}{(1 + \frac{2 y_n}{0,075})} \quad (4,7)$$

Les paramètres sans dimension :

$$F = \sqrt{\frac{Q^2 L}{g S^3}} \quad (3,9)$$

, appelé nombre de Froude .il s'écrit aussi :

$$F = \frac{V}{\sqrt{g y_n}} \quad (3,10)$$

,où :

$y_n = \frac{S}{b}$ est le tirant d'eau moyen dans la section , g : le pesanteur = 9,81 m/s²,

V : la vitesse m/s

Le nombre de Froude est un nombre sans dimension dont le carré représente le rapport de l'énergie cinétique du liquide en mouvement à l'énergie potentielle de la pesanteur . il a un rôle tout à fait fondamental pour caractériser les écoulements soit fluvial ou torrentiel.

En section rectangulaire, $S = b \cdot y_n$, D'où $F = \frac{V}{\sqrt{g y_n}}$.

Lorsque $F < 1$ (ou lorsque $h > y_c$) le régime est dit fluvial.

Lorsque $F > 1$ (ou lorsque $h < y_c$) le régime est dit torrentiel.

$$\text{Le nombre de Reynolds : } R = \frac{4 Q}{P \nu} \quad (3,11)$$

, où : Q : le débit d'écoulement en ($\frac{m^3}{s}$)

P : le périmètre mouillée en (m)

ν : c'est la viscosité cinématique du liquide en écoulement $=10^{-6} \left(\frac{m^2}{s}\right)$



Photo 3,2 : l'écoulement évoluant dans un canal rectangulaire à pente variable à fond lisse . Vue de l'amont.



Photo 3.3 : l'écoulement évoluant dans un canal rectangulaire à pente variable à fond rugueux. Vue de l'aval .

III-4-1- Essais 1 détermination de coefficient de Chézy dans un canal rectangulaire à fond lisse :

a- RÉSULTATS ET DISCUSSION

Canal est initialement lisse, on prend le canal sans rugosité (fond lisse)

l'augmentation du débit pour chaque pente testé, mène à une augmentation de la profondeur d'eau h , et Donc, augmentation dans la vitesse V . il aura un changement dans le régime d'écoulement traduit par le nombre de Froude.

Les figures 4.3, 4.4, 4.5 et 4.6 représentent une illustration de la variation de vitesse en tant que fonction du paramètre $\sqrt{R_h i}$ pour les quatre pentes testés.

Quatre nuages distincts de points sont perceptibles; Chacun correspond à une pente relatif i .

Dans ces figures, Pour chaque cas de ces quatre pentes relatifs, on peut voir cela,

Augmentation de la paramètre $\sqrt{R_h i}$ Causes d'augmentation dans la vitesse d'écoulement $V(m/s)$.

Les résultats expérimentaux sont introduits sous formes des tableaux comme suite :

Tableau 3.1 : valeur de C Pour une pente $i=1\%$

$Q(m^3/h)$	$Q(m^3/s)$	$y_n (m)$	$A(m^2)$	$P(m)$	$V(m/s)$	F	$R_h(m)$	c
2	0,00056	0,014	0,00105	0,103	0,534	1,443	0,0102	53,45
3	0,00084	0,0179	0,00134	0,1108	0,626	1,494	0,0121	57,64
4	0,0012	0,0207	0,00155	0,1164	0,774	1,720	0,0133	67,51
5	0,001 39	0,0243	0,00182	0,1236	0,763	1,563	0,0147	63,36

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Vitesse d'écoulement V en fonction du paramètre $\sqrt{R_h i}$

La figure 3.1 montre la corrélation entre la vitesse $V=Q/S$ et le paramètre $\sqrt{R_h i}$ dont la pente est le coefficient C de Chézy .

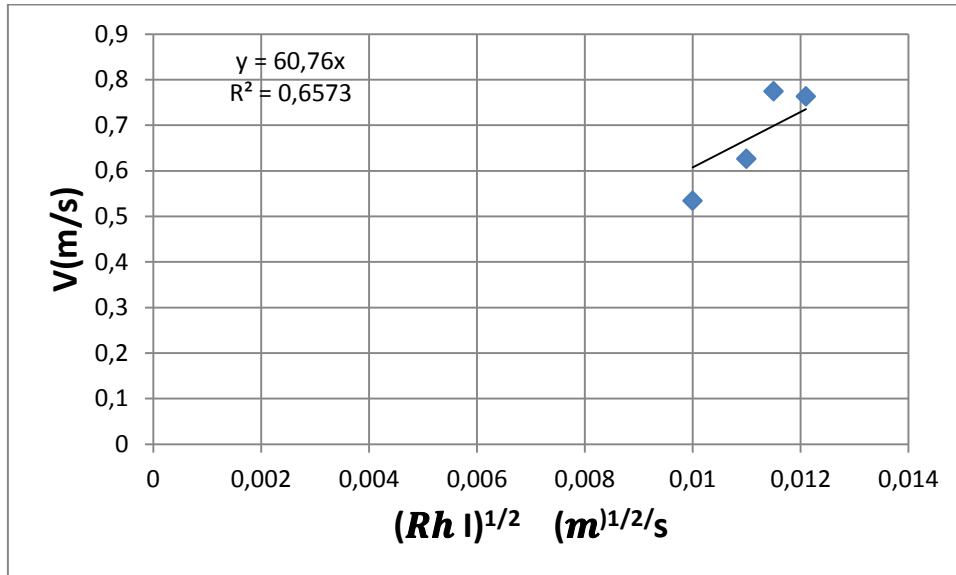


Figure 3.1 : Variation de Vf ($\sqrt{R_h i}$). Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond lisse .

Tableau 3.2 : valeur de C Pour une pente $i=2\%$

Q(m ³ /h)	Q(m ³ /s)	y _n (m)	A(m ²)	P(m)	V(m/s)	F	R _h (m)	C
2	0,00056	0,0107	0,0008	0,0964	0,700	2,167	0,008	56,52
3	0,00084	0,0141	0,0011	0,103	0,763	2,056	0,010	55,17
4	0,0012	0,0170	0,0012	0,109	1,000	2,450	0,011	68,24
5	0,00139	0,0202	0,0015	0,1154	0,927	2,083	0,013	58,34

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX :

Vitesse d'écoulement V en fonction du paramètre $\sqrt{R_h i}$

La figure 3.2 montre la corrélation entre la vitesse $V=Q/S$ et le paramètre $\sqrt{R_h i}$ dont la pente est le coefficient C de Chézy .

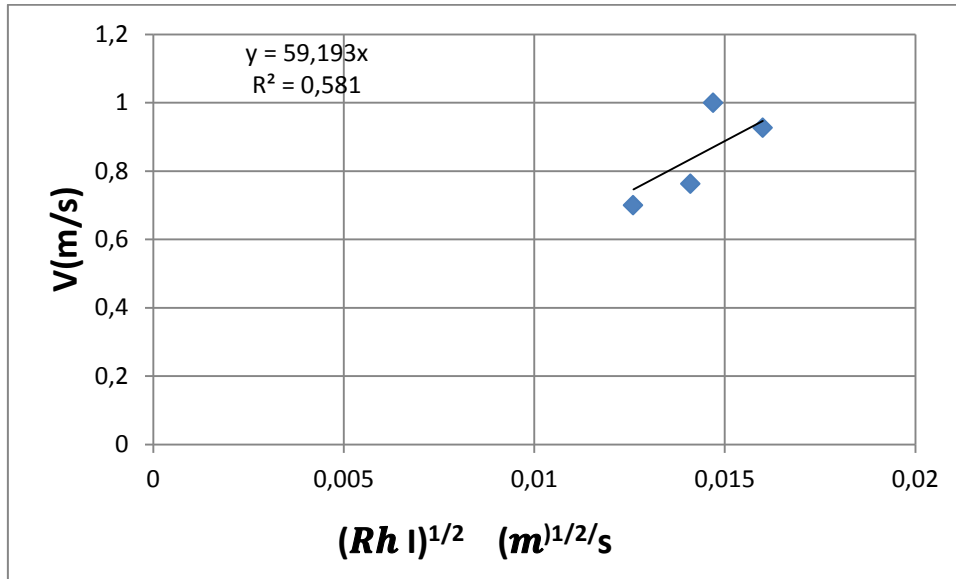


Figure 3.2 : Variation de Vf ($\sqrt{R_h i}$). Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond lisse.

Tableau 3.3 : valeur de C Pour une pente $i= 3\%$

Q(m ³ /h)	Q(m ³ /s)	y _n (m)	A(m ²)	P(m)	V(m/s)	F	R _h (m)	c
2	0,00056	0,0098	0,00074	0,0946	0,756	2,438	0,0078	49,401
3	0,00084	0,012	0,0009	0,0990	0,934	2,723	0,0091	57,026
4	0,0012	0,0147	0,0011	0,1044	1,090	2,875	0,0105	58,405
5	0,00139	0,0172	0,00129	0,1094	1,077	2,626	0,0117	58,735

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Vitesse d'écoulement V en fonction du paramètre $\sqrt{R_h i}$

La figure 3.3 montre la corrélation entre la vitesse $V=Q/S$ et le paramètre $\sqrt{R_h i}$ dont la pente est le coefficient C de Chézy .

