



DIMENSIONNEMENT D'UN CANAL OUVERT A FOND HORIZONTAL ET A PAROIS CIRCULAIRES PAR LA METHODE DU MODELE RUGUEUX

SIZING AN OPEN CHANNEL WITH HORIZONTAL BOTTOM AND CIRCULAR WALLS USING THE ROUGH MODEL METHOD

LAKEHAL M.¹, ACHOUR B.²

¹ Université Badji Mokhtar, Annaba. Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Hydraulique, Développement Durable et Environnement, LARGHYDE.

² Université Mohamed Khider, Biskra. Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface, LARHYSS.

moussalakehall@gmail.com

RESUME

Le dimensionnement des canaux et surtout le calcul de la profondeur normale joue un rôle très important dans la pratique de l'ingénieur hydraulicien. Les méthodes classiques s'appuient sur des procédés graphiques ou itératifs afin de déterminer les dimensions linéaires d'une conduite ou d'un canal donné. Elles considèrent aussi, de manière injustifiée, les coefficients de Chézy et de Manning comme une donnée du problème, en dépit du fait que ces coefficients dépendent des dimensions linéaires recherchées. Ce problème a été aisément résolu par l'application d'une nouvelle méthode dite méthode du modèle rugueux de référence ou bien tout simplement la MMR. Dans cette étude, cette nouvelle méthode analytique est présentée puis appliquée pour le calcul des dimensions linéaires d'un canal ouvert à fond horizontal et à parois latérales circulaires. Ces dimensions linéaires sont : la profondeur normale de l'écoulement, la largeur de la base du canal et le diamètre des parties circulaires de celui-ci. La méthode tient en compte, en particulier, l'effet de la rugosité absolue qui est un paramètre facilement mesurable en pratique. Dans une première étape, la méthode est appliquée à un modèle rugueux de référence dont le but d'établir les relations qui gouvernent ses caractéristiques hydrauliques.

Dans une seconde étape, ces relations sont utilisées pour déduire facilement les dimensions linéaires recherchées par l'introduction d'un facteur de correction adimensionnel. Un exemple pratique est proposé pour mieux expliquer la méthode préconisée et apprécier sa simplicité et son efficacité.

Mots clés : Dimensions linéaires, Canal ouvert, Ecoulement uniforme, Débit, Pente, Ecoulement turbulent, Méthode du modèle rugueux.

ABSTRACT

The dimensioning of the channels and especially the computation of normal depth plays a significant role in the practice of hydraulic engineer. The classical methods usually used are graphical or iterative to determine the linear dimensions of a pipe or a channel. They also consider, unreasonably, Chezy's coefficient or Manning's roughness coefficient as a given data of the problem, despite the fact that these coefficients depend on the linear dimensions sought.

This problem can be easily solved by the application of a new method called the rough model method or simply the RMM. In this study, this new analytical method is presented and applied for the calculation of the linear dimensions of an open channel with horizontal bottom and circular sides. These linear dimensions are: the normal depth of flow, the width of the base of the channel and the diameter of circular parts of the channel. The method takes into account, in particular, the effect of the absolute roughness which is a readily measurable parameter in practice. In a first step, the method is applied to a referential rough model in order to establish the relationships that govern its hydraulic characteristics. In a second step, these equations are used to easily deduce the required linear dimensions by introducing a non-dimensional correction factor. A practical example is considered to better explain the advocated method and to appreciate its simplicity and efficiency.

Keywords: Linear dimensions, Open channel,, Uniform flow, Discharge, Slope, Turbulent flow, Rough model method.

INTRODUCTION

Le dimensionnement des canaux a été l'un des principaux problèmes de l'ingénieur hydraulicien. Les solutions proposées ont été d'abord graphiques (Chow, 1973 ; French, 1986 ; Sinniger et Hager, 1989) et au cours de ces dernières années les solutions sont devenues itératives. Le dimensionnement

