

Vitesse de frottement associée à un écoulement non uniforme et une rugosité relative intermédiaire

Friction velocity associated to a non-uniform flow and an intermediate scale roughness

HOSSEIN AFZALIMEHR et FRANÇOIS ANCTIL (Auteur correspondant.), *Département de génie civil, Université Laval, Sainte-Foy, Qc, CANADA G1K 7P4, Téléphone : 1-418-656-3653, Télécopieur : 1-418-656-2928, Courriel : francois.anctil@pci.ulaval.ca*

RÉSUMÉ

Ce travail a pour objectif l'étude expérimentale de la résistance associée à un écoulement non uniforme dans un canal hydraulique à lit de cailloux, procurant une rugosité relative intermédiaire. La vitesse de frottement est évaluée puis étudiée pour douze scénarios d'écoulements accélérés et décélérés. Quatre méthodes d'évaluation sont comparées : tension de Reynolds, loi logarithmique, loi parabolique et approche globale. Elles sont toutes essentiellement en accord les unes avec les autres. La forme des profils de la vitesse longitudinale moyenne observée est semblable à celle rapportée dans la littérature pour des écoulements non uniformes sur lit de gravier et de petites rugosités relatives. Les écoulements accélérés produisent des vitesses de frottement plus faibles que les écoulements décélérés, ce qui est cette fois en contradiction avec les observations rapportées dans la littérature pour des écoulements sur lit de gravier et de petites rugosités relatives.

ABSTRACT

This work consists of an experimental study of the resistance associated with non-uniform flows over cobble-bed channels, leading to an intermediate scale roughness. Friction velocity is estimated for twelve cases of accelerating and decelerating flows. Four estimation methods are compared: Reynolds stress, logarithmic law, parabolic law and a global approach. They are all in close agreement. The observed mean longitudinal velocity profiles are consistent with observations reported in the literature for non-uniform flows over gravel-bed channels with small relative roughness. Accelerating flows produce smaller friction velocities than decelerating flows, which is contrary to observations reported in the literature.

Introduction

La résistance que rencontre un écoulement a une profonde influence sur la distribution de la vitesse au sein d'un cours d'eau. Cette résistance est encore aujourd'hui difficile à observer et même à conceptualiser (Neill et Hey, 1982). Il est souvent plus simple, et surtout plus pratique, d'étudier la conséquence de cette résistance, soit le profil de la vitesse longitudinale à une section transversale donnée.

Il existe peu d'études qui décrivent la résistance offerte par des lits composés de matériau grossier tels les cailloux, particulièrement alors que l'écoulement est non uniforme (Graf et Altinakar, 1993). Le coefficient de résistance de Darcy-Weisbach f reste applicable à de tels cas. Ce coefficient est lié à la vitesse longitudinale moyenne du profil \bar{U} , de la façon suivante

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{\bar{U}}{u_*}, \quad (1)$$

où u_* est la vitesse de frottement. La non-uniformité de l'écoulement se reflète alors sur la valeur de la vitesse de frottement.

Les études inventoriées, portant sur l'estimation de la vitesse de frottement pour des écoulements non uniformes sur lit de gravier ou de cailloux, – la distinction entre gravier et cailloux varie beaucoup d'une classification à une autre – sont toutes contraintes à une rugosité relative h/d_{50} supérieure à 4, où h est la profondeur de l'écoulement et d_{50} est la granulométrie médiane du lit. Par exemple, Song et Graf (1994) ont travaillé avec un d_{50} de 12.3 mm et une rugosité relative oscillant entre 10.00 et 16.26. Kironoto et Graf (1995) ont utilisé un d_{50} de 23.0 mm et une rugosité relative variant entre 7.13 et 15.47.

Afzalimehr et Anctil (1999; 2000) ont choisi un d_{50} de 25.4 mm et des rugosités relatives entre 8.78 et 15.43. À la connaissance des auteurs, il n'existe aucune étude pour des rugosités relatives inférieures à 4. Bathurst (1985) a pourtant défini les rugosités relatives entre 1 et 4 comme une échelle intermédiaire dont le comportement hydraulique diffère de celui de la petite échelle, définie comme les rugosités relatives supérieures à 4. Mentionnons que selon Simons et Sunturk (1992) l'échelle intermédiaire ne permet pas le développement d'une solution analytique. La présente étude a pour objectif premier d'étudier expérimentalement la résistance associée à un écoulement non uniforme dans un canal hydraulique à lit de cailloux, procurant une rugosité relative intermédiaire. Pour ce faire, la vitesse de frottement est évaluée puis étudiée pour différents scénarios d'écoulements non uniformes. Il existe cependant plusieurs méthodes pour estimer la vitesse de frottement à partir d'observations. Le second objectif de cette étude est de comparer plusieurs de ces approches, notamment celle découlant du profil de la tension de Reynolds et celles reposant sur l'interprétation du profil de la vitesse longitudinale moyenne. Une méthode globale reposant sur l'équation de Saint-Venant est également considérée. Des objectifs corollaires consistent en l'observation du profil de la vitesse longitudinale et en la validation de la loi de la paroi.