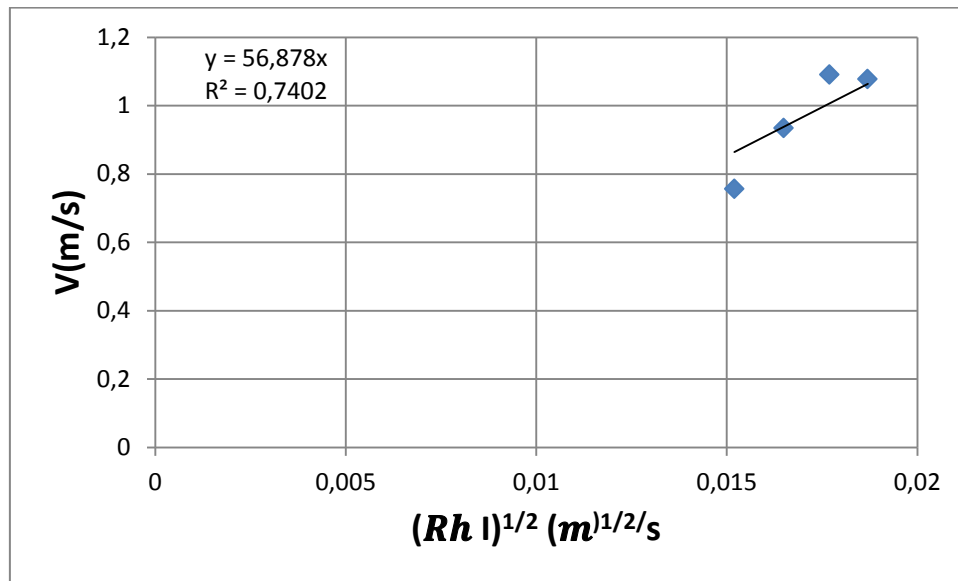


Figure 3.3 : Variation de Vf ($\sqrt{R_h i}$). Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond lisse.

Tableau 3.4 : valeur de C Pour $i= 4\%$

Q(m ³ /h)	Q(m ³ /s)	h(m)	A(m ²)	P(m)	V(m/s)	F	R _h (m)	C(m ^{1/2} /S)
2	0,00056	0,0087	0,00065	0,0924	0,861	2,948	0,0070	51,98
3	0,00084	0,011	0,00083	0,0997	1,012	3,085	0,0083	56,87
4	0,0012	0,0133	0,00100	0,1016	0,090	0,249	0,0098	61,58
5	0,00139	0,0153	0,00115	0,1056	1,208	3,121	0,0109	58,77

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Vitesse d'écoulement V en fonction du paramètre $\sqrt{R_h i}$

La figure 3.4 montre la corrélation entre la vitesse $V=Q/S$ et le paramètre $\sqrt{R_h i}$ dont la pente est le coefficient C de Chézy .

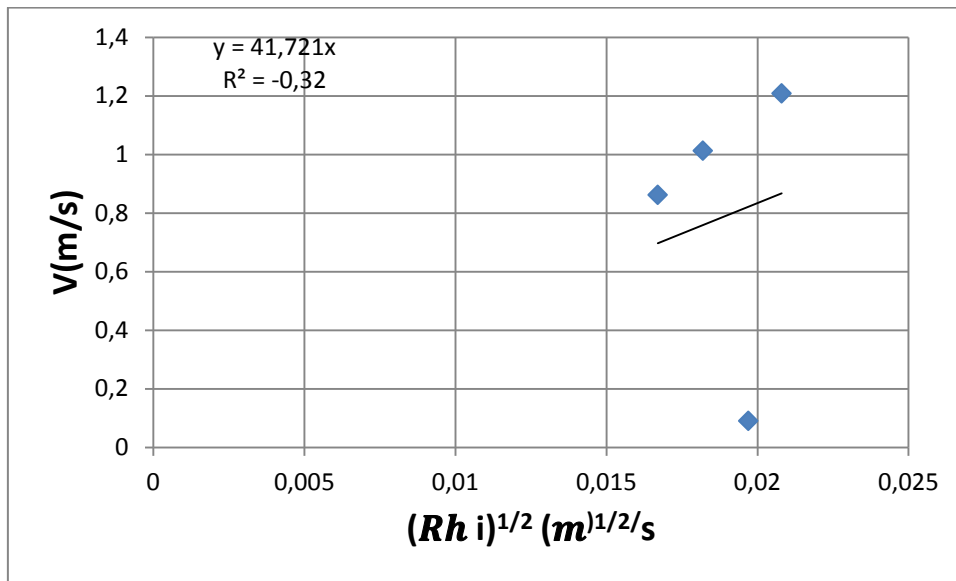


Figure 3.4 : Variation de Vf ($\sqrt{R_h i}$). Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond lisse.

En outre, l'analyse statistique des données des résultats expérimentaux par la méthode des moindres carrés non linéaires a montré que;

Pour chaque pente relative testée, la vitesse d'écoulement est en fonction du paramètre $\sqrt{R_h i}$ selon l'équation suivante : $v = \alpha \sqrt{R_h i}$ (3,12)

Ou : $\alpha = C$, C: coefficient de Chézy

Le tableau 3.5 contient des valeurs du coefficient α , ainsi que le coefficient de détermination R^2 résulte de Ajustement fait.

Tableau 3.5: Coefficient α Valeurs dans la relation (4,9)

i	C	R^2
1	60,76	0,6573
2	59,193	0,5810
3	56,878	0,7402
4	41,721	0,320

Le tableau 3.5 montre que le coefficient C, décroissant avec l'augmentation du pente relatif, et la variation C (i) est représentée graphiquement dans la figure 3.5 .

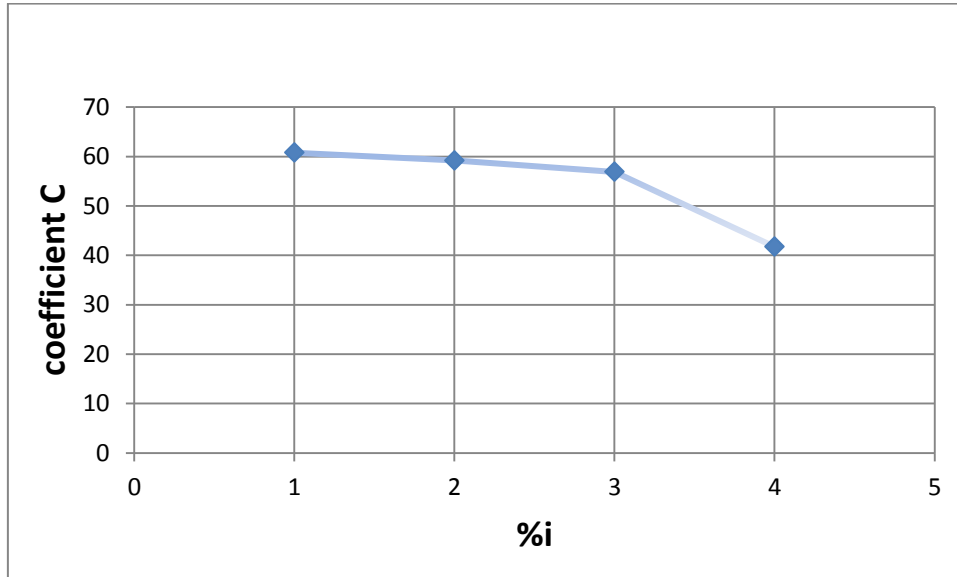


Figure 3.5 : La variation du Coefficient C dans l'équation (14) selon la pente relative i

D'après le tableau 4.5 qui regroupe les résultats expérimentaux de coefficient de Chézy il apparait qu'une diminution de coefficient de Chézy avec l'accroissement de la pente I, cette explication a été illustré sur la figure 3.5.

b – Exemple 01 de calcul du coefficient C de Chézy pour ($\epsilon / b = 0$) :

On souhaite calculer la valeur du coefficient C de Chézy pour le cas d'un canal Rectangulaire au fond lisse ($\epsilon / b = 0$), on prend par exemple les résultats du tableau 3,1 pour le débit $0,00056 \text{ m}^3/\text{s}$, connaissant les données suivantes :

$$Q = 0,00056 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, b = 0,075\text{m}, \epsilon = 0\text{m}, i = 0,01, \nu = 10^{-6}/\text{s}$$

* On calcule la conductivité relative Q_h^* telle que :

$$Q_h^* = Q/\sqrt{gib^5} = 3,861/\sqrt{9,81 \times 0,01 \times 0,075^5} = 0,02393162$$

On peut constater que $Q_h^* < 6\sqrt{3} = 10,3923048$.