d'un canal ouvert à fond horizontal et à parois latérales circulaires ne fait pas exception à cette règle (Swamee, 1994 ; Swamee et Rathie, 2004 ; Srivastava, 2006 ; Kouchakzadeh et Vatankhah, 2007). La forme étudiée dans cet article est un cas particulier de la section à parois en forme de loi puissance. En effet, la section à parois suivant une loi puissance permet la modélisation des canaux naturels et artificiels. Lorsque le comportement général de la rivière est étudié, la simplification de la géométrie réelle est très importante (Valiani et Caleffi, 2009 citée par Vatankhah, 2014). Généralement la section à parois suivant une loi de type puissance est une bonne représentation de la géométrie réelle (Vatankhah, 2014). Dans les méthodes de calcul actuelles, le problème majeur réside non pas principalement dans leur caractère itératif, mais plutôt dans le fait qu'elles considèrent le coefficient de Chézy ou de Manning comme une donnée du problème. C'est là que réside la difficulté car la question est de savoir comment imposer ces coefficients alors qu'ils dépendent de la profondeur normale recherchée. Même avec beaucoup d'expérience, il est très difficile voire impossible de fixer à l'avance la valeur de ces coefficients avant de calculer la profondeur normale. Le seul paramètre mesurable en pratique et qui est lié à l'état de la paroi interne de la conduite est la rugosité absolue (Achour, 2014a ; 2014b ; 2014c ; 2015a ; 2015b ; Achour et Sahtal, 2014 ; Lakehal et Achour, 2014). C'est dans ce contexte que nous proposons la présente étude, basée sur une nouvelle méthode de calcul connue sous le nom de Méthode du Modèle Rugueux (MMR) (Achour, 2013 ; 2015a ; 2015b ; Achour et Bedjaoui, 2006 ; 2012 ; 2014 ; Achour et Sahtal, 2014 ; Lakehal et Achour, 2014). Cette méthode ne tient pas compte des coefficients de Chézy et de Manning. Pour le calcul de la profondeur normale, de la largeur de la base et du diamètre des parties circulaires d'un canal à fond horizontal et à parois circulaires, cette méthode se base sur des paramètres mesurables en pratique tels que le débit, la pente longitudinale de la conduite, la rugosité absolue et la viscosité cinématique du liquide en écoulement. La méthode se base sur les caractéristiques géométriques et hydrauliques d'un modèle rugueux de référence dont les paramètres sont bien définis. Grâce à un facteur de correction adimensionnel, ces paramètres sont utilisés pour déduire ceux de la conduite étudiée, en particulier la profondeur normale. Dans la méthode du modèle rugueux, il n'y a pas de restrictions sur les paramètres mis en jeu et les relations qui en découlent sont applicables à l'ensemble de l'écoulement turbulent correspondant à un nombre de Reynolds $R \geq 2300$ et à une rugosité relative ε/D_h variant dans la large gamme $[0 ; 0,05]$. Un exemple de calcul est proposé pour mieux comprendre la procédure de calcul et pour apprécier sa simplicité et son efficacité.

LOCALISATION DU PROBLEME

La figure 1 montre schématiquement les dimensions linéaires du canal étudié caractérisé par les paramètres de forme $\eta = y_n/b$ et $\xi = y_n/D \leq 0,5$. En effet, le rapport η représente le paramètre de forme de la partie rectangulaire du canal tandis que le rapport ξ représente le paramètre de forme des parties circulaires du canal. En outre, y_n est la profondeur normale, b est la largeur de la base et D est le diamètre des parties circulaires. Le débit volume est Q , la pente longitudinale est i , la viscosité cinématique du liquide en écoulement est ν et la rugosité absolue caractérisant l'état de la paroi interne de la conduite est ε . Le calcul de la profondeur normale se base principalement sur les équations de résistance à l'écoulement dans les canaux ouverts. Les plus usuelles sont la relation de Darcy-Weisbach ainsi que les relations de Chézy et de Manning. La première fait appel au coefficient de frottement au sens de Colebrook-White défini par une relation implicite. La solution requiert un procédé itératif laborieux ou une méthode graphique.

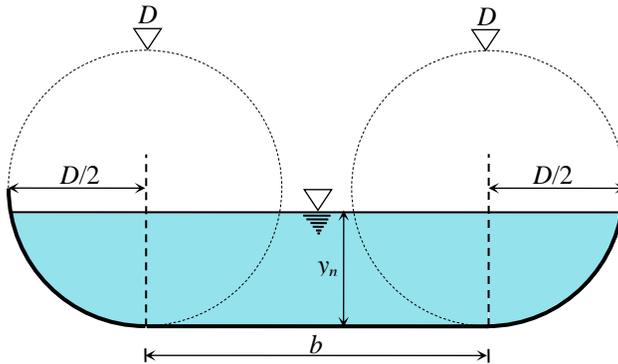


Figure 1 : Schéma de définition de l'état de l'écoulement de profondeur y_n dans un canal à fond horizontal et à parois circulaires