Ce document est structuré de façon à décrire dans un premier temps la logistique expérimentale. La vitesse de frottement est ensuite établie à partir des profils de la tension de Reynolds, suivie d'une discussion. Ces valeurs serviront de référence pour les comparaisons avec les méthodes basées sur le profil de la vitesse longitudinale et la méthode globale. La constante de von Kármán est également étudiée, puis une conclusion est proposée.

Revision received July, 1999. Open for discussion till August 31, 2000.

Description des essais

Les essais sont effectués dans un canal hydraulique de 8.8 m de longueur et de 0.6 m de largeur et de profondeur. Les flancs du canal sont de verre et le fond est recouvert de cailloux arrondis tirés d'un cours d'eau naturel. Le diamètre médian des cailloux est de 80 mm (Wolman, 1954). La pente du lit est ajustée manuellement (-0.020, -0.010, -0.007, 0.007, 0.010 et 0.020) de manière à produire des écoulements tant accélérés que décélérés. Au total, douze profils sont recueillis au centre de la section transversale située 6,9 m en aval de l'entrée du canal. La profondeur de l'écoulement est maintenue entre 0.210 et 0.332 m, produisant des rugosités relatives intermédiaires oscillant entre 2.62 et 4.15.

La non-linéarité est vérifiée par la mesure de la profondeur de l'écoulement aux sections transversales situées 2 et 4 m en amont de la section à l'étude. Des profils supplémentaires de la vitesse longitudinale ont également été recueillis en amont de la section à l'étude afin de s'assurer que l'écoulement soit bien développé.

Le tableau 1 propose une compilation des principaux paramètres observés : la pente du lit S_0 , le débit Q , la profondeur de l'écoulement h , la variation longitudinale de la profondeur de l'écoulement dh/dx , la vitesse longitudinale moyenne du profil \bar{U} , la vitesse longitudinale maximale du profil U_{max} , le nombre de Froude F_r , le nombre de Reynolds R_e et la température de l'eau T . La mesure des trois composantes de la vitesse de l'écoulement est effectuée à l'aide d'un *SonTek Acoustic Doppler Velocimetre* (ADV), configuration de laboratoire. La vitesse d'échantillonnage est de 25 Hz et la période d'échantillonnage choisie est d'environ 328 s (8192 échantillons).

Tableau 1. Paramètres expérimentaux.

Série	S_0	Q (m ³ s ⁻¹)	h (m)	dh/dx	\bar{U} (m s ⁻¹)	U_{max} (m s ⁻¹)	F_r	R_e	T (°C)
1	-0.020	0.0523	0.210	-0.02236	0.4163	0.5313	0.2900	3.2×10^5	17.0
2	-0.020	0.0390	0.210	-0.02130	0.3095	0.3882	0.2156	2.4×10^5	16.5
3	-0.010	0.0544	0.292	-0.01050	0.3106	0.4333	0.1835	3.4×10^5	17.0
4	-0.010	0.0364	0.292	-0.01030	0.2080	0.2958	0.1229	2.2×10^5	17.0
5	-0.007	0.0391	0.332	-0.00720	0.1963	0.2690	0.1088	2.5×10^5	19.0
6	-0.007	0.0530	0.332	-0.00730	0.2663	0.4094	0.1476	3.5×10^5	20.0
7	0.020	0.0369	0.242	0.02036	0.2538	0.3636	0.1647	2.4×10^5	20.0
8	0.020	0.0835	0.242	0.02218	0.5749	0.7640	0.3731	5.5×10^5	20.0
9	0.007	0.0541	0.282	0.00701	0.3198	0.4800	0.1923	3.7×10^5	21.0
10	0.010	0.0646	0.272	0.01022	0.3959	0.6100	0.2424	4.3×10^5	20.0
11	0.010	0.0729	0.272	0.01020	0.4465	0.7040	0.2733	4.8×10^5	20.0
12	0.007	0.0903	0.282	0.00701	0.5340	0.7384	0.3211	6.1×10^5	21.0