* Conformément à la relation (2.64), le discriminant Δ de l'équation de troisième

degré (3.61) est positif. Le paramètre de forme $\bar{\eta}_0$ est donc régi par la relation (2.67). Soit :

$$\bar{\eta}_0 = \left(\frac{Q_b^{*2}}{256}\right)^{1/3} \left[\left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}}\right)^{1/3} + \left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}}\right)^{1/3} \right]$$

$$= \left(\frac{1,160648^2}{256}\right)^{1/3} \times \left[\left(1 + \sqrt{1 - \frac{1,160648^2}{108}}\right)^{1/3} + \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1,160648^2}{108}}\right)^{1/3} \right]$$

$$= 0,424732087$$

* Avec la valeur ainsi calculée du paramètre de forme $\bar{\eta}_0$, les caractéristiques

hydrauliques du modèle rugueux sont :

L'Aire de la section mouillée \bar{A} , donnée par la relation (2.68). Soit :

$$\bar{A} = b^2 \bar{\eta}_0 = 0,075^2 \times 0,424732087 = 0,002389117 \text{ m}^3$$

Le périmètre mouillé \bar{P} , donné par la relation (2.69). Soit :

$$\bar{P} = b(1 + 2\bar{\eta}_0) = 0,075 \times (1 + 2 \times 0,424732087) = 0,138709813 \text{ m}$$

Le diamètre hydraulique h D, donné par la relation (2.70). Soit :

$$\bar{D}_h = 4 \bar{A} / \bar{P} = 4 \times 0,002389117 / 0,138709813 = 0,017223849 \text{ m}$$

Le nombre de Reynolds R, donné par la relation (2.71). Soit :

$$\bar{R} = \frac{4Q}{Pv} = \frac{4 \times 0,00056}{0,138709813 \times 10^{-6}} = 16231,188406$$

* Les caractéristiques hydrauliques du modèle rugueux ainsi calculées permettent de déterminer le facteur de correction des dimensions linéaires Ψ , selon la relation (2.72). Soit :

$$\Psi = 1,35 \left[-1 \log \left(\frac{\varepsilon / \bar{D}_h}{4,75} + \frac{8,5}{\bar{R}} \right) \right]^{-2/5}$$

$$= 1,35 \times \left[-\log \left(\frac{0,017223849}{4,75} + \frac{8,5}{16231,188406} \right) \right]^{-2/5} = 0,839334179$$

* Affectons au modèle rugueux la nouvelle dimension linéaire suivante :

$$\bar{b} = b / \Psi = 0,075 / 0,839334179 = 0,089356542 \text{ m}$$

* Avec cette nouvelle dimension linéaire, calculons la conductivité relative selon la relation (2.73). Soit :

$$Q_b^* = \frac{Q}{\sqrt{g_i(b/\Psi)^5}} = \frac{0,00056}{\sqrt{9,81 \times 0,01 \times 0,089356542^5}} = 0,749096736$$

* Nous pouvons constater que la valeur de la conductivité relative ainsi calculée

est inférieure à $6\sqrt{3} = 10,3923048$. Ceci permet de conclure que le paramètre de

forme $\bar{\eta}_0$ est régi par la relation (2.36). Soit :

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_0 &= \left(\frac{Q_b^*}{256} \right)^{1/3} \left[\left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}} \right)^{1/3} + \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}} \right)^{1/3} \right] \\ &= \left(\frac{0,749096736^2}{256} \right)^{1/3} \left[\left(1 + \sqrt{1 - \frac{0,749096736^2}{108}} \right)^{1/3} + \left(1 - \sqrt{1 - \frac{0,749096736^2}{108}} \right)^{1/3} \right] \\ &= 0,31555292 \end{aligned}$$

Cette valeur calculée du paramètre de forme $\bar{\eta}_0$ correspond exactement au paramètre de forme η_0 de l'écoulement dans le canal rectangulaire étudié. Soit :

$$\eta_0 = y_n / b = 0,31555292$$

* Le paramètre de forme $\eta = b / y_n$ est donc :

$$\eta = \frac{1}{\eta_0} = \frac{1}{0,31555292} = 3,169040553$$

* Selon la relation (2.40), la fonction $\varphi(\eta)$ est telle que :

$$\varphi(\eta) = \frac{32\sqrt{2}}{(\eta+2)^{3/2}} = \frac{32\sqrt{2}}{(3,169040553+2)^{3/2}} = 3,850792054$$

* La valeur de la rugosité relative ε / b est :

$$\varepsilon / b = 0,0 / 0,075 = 0,00$$

* La valeur du nombre de Reynolds modifié R^* est, selon la relation (2.41) :

$$R^* = \frac{\sqrt{g_i b^3}}{v} = \frac{\sqrt{9,81 \times 0,01 \times 0,075^3}}{10^{-6}} = 23490,68965$$

* Finalement, la valeur recherchée du coefficient C de Chézy est, selon la relation

(2.48) :

$$C = -4\sqrt{2g} \log \left[\frac{\varepsilon/b}{1,165[\varphi(\eta)]^{2/3}} + \frac{10,04}{R^*\varphi(\eta)} \right]$$

$$= -4 \times \sqrt{2 \times 9,81} \times \log \left[\frac{0,00}{1,165 \times 3,850792054^{2/3}} + \frac{10,04}{23490,68965 \times 3,850792054} \right]$$

$$= 53,36874969 \approx 53,4 m^{1/2}/S$$

* Vérifions la valeur ainsi calculée de C par celle issue de la MMR. Selon la MMR, le coefficient C de Chézy est donné par la relation suivante de Achour :

$$C = \frac{8\sqrt{2g}}{\Psi^{5/2}} \quad (2,76)$$

Le facteur de correction des dimensions linéaires Ψ a été calculé à l'étape 4 et

$$\text{vaut : } \Psi = 0,839334179$$

Le coefficient C de Chézy est par suite, selon la relation (2.76) :

$$C = \frac{8\sqrt{2g}}{\Psi^{5/2}} = \frac{8 \times \sqrt{2 \times 9,81}}{0,839334179^{5/2}} = 53,16232442 m^{0,5}/s \approx 53,2 m^{0,5}/s$$

Ainsi, nous pouvons constater que l'écart relatif entre les valeurs de C calculées selon la méthode que nous avons présentée et la MMR est de :

$$\frac{\Delta C}{C} = 100 \times \frac{(53,36874969 - 53,16232442)}{53,36874969} = 0,37\%$$

Nous pouvons alors conclure, tenant compte du faible écart relatif obtenu, que les deux méthodes aboutissent pratiquement au même résultat.

Vérifions la valeur ainsi calculée de C par MMR par celle issue de la comparaison entre Chézy et Manning . Selon Chézy et Manning ,

le coefficient C de Chézy est donné par la relation suivante :

$$C = \frac{1}{n} R_h^{1/6} \quad (3,5)$$

Le coefficient C a été calculée d'après le tableaux 4.1 et le résultat come suite :

$$C = 53,45 m^{1/2}/S$$

Ainsi, nous pouvons constater que l'écart relatif entre les valeurs de C calculées selon la méthode que nous avons présentée et la MMR est de :

$$\frac{\Delta C}{C} = 100 \times \frac{(53,45 - 53,16232442)}{53,45} = 0,54\%$$

Nous pouvons alors conclure, tenant compte du faible écart relatif obtenu, que les deux méthodes aboutissent pratiquement au même résultat

Donc ,On conclut finalement que tous les trois méthodes aboutissent les mêmes résultats.

cet écart représente la différence entre les résultats obtenus par ces méthodes utilisant les valeurs expérimentaux obtenus par les essais au laboratoire .

cet écart représente les erreurs systématiques de la manipulation de essais .

III-4-2- Essais 2 détermination de coefficient de Chézy dans un canal rectangulaire à fond rugueux :

a- Rugosité artificielle du canal d'essais :

Le fond plat du canal d'essais a été testé sous une rugosité artificielle Equivalente 4,5 de mm, soigneusement répartie de manière uniforme le long du canal. Cette rugosité a été obtenue en respectant les étapes suivantes :

Un tamisage de sable ou de gravier de granulométrie différente est effectué au moyen d'un tamiseur électrique. Celui-ci est composé de plusieurs tamis de différents diamètres normalisés variant entre 1 et 8mm. Les temps de tamisage, dépendant de la gamme de gravier à tamiser, ont été fixés à moins de 5 minutes.

Après l'obtention de la gamme voulue de gravier, ce dernier est lavé puis séché. La gamme choisie varie entre 4 et 5 mm selon le refus du tamis normalisé. Les particules obtenues sont ensuite uniformément réparties sur une toile en plastique, puis soigneusement collées au moyen d'une colle forte.