La deuxième et la troisième relation utilisent respectivement le coefficient de Chézy et le coefficient de rugosité de Manning qui ne sont pas des coefficients constants. La littérature montre que la plupart des études imposent les coefficients de Chézy et de Manning comme des données du problème, en considérant ces coefficients comme des constantes dépendant exclusivement de la nature du matériau constituant la paroi interne de la conduite. Cette approche

est physiquement non justifiée du fait que ces coefficients dépendent aussi de la profondeur normale recherchée et cela constitue alors une erreur d'imposer à l'avance la valeur de ces coefficients. En réalité, ces coefficients dépendent de cinq paramètres qui sont la rugosité absolue, la géométrie du canal, la viscosité cinématique du liquide en écoulement, l'accélération de la pesanteur et les paramètres de forme du canal et par conséquent des dimensions linéaires du canal (Achour, 2013 ; 2014a ; 2014b ; 2014c ; 2015a ; 2015b ; Achour et Bedjaoui, 2006 ; 2012 ; 2014; Achour et Sahtal, 2014 ; Lakehal et Achour, 2014).

Le problème qui demeure récurrent et de calculer la profondeur normale y_n , la largeur de la base b et le diamètre D des parties circulaires du canal à partir des paramètres de formes imposés η et ξ et des données mesurables en pratique tels que le débit volume Q , la pente longitudinale i du canal, la viscosité cinématique ν du liquide en écoulement et la rugosité absolue ε qui reflète l'état de la paroi interne du canal. Pour résoudre le problème de dimensionnement du canal à partir de ces données seulement, la méthode du modèle rugueux semble être l'outil de calcul le mieux approprié; c'est ce que tentera de démontrer la présente étude. Dans cette méthode, il n'y a pas lieu de considérer les coefficients de résistance à l'écoulement tels que le coefficient de frottement, le coefficient de Chézy ou le coefficient de Manning.

EQUATIONS DE BASE

Les équations sur lesquelles repose la présente étude sont des relations simples, bien connues en hydraulique, qui sont la relation de Darcy-Weisbach (1854), la relation de Colebrook-White (1939) et le nombre de Reynolds. La pente i de la conduite est donnée par la relation de Darcy-Weisbach sous la forme :

$$i = \frac{f}{D_h} \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (1)$$

Où Q est le débit volume, g est l'accélération de la pesanteur, A est l'aire de la section mouillée, D_h est le diamètre hydraulique et f est le coefficient de frottement qui s'exprime, de manière implicite, par la formule de Colebrook-White sous la forme:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon / D_h}{3.7} + \frac{2.51}{R\sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

Où ε est la rugosité absolue et R est le nombre de Reynolds qui s'exprime par :

$$R = \frac{4Q}{P\nu} \quad (3)$$

Où ν est la viscosité cinématique et P est le périmètre mouillé.

MODELE RUGUEUX DE REFERENCE

Le modèle rugueux considéré est en fait un canal également à fond horizontal et à parois circulaires (Fig. 2).

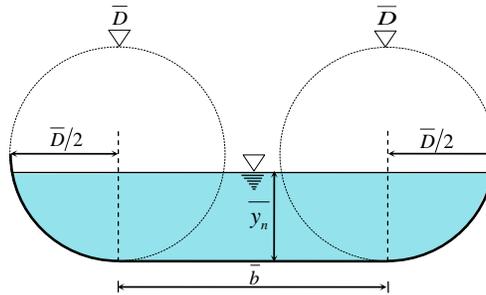


Figure 2 : Schéma de définition du modèle rugueux de référence

Toutes les caractéristiques géométriques et hydrauliques du modèle rugueux se distinguent par le symbole " $\bar{\quad}$ ". Le modèle rugueux est particulièrement caractérisé par une rugosité relative $\bar{\varepsilon} / \bar{D}_h = 0,037$ arbitrairement choisie, où \bar{D}_h est le diamètre hydraulique. La rugosité relative est tellement élevée que l'écoulement est dans le domaine turbulent rugueux. Ainsi, le coefficient de frottement est $\bar{f} = 1/16$ selon la relation (2) pour $R = \bar{R}$ tendant vers l'infini. Le canal à fond horizontal et à parois circulaires est caractérisé par le paramètre de forme de la partie rectangulaire $\eta = y_n/b$ et celui de partie circulaire $\xi = y_n/D$ qui correspondent également à la profondeur normale adimensionnelle. Le modèle rugueux est caractérisé par les paramètres de forme $\bar{\eta} = \bar{y}_n/\bar{b}$ et $\bar{\xi} = \bar{y}_n/\bar{D}$. En raison de la forte valeur de la rugosité relative, les dimensions linéaires dans le modèle rugueux sont telle que $\bar{y}_n > y_n$, $\bar{b} > b$ et $\bar{D} > D$ et pour obtenir la même forme du modèle et du canal, les conditions suivantes doivent être satisfaites