Il est toujours difficile d'établir la position effective du niveau de référence $z = 0$ (Hinze, 1975). Selon Nezu et Nakagawa (1993), des ajustements oscillant entre $0.15d_{50}$ et $0.27d_{50}$ ont été recensés dans la littérature. Pour cette étude, l'ajustement ω est établi à $0.15d_{50}$ sous le plan passant par le sommet des cailloux. Pour ce faire, la régression entre les vitesses moyennes U des profils et $\ln((z + \omega)/d_{50})$ est établie. La sélection optimale de ω repose sur le coefficient de détermination de cette régression, afin que le profil de la vitesse longitudinale tende vers une distribution logarithmique – des valeurs supérieures à 97% ont été obtenues pour ce coefficient de détermination.

Tension de Reynolds

La tension associée au transport vertical de la quantité de mouvement s'écrit, en suivant l'approche proposée par Reynolds,

$$\tau = \mu \frac{\partial U}{\partial z} - \rho \overline{uw} \quad (2)$$

où μ est la viscosité dynamique, u and w sont les composantes longitudinale et verticale de la vitesse de l'écoulement, z est la distance verticale depuis le niveau de référence, et ρ est la masse volumique du fluide. Les lettres majuscules et minuscules indiquent respectivement une moyenne (en un point) et la déviation depuis cette moyenne; une barre supérieure identifie une moyenne dans le temps. Puisqu'un écoulement à surface libre entraîne le développement d'une couche de cisaillement d'intensité variable selon la verticale – en opposition à la couche à flux constant au pied de l'atmosphère – la valeur en surface τ_0 est interpolée à partir des tensions observées sur l'ensemble de la profondeur d'eau. En pratique, le paramètre recherché est la vitesse de frottement u_* définie

$$\tau_0 \equiv \rho u_*^2. \quad (3)$$

Les observations tirées d'un ADV sont perturbées par du bruit Doppler qui cause une déviation, dans les hautes fréquences, de la loi des "-5/3" de Kolmogorov (e.g. Tennekes et Lumley, 1972), et ce tout particulièrement pour les composantes longitudinale et transversale de la vitesse. Puisque la présence de ce bruit affecte la précision de l'estimation de la vitesse de frottement, la procédure de correction proposée par Nikora et Goring (1998) est considérée. Elle consiste en l'exploitation d'observations effectuées dans un seau d'eau tirée du canal. On suppose alors que ces observations sont uniquement constituées de bruit Doppler, puisque l'écoulement est alors bien entendu nul.

L'étude de l'ensemble des données recueillies révèle que le bruit Doppler n'est pas constant et varie d'une série d'observations à une autre, et même au sein d'un profil. Il semble donc préférable de ne pas appliquer une correction univoque à toutes les données, tel que proposé par Nikora et Goring (1998). Les corrections nécessaires pour cette étude ont été effectuées manuellement en tronquant la section bruitée des co-spectres, puisque l'effet du bruit se fait sentir au-delà des fréquences les plus énergétiques de la covariance des composantes longitudinale et verticale de la vitesse de l'écoulement.

Notons que tous les estimateurs spectraux illustrés (40 degrés de liberté) ont été évalués par transformée rapide de Fourier depuis un seul bloc de 8192 observations et une fenêtre Blackman-Harris à 4 paramètres (Harris, 1978), afin de réduire le coulage.

Avant de procéder à l'établissement de la vitesse de frottement, les trois composantes de la vitesse ont été pivotées de manière à ce que $W=0$ et $V=0$ (V est la vitesse latérale moyenne en un point). Cette correction a pour objectif de compenser les petits écarts avec un alignement idéal de l'ADV dans le laboratoire. Il

faut toutefois s'assurer de l'absence de courant secondaire dans le canal avant de procéder à un tel ajustement. Pour cette étude, des écarts d'alignement de 1 ou 2 degrés ont eu plus d'impacts sur la vitesse de frottement que les corrections associées au bruit Doppler.