Photo 3.4 : Echantillon de grains de gravier de rugosité équivalente $\varepsilon = 4,5\text{mm}$.

La figure 4.9 montre le résultat final obtenu sur le fond plat du Profil en vue testé par le procédé ci-dessus décrit.

Effet de la rugosité sur l'écoulement à surface libre dans un canal rectangulaire à pente variable .



Photo 3.5 : Grains de gravier uniformément répartis sur le fond plat du canal rectangulaire à pente variable testé .

b- RÉSULTATS ET DISCUSSION

La modification du fond du canal conduit à changer partiellement la section transversale du flux, par conséquent modifier la vitesse, la hauteur de l'eau et le coefficient de résistance à l'écoulement .

Ce phénomène entraîne une résistance qui Pourrait ralentir le bon drainage de l'eau dans les canaux artificiels et naturels.

En effet, si on prend le canal avec rugosité artificiel l'augmentation du débit croissant, mène à une augmentation de la profondeur d'eau h , et Donc, augmentation dans la vitesse V .

En outre, l'existence de la rugosité artificiel testé modifie la rugosité initiale. Les figures 1,2,3 et 4 représentent une illustration de la variation de vitesse en tant que Fonction du paramètre $\sqrt{R_{hi}}$ pour les quatre pentes testés.

Quatre nuages distincts de points sont perceptibles; Chacun correspond à une pente I .

Dans ces graphiques; Pour chaque cas de ces quatre pentes, on peut voir cela; Augmentation de la paramètre $\sqrt{R_h i}$ Causes d'augmentation dans la vitesse d'écoulement V(m/s).

Les résultats expérimentaux sont introduits sous formes des tableaux comme suite :

Tableau 3.6 : valeurs de C Pour une pente i=1 %

Q(m ³ /h)	Q(m ³ /s)	y _n (m)	A(m ²)	P(m)	V(m/s)	F	R _h (m)	c
2	0,00056	0,0197	0,00147	0,1144	0,343	0,781	0,0128	34,25
3	0,00084	0,0246	0,00184	0,1242	0,420	0,855	0,0148	38,06
4	0,0012	0,0284	0,00213	0,1318	0,521	0,988	0,0161	45,20
5	0,00139	0,0314	0,00235	0,1378	0,553	0,996	0,0170	46,03

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX :

Vitesse d'écoulement V en fonction du paramètre $\sqrt{R_h i}$

La figure 3.6 montre la corrélation entre la vitesse $V=Q/S$ et le paramètre $\sqrt{R_h i}$ dont la pente est le coefficient C de Chézy . ce coefficient a une valeur comprise entre 34 et 46 m^{1/2}/s.

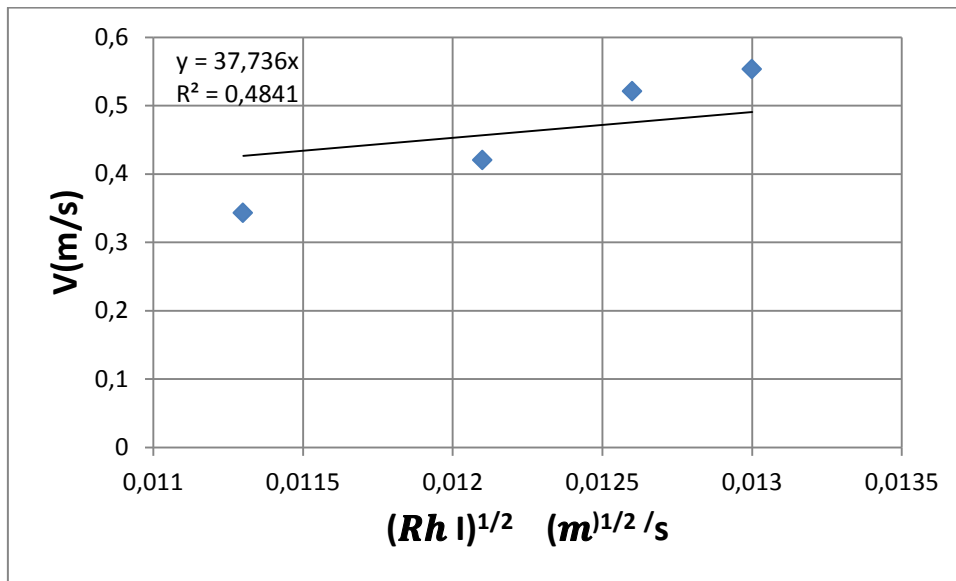


Figure 3.6 : Variation de Vf ($\sqrt{R_h i}$). Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond rugueux.

Tableau 3.7 : valeur de C Pour une pente i=2%

Q(m ³ /h)	Q(m ³ /s)	h(m)	A(m ²)	P(m)	V(m/s)	F	R _h (m)	C
2	0,00056	0,0172	0,00129	0,1094	0,540	1,317	0,0117	29,009
3	0,00084	0,0212	0,00159	0,1174	0,626	1,372	0,0135	32,702
4	0,0012	0,0245	0,00183	0,1240	0,774	1,579	0,0147	38,916
5	0,00139	0,0280	0,00210	0,1310	0,763	1,456	0,0160	37,690

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Vitesse d'écoulement V en fonction du paramètre $\sqrt{R_h i}$

La figure 3.7 montre la corrélation entre la vitesse $V=Q/S$ et le paramètre $\sqrt{R_h i}$ dont la pente est le coefficient C de Chézy . ce coefficient a une valeur comprise entre 29 et 38 m^{1/2}/s.

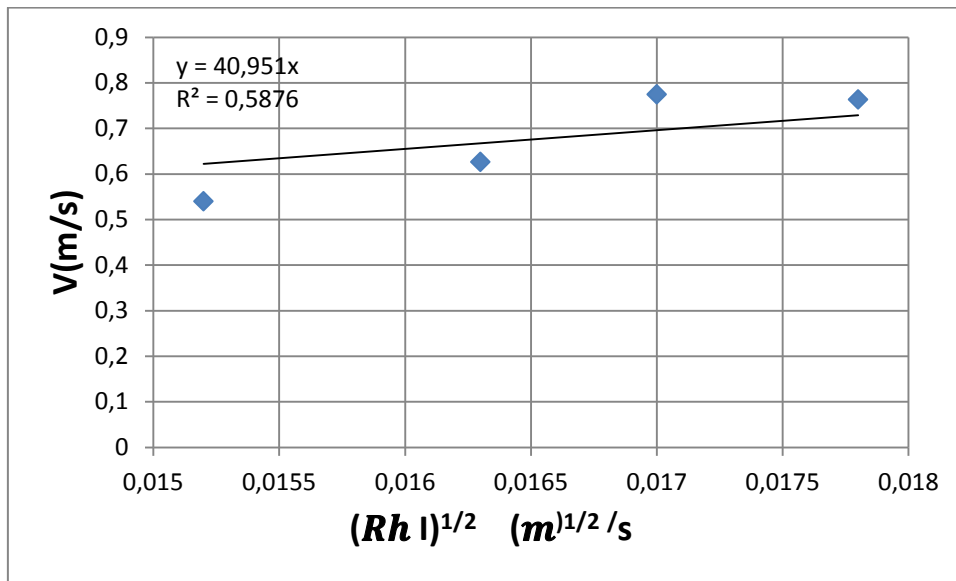


Figure 3.7 : Variation de Vf ($\sqrt{R_h i}$). Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond rugueux.

Tableau 3.8 : valeur de C Pour une pente $i=3\%$

Q(m ³ /h)	Q(m ³ /s)	h(m)	A(m ²)	P(m)	V(m/s)	F	R _h (m)	C
2	0,00056	0,0158	0,00118	0,1066	0,540	1,374	0,0110	26,60
3	0,00084	0,0193	0,00144	0,1136	0,626	1,439	0,0126	30,48
4	0,0012	0,0218	0,00163	0,1186	0,774	1,675	0,0137	37,00
5	0,00139	0,0246	0,00184	0,1242	0,763	1,553	0,0148	36,38

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Vitesse d'écoulement V en fonction du paramètre $\sqrt{R_h i}$

La figure 3.8 montre la corrélation entre la vitesse $V=Q/S$ et le paramètre $\sqrt{R_h i}$ dont la pente est le coefficient C de Chézy . ce coefficient a une valeur comprise entre 26 et 37m^{1/2}/s.