$\bar{\eta} = \eta$ et $\bar{\xi} = \xi$. Le débit volume Q ainsi que la pente longitudinale i sont les mêmes dans le canal et dans le modèle rugueux, c'est-à-dire $\bar{Q} = Q$ et $\bar{i} = i$.

En appliquant la relation (1) au modèle rugueux, nous pouvons écrire :

$$i = \frac{\bar{f}}{D_h} \frac{Q^2}{2g\bar{A}^2} \quad (4)$$

Sachant que $\bar{D}_h = 4\bar{A}/\bar{P}$ et que $\bar{f} = 1/16$, la relation (4) peut être réécrite sous la forme :

$$i = \frac{1}{128g} \frac{\bar{P}}{\bar{A}^3} Q^2 \quad (5)$$

Le périmètre \bar{P} ainsi que \bar{A} s'expriment en fonction de la forme géométrique du modèle rugueux (Fig. 2). Soit respectivement, en tenant compte que $\bar{\eta} = \eta$ et $\bar{\xi} = \xi$:

$$\bar{P} = \bar{b} \left[\frac{\eta}{\xi} \sigma(\xi) + 1 \right] \quad (6)$$

$$\bar{A} = \bar{b}^2 \left[\frac{1}{4} \times \frac{\eta^2}{\xi^2} \sigma(\xi) \varphi(\xi) + \eta \right] \quad (7)$$

Où :

$$\sigma(\xi) = \cos^{-1}(1 - 2\xi) \quad (8)$$

$$\varphi(\xi) = 1 - \frac{2(1 - 2\xi)\sqrt{\xi(1 - \xi)}}{\cos^{-1}(1 - 2\xi)} \quad (9)$$

Le diamètre hydraulique du modèle rugueux s'exprime :

$$\bar{D}_h = 4\bar{A}/\bar{P} \quad (10)$$

En insérant les relations (6) et (7) dans la relation (5) et après réarrangements, il vient que :

$$\bar{b} = \left\{ \frac{\sigma(\xi) \frac{\eta}{\xi} + 1}{128 \left[\frac{1}{4} \times \frac{\eta^2}{\xi^2} \sigma(\xi) \rho(\xi) + \eta \right]^3} \right\}^{1/5} \left(\frac{Q^2}{gi} \right)^{1/5} \quad (11)$$

La relation (11) permet alors le calcul direct de la largeur de la base du modèle en fonction des paramètres connus : Q , i , η et ξ .

Tenant compte que $\bar{\eta} = \bar{y}_n / \bar{b}$ et $\bar{\xi} = \bar{y}_n / \bar{D}$ le diamètre des parties circulaires du modèle peut s'écrire :

$$\bar{D} = \frac{\bar{\eta}}{\bar{\xi}} \bar{b} \quad (12)$$

FACTEUR DE CORRECTION DES DIMENSIONS LINEAIRES

La méthode du modèle rugueux énonce que toute dimension linéaire L d'une conduite ou d'un canal et la dimension linéaire homologue \bar{L} du modèle rugueux sont liées par la relation suivante, applicable à l'ensemble du domaine turbulent :

$$L = \psi \bar{L} \quad (13)$$

Où ψ est un facteur adimensionnel de correction des dimensions linéaires, inférieur à l'unité, et qui est régi par l'équation explicite suivante (Achour et Bedjaoui, 2006 ; 2012) :

$$\psi = 1,35 \left[-\log \left(\frac{\varepsilon / \bar{D}_h}{4,75} + \frac{8,5}{\bar{R}} \right) \right]^{-2/5} \quad (14)$$

Le nombre de Reynolds \bar{R} dans le modèle rugueux est donné par la relation :

$$\bar{R} = \frac{4Q}{Pv} \quad (15)$$

Tous les paramètres de la relation (14) sont connus, ce qui permet de calculer de manière explicite le facteur ψ .