Interprétation

Il a été montré (e.g. Afzalimehr et Anctil, 1999) qu'à la paroi ($z=0$) l'équation de la quantité de mouvement d'un écoulement permanent se réduit à

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial z}, \quad (4)$$

où p est la pression, liant le signe de la variation de τ au gradient longitudinal de la pression. Ainsi, pour un écoulement décéléré, alors que la pression croît avec l'écoulement (la vitesse décroît), la variation de τ à la paroi doit être positive. D'autre part, puisque la tension de Reynolds tend vers zéro en s'approchant de la surface libre, la valeur maximale doit donc survenir entre ces deux extrêmes, imposant une forme convexe au profil vertical de la tension de Reynolds (figure 1a). À l'opposé, la pente de τ à la paroi est négative pour les écoulements accélérés, puisque le gradient de pression décroît avec l'écoulement (la vitesse croît). La valeur maximale doit alors se produire à la paroi, imposant une forme concave au profil vertical de la tension de Reynolds (figure 1b). Des profils semblables ont été observés par Song et Graf (1994), Kironoto et Graf (1995), et Afzalimehr et Anctil (1999; 2000) pour de petites rugosités relatives.

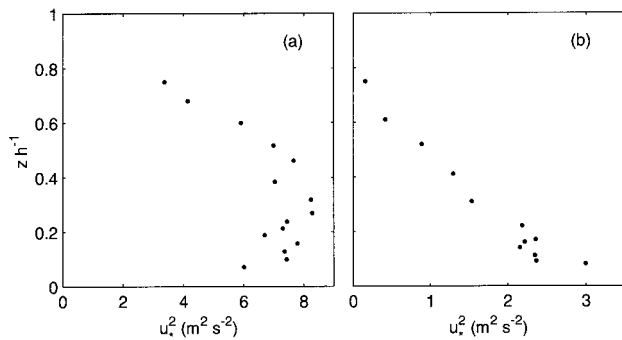


Fig. 1. Profils de la tension de Reynolds. Série 7 écoulement décéléré (a) et série 5 écoulement accéléré.

Les vitesses de frottement tirées des profils de la tension de Reynolds sont compilées au tableau 2. Il appert que les écoulements accélérés (pentes du lit négatives) produisent des vitesses de frottement plus faibles que les écoulements décélérés, ce qui est en contradiction avec la théorie de la couche limite. Un comportement opposé a également été rapporté par Kironoto et Graf (1995) et Afzalimehr and Anctil (1999; 2000) pour des écoulements sur lit de gravier et de petites rugosités relatives. Ce dernier point semble déterminant ici, puisque la présente étude porte sur des rugosités relatives intermédiaires. Cette différence semble déterminante, comme l'ont proposé Simons and Sunturk (1992) : les processus physiques associés à la résistance à un

écoulement se modifient lorsque la rugosité relative descend sous une valeur de 4.

Tableau 2. Résultats expérimentaux.

Série	X	κ	S_y	$u_* \text{ (m s}^{-1}\text{)}$			
				Tensions de Reynolds	Logarithmique	Parabolique	globale
1	0.22	0.49	0.00048	0.0362	0.0294	0.0337	0.0314
2	0.19	0.43	0.00031	0.0224	0.0208	0.0200	0.0253
3	0.19	0.41	0.00015	0.0225	0.0221	0.0215	0.0205
4	0.18	0.47	0.00014	0.0189	0.0162	0.0170	0.0203
5	0.26	0.29	0.00011	0.0172	0.0236	0.0200	0.0193
6	0.13	0.37	0.00014	0.0218	0.0238	0.0248	0.0214
7	0.19	0.39	0.00019	0.0226	0.0234	0.0269	0.0214
8	0.2	0.40	0.00091	0.0434	0.0432	0.0509	0.0464
9	0.17	0.33	0.00025	0.0296	0.0364	0.0348	0.0263
10	0.15	0.39	0.00038	0.0336	0.0343	0.0398	0.0319
11	0.13	0.46	0.00056	0.0408	0.0356	0.0429	0.0387
12	0.22	0.36	0.00071	0.0542	0.0604	0.0523	0.0444

Vitesse longitudinale moyenne

Les écoulements à surface libre se développent en deux couches distinctes : une couche intérieure pour laquelle le profil de la vitesse longitudinale moyenne peut être approximé par une relation logarithmique et une couche extérieure pour laquelle le profil épouse plutôt une relation parabolique. Ces propriétés types peuvent être exploitées pour établir une vitesse de frottement à partir d'un profil observé de la vitesse longitudinale moyenne. Une telle approche a l'avantage de reposer sur des observations plus faciles à obtenir que celles nécessaires au calcul du profil de la tension de Reynolds. Cette section traite de ces méthodes et propose une comparaison avec les résultats tirés des profils de la tension de Reynolds.