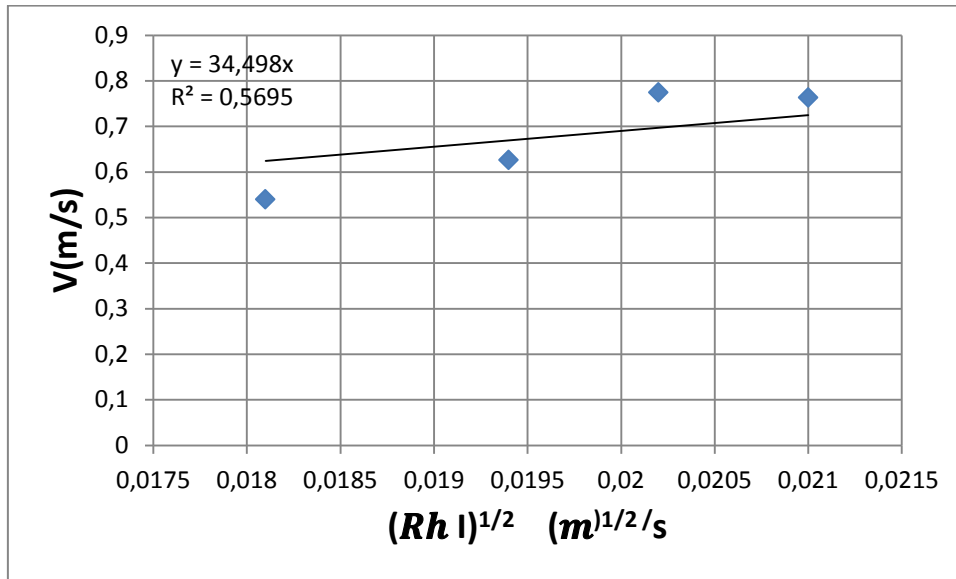


Figure 3.8 : Variation de Vf ($\sqrt{R_h i}$). Motifs : écoulement uniforme en canal à pente variable à fond rugueux.

Tableau 3.9 : valeur de C Pour une pente i=4%

Q(m ³ /h)	Q(m ³ /s)	h(m)	A(m ²)	P(m)	V(m/s)	F	R _h (m)	C
2	0,00056	0,0149	0,00111	0,1048	0,540	1,413	0,0104	25,08
3	0,00084	0,0176	0,00132	0,1102	0,626	1,508	0,0119	29,63
4	0,0012	0,0201	0,00150	0,1152	0,774	1,743	0,0130	07,12
5	0,00139	0,0224	0,00168	0,1198	0,763	1,630	0,0140	35,52

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Vitesse d'écoulement V en fonction du paramètre $\sqrt{R_h i}$

La figure 3.9 montre la corrélation entre la vitesse $V=Q/S$ et le paramètre $\sqrt{R_h i}$ dont la pente est le coefficient C de Chézy . ce coefficient a une valeur comprise entre 25 et 36m^{1/2}/s.

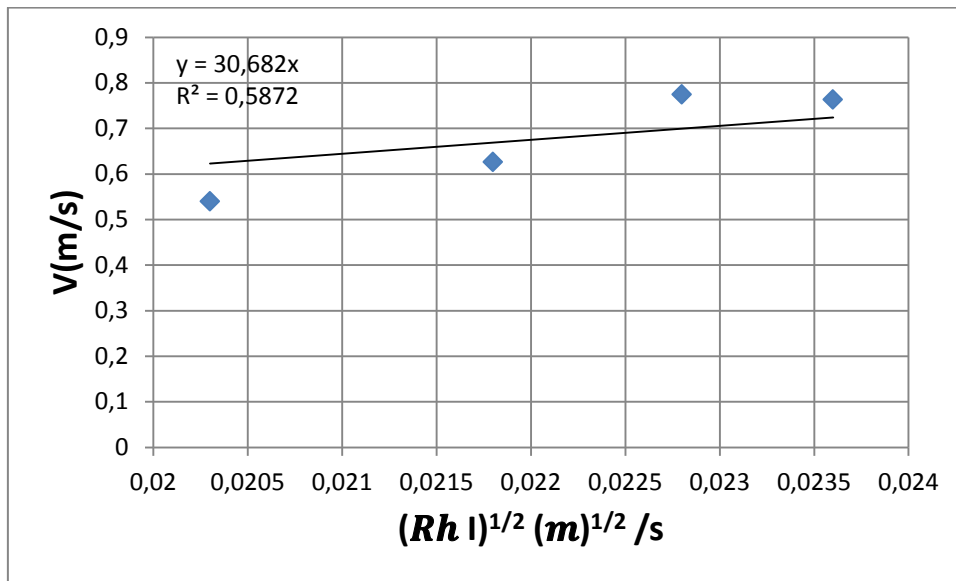


Figure 3.9 : Variation de Vf ($\sqrt{R_h i}$). Motifs: écoulement uniforme en canal à pente variable à fond rugueux.

En outre, l'analyse statistique des données des résultats expérimentaux par la méthode des moindres carrés non linéaires a montré que;

Pour chaque pente relative testée, la vitesse d'écoulement est en fonction du paramètre $\sqrt{R_h i}$ selon l'équation suivante : $v = \alpha \sqrt{R_h i}$ (3.13)

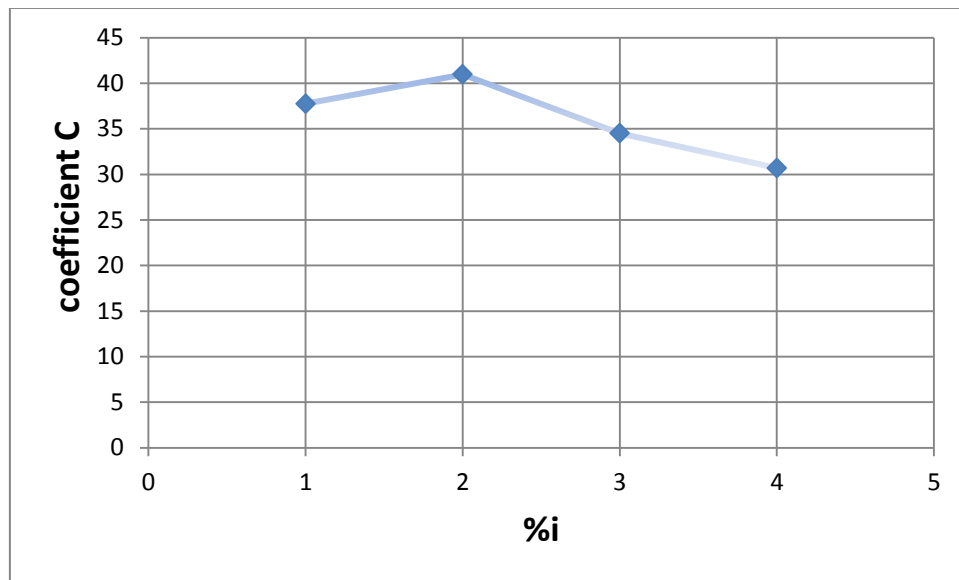
Ou : $\alpha = C$, C: coefficient de Chézy

Le tableau 3,10 contient des valeurs du coefficient α , ainsi que le coefficient de détermination R^2 résulte de Ajustement fait.

Tableau 3.10 : Coefficient α Valeurs dans la relation (4.10)

i	C	R ²
1	37,736	0,4841
2	40,951	0,5876
3	34,498	0,5695
4	30,682	0,5872

Le tableau 3.10 montre que le coefficient C, décroissant avec l'augmentation du pente relatif, et la variation C (I) est représentée graphiquement dans la figure 3.10.

**Figure 3.10 : La variation du Coefficient C dans l'équation (14) selon la pente i**

De même variation on voit que la diminution du valeur de coefficient de Chézy est en fonction de l'augmentation de la pente.

c- Exemple 02 de calcul du coefficient C de Chézy pour ($\epsilon / b = 0,034$):

On souhaite calculer la valeur du coefficient C de Chézy pour le cas d'un canal Rectangulaire au fond rugueux ($\epsilon / b = 0,034$), on prend par exemple les résultats du tableau 3,6 pour le débit $0,00056 \text{ m}^3/\text{s}$, connaissant les données suivantes :

$$Q = 0,00056 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, b = 0,075\text{m}, \epsilon = 0,0025\text{m}, i = 0,01, v = 10^{-6}/\text{s}$$

* On calcule la conductivité relative Q_h^* telle que :

$$Q_h^* = Q/\sqrt{gib^5} = 0,00056/\sqrt{9,81 \times 0,01 \times 0,075^5} = 0,02393162$$

On peut constater que $Q_h^* < 6\sqrt{3} = 10,3923048$.