ETAPES DE CALCUL DES DIMENSIONS LINEAIRES DU CANAL

Pour calculer les dimensions linéaires du canal à fond horizontal et à parois circulaires, les paramètres suivants doivent être connus : Q , i , η , ξ , ε et ν . Notons que le coefficient de résistance à l'écoulement tel que le coefficient de Chézy ou celui de Manning n'est pas imposé. Les dimensions linéaires à déterminer sont la profondeur normale de l'écoulement y_n , la largeur de la base b et le diamètre D des parties circulaires du canal. Pour calculer ces dimensions linéaires, les étapes de calcul suivantes sont recommandées :

1. Calculer les fonctions $\sigma(\xi)$ et $\varphi(\xi)$ respectivement par les relations (8) et (9).
2. Déterminer la largeur de la base \bar{b} et le diamètre \bar{D} des parties circulaires du modèle rugueux respectivement par les relations (11) et (12).
3. Déduire le périmètre mouillé \bar{P} et l'aire de la section mouillée \bar{A} respectivement selon les relations (6) et (7).
4. Calculer le diamètre hydraulique \bar{D}_h en utilisant la relation (10).
5. Calculer le nombre de Reynolds \bar{R} selon la relation (15).
6. Avec les valeurs calculées de \bar{D}_h et de \bar{R} , déduire la valeur du facteur de correction des dimensions linéaires ψ par application de la relation (14).
7. Connaissant les valeurs de \bar{b} , de \bar{D} et de ψ , les valeurs recherchées des dimensions linéaires b et D sont directement déduites de l'application de la relation fondamentale (13).
8. Enfin, la valeur de la profondeur normale est alors $y_n = \eta b$.

EXEMPLE PRATIQUE

Soit un canal à fond horizontal et à parois circulaires (Fig. 1). Calculer la largeur de la base b du canal, le diamètre D des parties circulaires du canal et la profondeur normale y_n de l'écoulement, sachant que :

$$Q = 3,274 \text{ m}^3/\text{s}, i = 10^{-4}, \eta = 0,6, \xi = 0,4, \varepsilon = 10^{-3} \text{ m}, \nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

1. Selon les relations (8) et (9), les fonctions $\sigma(\xi)$ et $\varphi(\xi)$ sont respectivement :

$$\sigma(\xi) = \cos^{-1}(1 - 2\xi) = \cos^{-1}(1 - 2 \times 0,4) = 1,36943841$$

$$\varphi(\xi) = 1 - \frac{2(1 - 2\xi)\sqrt{\xi(1 - \xi)}}{\cos^{-1}(1 - 2\xi)} = 1 - \frac{2(1 - 2 \times 0,4)\sqrt{0,4 \times (1 - 0,4)}}{\cos^{-1}(1 - 2 \times 0,4)} = 0,85690544$$

2. La largeur de la base \bar{b} et le diamètre \bar{D} des parties circulaires du modèle rugueux peuvent être calculés respectivement par les relations (11) et (12). Soit :

$$\begin{aligned} \bar{b} &= \left\{ \frac{\sigma(\xi)\frac{\eta}{\xi} + 1}{128 \left[\frac{1}{4} \times \frac{\eta^2}{\xi^2} \sigma(\xi)\varphi(\xi) + \eta \right]^3} \right\}^{1/5} \left(\frac{Q^2}{gi} \right)^{1/5} \\ &= \left\{ \frac{1,36943841 \times \frac{0,6}{0,4} + 1}{128 \left[\frac{1}{4} \times \frac{0,6^2}{0,4^2} \times 1,36943841 \times 0,85690544 + 0,6 \right]^3} \right\}^{1/5} \left(\frac{3,274^2}{9,81 \times 10^{-4}} \right)^{1/5} \\ &= 2,64846761 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\bar{D} = \frac{\eta}{\xi} \bar{b} = \frac{0,6}{0,4} \times 2,64846761 = 3,97270141 \text{ m}$$

3. En application des relations (6) et (7), le périmètre mouillé \bar{P} et l'aire de la section mouillée \bar{A} sont respectivement:

$$\bar{P} = \bar{b} \left[\frac{\eta}{\xi} \sigma(\xi) + 1 \right] = 2,64846761 \times \left[\frac{0,6}{0,4} \times 1,36943841 + 1 \right] = 8,08883749 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}\bar{A} &= \bar{b}^2 \left[\frac{1}{4} \times \frac{\eta^2}{\xi^2} \sigma(\xi) \varphi(\xi) + \eta \right] \\ &= 2,64846761^2 \left[\frac{1}{4} \times \frac{0,6^2}{0,4^2} \times 1,36943841 \times 0,85690544 + 0,6 \right] \\ &= 8,83869527 \text{m}^2\end{aligned}$$