* Conformément à la relation (2.64), le discriminant Δ de l'équation de troisième

degré (2.61) est positif. Le paramètre de forme $\bar{\eta}_0$ est donc régi par la relation (2.67). Soit :

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_0 &= \left(\frac{Q_b^{*2}}{256}\right)^{1/3} \left[\left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}}\right)^{1/3} + \left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}}\right)^{1/3} \right] \\ &= \left(\frac{0,02393162^2}{256}\right)^{1/3} \times \left[\left(1 + \sqrt{1 - \frac{0,02393162^2}{108}}\right)^{1/3} + \left(1 - \sqrt{1 - \frac{0,02393162^2}{108}}\right)^{1/3} \right] \\ &= 0,03035753 \end{aligned}$$

* Avec la valeur ainsi calculée du paramètre de forme $\bar{\eta}_0$, les caractéristiques

hydrauliques du modèle rugueux sont :

L'Aire de la section mouillée \bar{A} , donnée par la relation (2.68). Soit :

$$\bar{A} = b^2 \bar{\eta}_0 = 0,075^2 \times 0,03035753 = 0,000170761 \text{m}^2$$

Le périmètre mouillé \bar{P} , donné par la relation (2.69). Soit :

$$\bar{P} = b(1 + 2\bar{\eta}_0) = 0,075 \times (1 + 2 \times 0,03035753) = 0,079553629 \text{ m}$$

Le diamètre hydraulique $h D$, donné par la relation (2.70). Soit :

$$\bar{D}_h = 4 \bar{A} / \bar{P} = 4 \times 0,000170761 / 0,079553629 = 0,002146489 \text{ m}$$

Le nombre de Reynolds R , donné par la relation (2.71). Soit :

$$\bar{R} = \frac{4Q}{Pv} = \frac{4 \times 0,00056}{0,079553629 \times 10^{-6}} = 28354,43038$$

* Les caractéristiques hydrauliques du modèle rugueux ainsi calculées permettent de

déterminer le facteur de correction des dimensions linéaires Ψ , selon la relation (2.41). Soit :

$$\Psi = 1,35 \left[-\log \left(\frac{\varepsilon/\overline{D}_h}{4,75} + \frac{8,5}{\overline{R}} \right) \right]^{-2/5}$$

$$= 1,35 \times \left[-\log \left(\frac{0,0025/0,002146489}{4,75} + \frac{8,5}{28354,43038} \right) \right]^{-2/5} = 1,645188291$$

* Affectons au modèle rugueux la nouvelle dimension linéaire suivante :

$$\overline{b} = b / \Psi = 0,075 / 0,839334179 = 0,045587487 \text{ m}$$

* Avec cette nouvelle dimension linéaire, calculons la conductivité relative selon la relation (2.73). Soit :

$$Q_b^* = \frac{Q}{\sqrt{g_i(b/\Psi)^5}} = \frac{0,00056}{\sqrt{9,81 \times 0,01 \times 0,045587487^5}} = 4,029414728$$

* Nous pouvons constater que la valeur de la conductivité relative ainsi calculée

est inférieure à $6\sqrt{3} = 10,3923048$. Ceci permet de conclure que le paramètre de

forme $\overline{\eta}_0$ est régi par la relation (2.66). Soit :

$$\overline{\eta}_0 = \left(\frac{Q_b^*}{256} \right)^{1/3} \left[\left(1 + \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}} \right)^{1/3} + \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Q_b^{*2}}{108}} \right)^{1/3} \right]$$

$$= \left(\frac{4,029414728^2}{256} \right)^{1/3} \left[\left(1 + \sqrt{1 - \frac{4,029414728^2}{108}} \right)^{1/3} + \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4,029414728^2}{108}} \right)^{1/3} \right]$$

$$= 0,977736686$$

Cette valeur calculée du paramètre de forme $\overline{\eta}_0$ correspond exactement au paramètre de forme η_0 de l'écoulement dans le canal rectangulaire étudié. Soit :

$$\eta_0 = y_n/b = 0,977736686$$

* Le paramètre de forme $\eta = b/y_n$ est donc :

$$\eta = \frac{1}{\eta_0} = \frac{1}{0,977736686} = 1,022770255$$

* Selon la relation (2.40), la fonction $\varphi(\eta)$ est telle que :

$$\varphi(\eta) = \frac{32\sqrt{2}}{(\eta+2)^{3/2}} = \frac{32\sqrt{2}}{(1,022770255+2)^{3/2}} = 8,611072906$$

* La valeur de la rugosité relative ε / b est :

$$\varepsilon / b = 0,0025 / 0,075 = 0,034$$

- * La valeur du nombre de Reynolds modifié R^* est, selon la relation (2.41) :

$$R^* = \frac{\sqrt{gib^3}}{v} = \frac{\sqrt{9,81 \times 0,01 \times 0,075^3}}{10^{-6}} = 23490,68965$$

- * Finalement, la valeur recherchée du coefficient C de Chézy est, selon la relation (2.48) :

$$\begin{aligned} C &= -4\sqrt{2g} \log \left[\frac{\varepsilon/b}{1,165[\varphi(\eta)]^{2/3}} + \frac{10,04}{R^*\varphi(\eta)} \right] \\ &= -4 \times \sqrt{2 \times 9,81} \times \log \left[\frac{0,034}{1,165 \times 8,611072906^{2/3}} + \frac{10,04}{23490,68965 \times 8,611072906} \right] \\ &= 34,43890526 \approx 34,4 m^{1/2}/S \end{aligned}$$

- * Vérifions la valeur ainsi calculée de C par celle issue de la MMR. Selon la MMR, le coefficient C de Chézy est donné par la relation suivante de Achour :

$$C = \frac{8\sqrt{2g}}{\Psi^{5/2}} \quad (2,76)$$

Le facteur de correction des dimensions linéaires Ψ a été calculé à l'étape précédant et vaut : $\Psi = 1,645188291$

Le coefficient C de Chézy est par suite, selon la relation (2.76) :

$$C = \frac{8\sqrt{2g}}{\Psi^{5/2}} = \frac{8 \times \sqrt{2 \times 9,81}}{1,645188291^{5/2}} = 34,16342442 m^{0,5}/s \approx 53,2 m^{0,5}/s$$

Ainsi, nous pouvons constater que l'écart relatif entre les valeurs de C calculées selon la méthode que nous avons présentée et la MMR est de :

$$\frac{\Delta C}{C} = 100 \times \frac{(34,43890526 - 34,16342442)}{34,43890526} = 0,79 \%$$

Nous pouvons alors conclure, tenant compte du faible écart relatif obtenu, que les

deux méthodes aboutissent pratiquement au même résultat.

Vérifions la valeur ainsi calculée de C par MMR par celle issue de la comparaison entre Chézy et Manning . Selon Chézy et Manning ,

le coefficient C de Chézy est donné par la relation suivante :

$$C = \frac{1}{n} R_h^{1/6} \quad (3,5)$$

Le coefficient C a été calculée d'après le tableaux 3.6 et le résultat come suite :

$$C = 34,25 m^{1/2}/S$$

Ainsi, nous pouvons constater que l'écart relatif entre les valeurs de C calculées selon la méthode que nous avons présentée et la MMR est de :

$$\frac{\Delta C}{C} = 100 \times \frac{(34,25 - 34,16342442)}{34,25} = 0,97 \%$$

Nous pouvons alors conclure, tenant compte du faible écart relatif obtenu, que les deux méthodes aboutissent pratiquement au même résultat. Donc, On conclut finalement que tous les trois méthodes aboutissent les mêmes résultats. cet écart représente la différence entre les résultats obtenus par ces méthodes utilisant les valeurs expérimentaux obtenus par les essais au laboratoire. cet écart représente les erreurs systématiques de la manipulation de essais.

III-5- Exemple 03 de calcul de coefficient de Chézy en fonction de la rugosité équivalente :

On souhaite calculer la valeur du coefficient C de Chézy en fonction de la rugosité équivalente pour le cas d'un canal rectangulaire au fond lisse ($\epsilon_{\text{éq}}/b = 0$),

$$\epsilon_{\text{éq}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (p_i \epsilon_i)^{3/2}}{\sum_{i=1}^n p_i} \right]^{2/3}$$

$$\epsilon_{\text{éq}} = \left[\frac{(0,0197 \times 0,0 + 0,075 \times 0,0 + 0,0197 \times 0,0)^{3/2}}{(2 \times 0,0197 + 0,075)} \right]^{2/3} = 0,00 \text{ m}$$

Avec : $p_i = y_i$, on prend par exemple les résultats du tableau 3,1 pour le débit 0,00056 m^3/s , connaissant les données suivantes :

$$Q = 0,00056 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, b = 0,075 \text{ m}, \epsilon = 0,0025 \text{ m}, i = 0,01, \nu = 10^{-6} / \text{s}, A = 0,00105 \text{ m}^2, P = 0,103 \text{ m}, R_h = 0,0102 \text{ m}$$

On utilise la formule de Achour (2007) pour déterminer le coefficient de frottement f :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{\frac{\epsilon}{D_h}}{3,7} + \frac{4,5}{R} \log \frac{R}{6,97} \right)$$

$$\text{Et on a : } D_h = 4 A/P = 4 R_h = 4 \times 0,0102 = 0,0408 \text{ m}$$

$$R = \frac{4Q}{P \nu} = \frac{4 \times 0,00056}{0,103 \times 10^{-6}} = 21747,57282$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{\frac{0}{0,0408}}{3,7} + \frac{4,5}{R} \log \frac{21747,57282}{6,97} \right) = 6,281706506$$

$$\sqrt{f} = \frac{1}{6,281706506}$$

$$f = \left(\frac{1}{6,281706506}\right)^2 = 0,025342223$$

En comparant les relations de Chézy et Darcy-weisbach, on peut montrer que le coefficient C de Chézy est étroitement lié au coefficient de frottement f :

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \sqrt{\frac{8 \times 9,81}{0,025342223}} = 55,64897162 \approx 55,64$$

* Vérifions la valeur ainsi calculée de C par celle issue des résultats expérimentaux .

Selon les résultats expérimentaux obtenus :

$$C = 53,45 \text{ m}^{0,5}/\text{s} .$$

Ainsi, nous pouvons constater que l'écart relatif entre les valeurs de C calculées selon la méthode que nous avons présentée et les valeurs de C obtenus

expérimentalement est de :

$$\frac{\Delta C}{C} = 100 \times \frac{(55,64897162 - 53,45)}{55,64897162} = 3,95 \% .$$

Cet valeur d'écart relatif est strictement supérieur à l'écart relatif de coefficient de Chézy calculée au moyenne de rugosité relatif de fond seulement.

Cette différence montre clairement que on ne peut pas considérer la rugosité utilisé au laboratoire au lieu de la rugosité équivalente.

III-6- Exemple 04 de calcul de coefficient de Chézy en fonction de la rugosité équivalente :

On souhaite calculer la valeur du coefficient C de Chézy en fonction de la rugosité équivalente pour le cas d'un canal rectangulaire au fond rugueux ($\varepsilon_{\text{éq}}/b = 0,0112$),

$$\varepsilon_{\text{éq}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (p_i \varepsilon_i)^{3/2}}{\sum_{i=1}^n p_i} \right]^{2/3}$$

$$\varepsilon_{\text{éq}} = \left[\frac{[(0,0197 \times 0 + 0,075 \times 0,002 + 0,0197 \times 0)^{3/2}]}{(2 \times 0,0197 + 0,075)} \right]^{2/3} = 0,000613516 \text{ m}$$

Avec : $p_i = y_i$, on prend par exemple les résultats du tableau 3,6 pour le débit $0,00056 \text{ m}^3/\text{s}$, connaissant les données suivantes :

$$Q = 0,00056 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, \quad b = 0,075 \text{ m}, \quad \varepsilon_{\text{éq}} = 0,000613516 \text{ m}, \quad i = 0,01, \quad v = 10^{-6}/\text{s}, \quad y_n =$$

0,0197 m, A= 0,00147 m², P = 0,1144 m, R_h= 0,0128 m

On utilise la formule de Achour (2007) pour déterminer le coefficient de frottement f :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} - 2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon_{\text{éq}}}{D_h}}{3,7} + \frac{4,5}{R} \log \frac{R}{6,97} \right)$$

Et on a : D_h = 4 A/P = 4 R_h = 4 × 0,0128 = 0,0512 m

$$R = \frac{4Q}{P_v} = \frac{4 \times 0,00056}{0,1144 \times 10^{-6}} = 19649,12281$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} - 2 \log \left(\frac{\frac{0,000613516}{0,0512}}{3,7} + \frac{4,5}{19649,12281} \log \frac{19649,12281}{6,97} \right) = 4,789791559$$

$$\sqrt{f} = \frac{1}{4,789791559}$$

$$f = \left(\frac{1}{4,789791559} \right)^2 = 0,043622146$$

En comparant les relations de Chézy et Darcy-weisbach, on peut montrer que le coefficient C de Chézy est étroitement lié au coefficient de frottement f :

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \sqrt{\frac{8 \times 9,81}{0,043622146}} = 42,41563603 \approx 42,41$$

* Vérifions la valeur ainsi calculée de C par celle issue des résultats expérimentaux .

Selon les résultats expérimentaux obtenus :

$$C = 34,25 \text{ m}^{0,5}/\text{s} .$$

Ainsi, nous pouvons constater que l'écart relatif entre les valeurs de C calculées selon la méthode que nous avons présentée et les valeurs de C obtenus

expérimentalement est de :

$$\frac{\Delta C}{C} = 100 \times \frac{(42,41563603 - 34,25)}{42,41563603} = 17,28 \%$$

Cet valeur d'écart relatif est strictement supérieur à l'écart relatif de coefficient de Chézy calculée au moyenne de rugosité relatif de fond seulement.

Cette différence montre clairement que on ne peut pas considérer la rugosité utilisé au laboratoire au lieu de la rugosité équivalente.

Conclusion :

Le chapitre s'est poursuivi par la détermination de coefficient C de Chézy en écoulement considéré uniforme dans un canal de forme rectangulaire à pente variable par voie expérimental.

Notre travail s'effectue dans le laboratoire, par deux essais suivantes:

Le premier essai est consacré essentiellement à déterminer le coefficient de Chézy d'un écoulement dans un canal à fond lisse. Le second essai est aussi consacré à la détermination du coefficient de Chézy dans un canal à fond rugueux

Les résultats obtenus des valeurs de coefficient C de Chézy dans le deux essais montre que ses valeurs sensiblement décroissent avec l'accroissement de la pente, c'est-à-dire quand le régime d'écoulement tend vers la torrencialité le caractère de la résistance à l'écoulement décroisse, et même que la rugosité ε augmente le coefficient C de Chézy décroissent, Ainsi que :il a été montré que le coefficient C de Chézy est un paramètre variable selon la variation de débit , et aussi même que on fixe la rugosité ε , alors $C = f(R_h, \varepsilon, i, Q)$

Les résultats que nous avons présentés d'après les exemples d'application montrent l'efficacité et l'utilisation de la méthode soit : MMR, Achour et bedjaoui (2006) , Manning–Strickler et Chézy dans la détermination de coefficient C de Chézy avec un écart acceptable entre 0,37 % et 0,97 %. Et on ne peut pas d'une autre façon considérer la rugosité utilisé au laboratoire au lieu de la rugosité équivalente, et surtout ses applications dans les différents travaux d'hydraulique et en particulier les recherches que ce soit menés dans les canalisations.

Ces genres des méthodes s'avère très utiles pour la détermination de coefficient de résistance à l'écoulement et éviter les erreurs de calcul ou bien les défaillances qui pourront surgir lors de réalisation des multiples travaux hydrauliques notamment dans les canaux ou dans les conduites.

CONCLUSION GENERALE :

L'étude a eu pour objectif d'évaluer le coefficient de résistances de *Chézy* dans les canaux de forme rectangulaire, ainsi que leur variation.

Pour atteindre notre objectif, il a été nécessaire de subdiviser notre mémoire en trois chapitres.

Le premier chapitre a été consacré à un état de connaissances sur l'écoulement uniforme dont, nous avons exposé les différentes relations actuellement en vigueur, telles que les relations de *Chézy*, de *Manning* et de *Darcy – Weisbach* qui constituent les relations les plus utilisées en pratique. Nous avons également rappelé les formules usuelles destinées à l'évaluation des coefficients de résistance à l'écoulement de *Chézy* et de *Colebrook*.

Le deuxième chapitre a consisté en une étude des coefficients de *Chézy* en écoulement uniforme dans un canal de forme rectangulaire.

En se basant essentiellement sur la relation de *Achour et Bedjaoui (2006)* et celle de *Chézy*, nous avons pu obtenir la relation générale du coefficient de résistance à l'écoulement de *Chézy*. Nous avons présenté cette relation en une relation adimensionnelle pour une validité générale, de type: $C/\sqrt{g} = f(\varepsilon/b; \eta; R^*)$. Les courbes de variation de cette relation montrent que si la rugosité relative ε/b augmente, elle entraîne la diminution du coefficient C/\sqrt{g} , quelle que soit la valeur du nombre de *Reynolds* modifié R^* .

Les résultats que nous avons présentés montrent l'efficacité et l'utilisation de la méthode MMR, et surtout ses applications dans les différents travaux d'hydraulique et en particulier les recherches que ce soit menés dans les canalisations.

La troisième chapitre s'est poursuivi par la détermination de coefficient C de *Chézy* par voie expérimental.

Notre travail s'effectue dans le laboratoire, par deux essais suivantes:

La première essai est consacré essentiellement à déterminer de coefficient de *Chézy* d'un écoulement dans un canal à fond lisse. La seconde essais est aussi consacré à la détermination du coefficient de *Chézy* dans un canal à fond rugueux. Nous avons pu obtenir une variante de $C = f(i)$. Les courbes de cette relation montrent que le coefficient C décroissent avec l'accroissement de la pente i et quand le régime d'écoulement tend vers la torrentialité le caractère d'écoulement C décroisse. Les tableaux regroupent les valeurs expérimentaux

montre que le coefficient C de Chézy décroisse avec l'augmentation de la rugosité ε , une relation générale a été obtenue montrant que le coefficient C est un paramètre variable $C = f(i, \varepsilon, Q, R_h)$.