4. Le diamètre hydraulique du modèle rugueux est donné par la relation (10).
Soit :

$$\bar{D}_h = 4\bar{A}/\bar{P} = 4 \times 8,83869527 / 8,08883749 = 4,37081115 \text{ m}$$

5. En vertu de la relation (15), le nombre de Reynolds \bar{R} est tel que :

$$\bar{R} = \frac{4Q}{P\nu} = \frac{4 \times 3,274}{8,08883749 \times 10^{-6}} = 1619021,28$$

6. Selon la relation (14), le facteur de correction ψ est :

$$\begin{aligned}\psi &= 1,35 \left[-\log \left(\frac{\varepsilon/\bar{D}_h}{4,75} + \frac{8,5}{\bar{R}} \right) \right]^{-2/5} \\ &= 1,35 \times \left[-\log \left(\frac{10^{-3}/4,37081115}{4,75} + \frac{8,5}{1619021,28} \right) \right]^{-2/5} = 0,75521059\end{aligned}$$

7. Les valeurs recherchées des dimensions linéaires b et D sont selon la relation fondamentale (13) :

$$b = \psi \bar{b} = 0,75521059 \times 2,64846761 = 2,0001508 \text{ m} \approx 2 \text{ m}$$

$$D = \psi \bar{D} = 0,75521059 \times 3,97270141 = 3,00022619 \text{ m} \approx 3 \text{ m}$$

8. La profondeur normale recherchée est donc :

$$y_n = \eta b = 0,6 \times 2,0001508 = 1,20009048 \text{ m} \approx 1,2 \text{ m}$$

9. Cette étape vise à vérifier les calculs effectués en déterminant la pente longitudinale i par application de la relation (1) de Darcy-Weisbach. La pente ainsi calculée doit être égale à celle donnée à l'énoncé de l'exemple

d'application. Selon la méthode du modèle rugueux, le coefficient de frottement f et le facteur de correction des dimensions linéaires ψ sont liés par la relation :

$$f = \psi^5 / 16 = 0,75521059^5 / 16 = 0,01535396$$

Ainsi :

Selon la relation (6), le périmètre mouillé P est :

$$P = b \left[\frac{\eta}{\xi} \sigma(\xi) + 1 \right] = 2,0001508 \times \left[\frac{0,6}{0,4} \times 1,36943841 + 1 \right] = 6,10877577 \text{ m}$$

Selon la relation (7), l'aire de la section mouillée A est :

$$A = b^2 \left[\frac{1}{4} \times \frac{\eta^2}{\xi^2} \sigma(\xi) \rho(\xi) + \eta \right]$$

$$= 2,0001508^2 \left[\frac{1}{4} \times \frac{0,6^2}{0,4^2} \times 1,36943841 \times 0,85690544 + 0,6 \right]$$

$$= 5,04108835 \text{ m}^2$$

Le diamètre hydraulique $D_h = 4A / P$ est donc :

$$D_h = 4A / P = 4 \times 5,04108835 / 6,10877577 = 3,30088289 \text{ m}$$

En vertu de la relation (1), la pente longitudinale i est :

$$i = \frac{f}{D_h} \frac{Q^2}{2gA^2} = \frac{0,01535396}{3,30088289} \times \frac{3,274^2}{2 \times 9,81 \times 5,04108835^2} = 10^{-4}$$

Comme nous pouvons le constater, la pente i calculée et celle donnée à l'énoncé du problème sont égales (écart 0 %), ce qui permet de conclure à la validité des calculs effectués.