Nous avons procédé les trois différentes méthodes celle de MMR, Chézy et Manning, et Achour et Bedjaoui (2006) afin d'utiliser les différents résultats expérimentaux dans ces trois méthodes et obtenir un écart relatif acceptable entre 0,37% et 0,97%. Les résultats que nous avons présentés d'après les exemples d'application montrent l'efficacité et l'utilisation de trois différentes méthodes de MMR et Achour et Bedjaoui (2006), Chézy et Manning. Et on peut pas d'une autre façon considérer la rugosité utilisée au laboratoire au lieu de la rugosité équivalente, surtout ses applications dans les différents travaux hydrauliques.

Ces genres des méthodes s'avèrent très utiles pour éviter les erreurs de calcul ou bien les défaillances qui pourront surgir lors de la réalisation des multiples travaux hydrauliques notamment dans les canaux ou dans les conduites.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Achour, B and Bedjaoui, A., “ Discussion of Explicit Solutions for Normal Depth Problem “, J. Hydraulic Research, *IAHR*, 44, No.5, 2006, 715-717.

Achour, B, *Calcul des conduites et canaux par la MMR - Conduites et canaux en charge*, Larhyss, Edition Capitale, Tome 1, 2007, 610p.

Bazin, H., Etude d’une nouvelle formule pour calculer le débit des canaux découverts, Mémoire n°41, Annales des ponts et chaussées, Vol.14, ser.7, 4ème trimestre, p.20-70, 1897.

Blench, T., “A new theory of turbulent flow in liquids of small viscosity”, Journal, *Institution of Civil Engineers*, London, Vol.1 1, n°6, April, 1939, 611-612.

Forchheimer, P., Teubner, Verlagsgesellschaft, Leipzig and Berlin, p. 139-163, 1930.

Ganguillet, E., Kutter, W.R., An investigation to establish a new general formula for uniform flow of water in canals and rivers, *Zeitschrift des Oesterreichischen Ingenieur und Architekten Vereines*, Vol.21, n°1, p.6-25, n°2-3, p.46-59, 1869.

Houk, I.E., Calculation of flow in open channels, Miami Conservancy District, Technical report, Pt. IV, Dayton, Ohio, 1918.

Lindquist, E., On velocity formulas for open channels and pipes, Transactions of the World Power Conference, Sectional Meeting, Scandinavia, Stockholm, Vol.1, p.177-234, 1933.

Manning, R., On the flow of water in open channels and pipes, Transactions, Institution of Civil engineers of Ireland, Vol.20, p.161-207, Dublin, 1891.

Pavlovski, N.N., “Handbook of Hydraulic”, Kratkil Gidravlicheskil, Spravochnik, Gosstrolizdat, Leningrad and Moscow, 1940, 314p.

Powell, R.W., Résistance to flow in rough channels, Transactions, American Geophysical Union, Vol.31, n°4, p.575-582, August, 1950.

Schnackenberg, E.C., Slope discharge formulae for alluvial streams and rivers. Proceeding, New Zealand Institution of Engineers, Vol. 37, p.340-409, Wellington, 1951.

Sinniger, R.O., Hager W.H., *Constructions hydrauliques*, Traité de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Presses Polytechniques Romandes, (15), 1ere Edition, Suisse, 1989.

Swamee, P.K., Jain A.K., Explicit equations for pipe-flow problems, Proc. ASCE, J. Hydraulics Division, Vol. 102, HY5, p.657-664, 1976.

Toebes, C., Streamflow : 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, p.900-938, December, 1955.

Vladislavljevitch, Z., Aperçu critique sur les formules pour la prédétermination de la vitesse moyenne de l'écoulement uniforme, Transactions of the 1st Congress, International Commission on Irrigation and Drainage, New Delhi, Vol.2, rept.12, question 2, p.405- 428, 1951.

Abréviations :

g	Accélération de la pesanteur	m/s^2
\bar{A}	Aire de la section mouillée du modèle rugueux	m^2
A	Aire de la section mouillée	m^2
\bar{b}	Largeur de base du modèle rugueux de forme rectangulaire	m
b	Largeur de base de forme rectangulaire	m
\bar{C}	Coefficient de Chézy du modèle rugueux	$m^{1/2}/s$
C	Coefficient de Chézy	$m^{1/2}/s$
\bar{f}	Coefficient de frottement du modèle rugueux	-
f	Coefficient de frottement	-
n	Coefficient de kutter	-
n	Coefficient de Manning	$m^{-1/3}s$
Q^*	Conductivité relative	-
\bar{Q}	Débit volume du modèle rugueux	m^3/s
Q	Débit volume	m^3/s
\bar{D}_h	Diamètre hydraulique du modèle rugueux	m
D_h	Diamètre hydraulique	m
β	Exposant	-
γ	Exposant	-
ψ	Facteur de correction des dimensions linéaires	-
Fr	Force de résistance	N
L	Longueur du canal	m
ρ	Masse volumique du liquide	Kg/m^3
\bar{R}	Nombre de Reynolds dans le modèle rugueux	-
R	Nombre de Reynolds	-
R^*	Nombre de Reynolds modifié	-

J	Pente de ligne de charge	-
i	Pente longitudinal	-
\bar{i}	Pente longitudinale du modèle rugueux	-
P	Périmètre mouillé	m

ملخص :

الهدف من هذه الدراسة هو اختبار تغير معامل مقاومة جريان الماء لشيبي بالنسبة للشكل المستطيل للقنوات تحت فرضية الجريان المنتظم المفتوح وتحديد العلاقات التي تحسب هذا المعامل هذه العلاقات تكون بدون وحدة من أجل أن يكون لها قابلية عامة

كذلك التعبير عن معامل شيبي مع الأخذ بعين الاعتبار خصائص أبعاد القناة و الخصائص الهيدروليكية لجريان الماء نقترح في هذه الدراسة طريقة لحساب هذا المعامل بالاستعانة بطريقة النموذج الخشن المرجعي نمتحن عن طريق التجربة تغير معامل مقاومة جريان الماء لشيبي في قناة ذات سطح املس و قناة ذات سطح خشن ونقارن عن طريق تطبيقات عددية نجاعة الطرق المستعملة لعاشور و بجاوي و شيبي و مانينغ و طريقة النموذج الخشن وتأثير الخشونة النسبية المستعملة في المخبر في تطبيقاتها في مختلف الأشغال الهيدروليكية و بشكل خاص في الأبحاث المطبقة على القنوات في مكان الخشونة المطلقة لجدران القناة .

الكلمات المفتاحية : (الجريان المنتظم، مانينغ، شيبي، النموذج الخشن المرجعي ...)

RESUME

Les objectifs de notre mémoire consistent à examiner d'une part la variation de coefficient de résistance à l'écoulement de Chézy pour une conduite de forme rectangulaire sous l'hypothèse d'un écoulement uniforme a surface libre, et à déterminer d'autre part les expressions qui le régissent. Ces relations devront être mentionnées sous forme adimensionnelle afin de leur donner un caractère de validité générale.

En outre, on doit rechercher les expressions de Chézy en tenant compte de caractéristiques géométriques du canal et hydraulique de l'écoulement.

On propose une méthode de calcul de ce coefficients en ayant recours à la méthode du modèle rugueux de référence.

On examine par voie expérimental la variation de coefficient de résistance à l'écoulement de Chézy dans un canal au fond lisse et au fond rugueux , et on compare par des applications numériques l'efficacité des trois méthodes utilisées celle de Achour et bedjaoui (2006) , Chézy et Manning , et MMR , et l'impact de la rugosité relative utilisée au laboratoire dans ses applications dans les différents travaux d'hydraulique et en particulier les recherches que ce soit menés dans les canalisations au lieu de la rugosité équivalente des parois du canal.

Mots clés : (Méthode de Modèle Rugueux, Chézy, Manning, Ecoulement uniforme,...)

ABSTRACT

The objectives of our paper are to examine on the one hand the Chézy flow resistance coefficient variation for a rectangular pipe under the assumption of a uniform surface free flow and to determine On the other hand, the expressions which govern it. These relationships should be Dimensional form in order to give them a general validity character.

In addition, the Chezy expressions must be sought, taking into account the geometrical characteristics of the channel and the hydraulic flow. A method for calculating these coefficients is proposed using the Rough reference model.

The variation in the coefficient of resistance to the flow of Chézy in a channel with a smooth bottom and a rough bottom is examined experimentally and the effectiveness of the three methods used by Achour et bedjaoui (2006) , Chézy and Manning, and MMR, and the impact of the relative roughness used in the laboratory in its applications in the various hydraulic works and in particular the research carried out in the pipelines. Instead of the equivalent roughness of the walls of the canal.

Keywords: (Rough Model Method, Chézy, Manning, Uniform Flow, ...)