CONCLUSION

La méthode du modèle rugueux a été appliquée avec succès pour le dimensionnement d'un canal à fond horizontal et à parois circulaires. Contrairement aux méthodes de calcul actuelles, la méthode du modèle rugueux a utilisé des données mesurables en pratique telle que la rugosité absolue caractérisant l'état de la paroi interne du canal. La relation de Darcy-Weisbach a été d'abord appliquée à un modèle rugueux de référence dont le coefficient de frottement a été arbitrairement choisi. Ceci a conduit à l'établissement d'une relation explicite permettant le calcul direct de la largeur de la base du modèle et le diamètre de ses parties circulaires. Les dimensions linéaires ont été

déduites après avoir calculé le facteur adimensionnel de correction des dimensions linéaires. L'exemple d'application que nous avons proposé a montré la fiabilité de la méthode du modèle rugueux ainsi que sa simplicité et son efficacité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACHOUR B. (2013). Design of Pressurized Vaulted Rectangular Conduits Using the Rough Model Method, *Adv. Mat. Res.*, Trans. Tech. Publications, Vols. 779-780, 414-419.
- ACHOUR, B. (2014a). Computation of normal depth in parabolic cross sections using the rough model method, *Open Civ. Eng. J.*, vol. 8, 213-218.
- ACHOUR, B. (2014b). Computation of normal depth in horseshoe shaped tunnel using the rough model method, *Adv. Mater. Res.*, vols. 1006-1007, 826-832.
- ACHOUR, B. (2014c). Computation of normal depth in trapezoidal open Channel using the rough model method, *Adv. Mater. Res.*, vols. 955-959, pp. 3231-3237.
- ACHOUR, B. (2015a). Computation of Normal Depth in a U-Shaped Open Channel Using the Rough Model Method. *American Journal of Engineering, Technology and Society*. Vol. 2, No. 3, 46-51.
- ACHOUR, B. (2015b). Analytical solution for normal depth problem in a Vertical U-Shaped open channel using the rough model method, *J. Sci. Res. Rep.*, vol. 6, no. 6, 468-475.
- ACHOUR B., BEDJAOUI A. (2006). Discussion of "Exact solutions for normal depth problem", *J. Hydraul. Res.*, Vol. 44, n°5, 715-717.
- ACHOUR B., BEDJAOUI A. (2012). Turbulent Pipe-flow Computation Using the Rough Model Method (RMM), *J. Civil. Eng. Sci.*, Vol. 1, n°1, 36-41.
- ACHOUR B., BEDJAOUI A. (2014). Design of a Pressurized Trapezoidal Shaped Conduit Using the Rough Model Method (Part 2), *Appl. Mech. Mater.*, Vols. 580-583, 1828-1841.
- ACHOUR B., SAHTAL S. (2014). The Rough Model Method (RMM). Application to the Computation of Normal Depth in Circular Conduit, *OpenCivil Eng. J.*, Vol. 8, 57-63.
- CHOW V.T. (1973). *Open channel hydraulics*, McGraw Hill, New York.
- COLEBROOK C.F. (1939). Turbulent Flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition Between the Smooth and Rough Pipe laws, *J. Inst. Civil Eng.*, Vol. 11, no4, 133-156.

- DARCY H. (1854). Sur les recherches expérimentales relatives au mouvement des eaux dans les tuyaux, *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, n°38, 1109-1121.
- FRENCH H. (1986). *Open Channel Hydraulics*, McGraw Hill, New York.
- KOUCHAKZADEH S., VATANKHAH A.R. (2007). Discussion of "Exact solutions for normal depth problem" by Prabhata K. Swamee and Pushpa N. Rathie, *J. Hydraul. Res.*, Vol. 45, n°4, 567-571.
- LAKEHAL, M., ACHOUR, B. (2014). Calcul de la profondeur normale dans une conduite ovoïdale par la méthode du modèle rugueux. *Larhyss Journal*, 101-113.
- SINNIGER R.O., HAGER W.H. (1989). *Constructions Hydrauliques*, Presses Polytechniques Romandes, (1989).
- SRIVASTAVA R. (2006). Discussion of "Exact solutions for normal depth problem" by Prabhata K. Swamee and Pushpa N. Rathie', *J. Hydraul. Res.*, Vol. 44, n°3, 427-428.
- SWAMEE P.K. (1994). Normal-depth equations for irrigation canals, *J. Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 120, n°5, 942-948.
- SWAMEE P.K., RATHIE P.N. (2004). Exact solutions for normal depth problem, *J. Hydraul. Res.*, Vol. 42, n°5, 541-547.
- VALIANI, A., CALEFFI, V. (2009). Depth-energy and depth-force relationships in open channel flows. II: Analytical findings for power-law cross-sections. *Adv. Water Resour.*, 32(2), 213–224.
- VATANKHAH, A.R. (2014). Normal depth in power-law channels. *Journal of hydrologic engineering*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001083, 06014008-5.