Méthode logarithmique

La méthode logarithmique (Clauser, 1956) repose sur la description suivante du profil de la vitesse longitudinale moyenne, connue sous le nom de loi de la paroi :

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z + \omega}{d_{50}} + E \quad (5)$$

où κ est la constante de von Kármán (une valeur de 0.4 est adoptée), ω est le coefficient d'ajustement ($\omega = 0.15d_{50}$), et E est une constante. Il s'agit alors d'établir les paramètres α et β de la régression

$$U = \alpha \ln \frac{z + \omega}{d_{50}} + \beta \quad (6)$$

et de combiner ces résultats avec l'équation (5), pour en déduire la vitesse de frottement

$$u_* = \kappa \alpha. \quad (7)$$

Reste à établir la limite supérieure de la couche intérieure des écoulements à surface libre, afin d'identifier la partie du profil de la vitesse longitudinale qu'il faut utiliser pour ce calcul. Cette

limite est souvent établie à $X=z/h=0.2$ (e.g. Nezu et Nakagawa, 1993). Des valeurs oscillant entre 0.13 and 0.26 ont toutefois été observées pour cette étude (tableau 2). La figure 2 illustre le bien fondé de cette approche lorsque appliquée à la couche intérieure de l'écoulement, les observations de la couche extérieure s'éloignant systématiquement de la relation logarithmique.

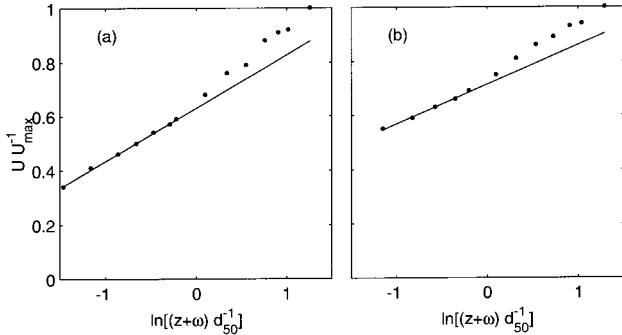


Fig. 2. Applicabilité de la méthode logarithmique. Série 9 écoulement décéléré (a) et série 3 écoulement accéléré.

Les vitesses de frottement établies à partir de la méthode de Clauser sont compilées au tableau 2, au côté de celles déduites de profils de la tension de Reynolds. Une comparaison de ces deux approches est illustrée à la figure 3a. Les deux séries de résultats concordent bien, considérant la variabilité intrinsèque à ce genre d'observations. Les écarts varient de 2 à 37% et le coefficient de détermination à la figure 2 s'établit à 0.87. Ces proches résultats viennent confirmer l'ajustement du niveau de référence $\omega = 0.15d_{50}$ et le choix $\kappa = 0.40$ pour la constante de von Kármán – ce dernier élément est discuté à nouveau plus loin dans le document.

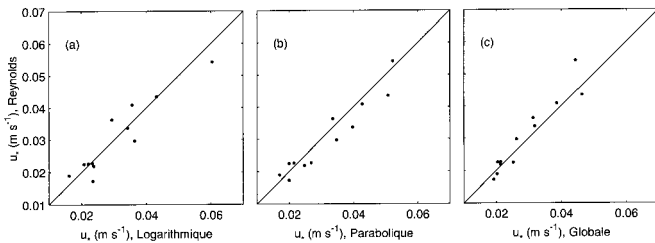


Fig. 3. Comparaison des vitesses de frottement déduites des profils de la tension de Reynolds et de la méthode logarithmique (a), de la méthode parabolique (b) et de la méthode globale (c).

Méthode parabolique

L'utilisation expérimentale de relations paraboliques est courante pour la description des écoulements au sein de couches limites. Par exemple, Hinze (1975) montre qu'une relation parabolique décrit adéquatement les données disponibles dans la littérature pour la couche extérieure des écoulements à surface libre. Citons également Hama (1954) qui montra que les observations recueillies par Clauser épousent la relation parabolique

$$\frac{U_{max} - U}{u_*} = 9.6 \left(1 - \frac{z + \omega}{h}\right)^2, \quad (8)$$

pour laquelle U_{max} est la vitesse longitudinale maximale du profil. Suivant Hama, Vedula et Achanta (1985) ont suggéré, pour un écoulement sur lit de sable et de petites rugosités relatives, de décrire le profil de la vitesse longitudinale de la couche intérieure de l'écoulement ($0 < z/h \leq X$) par une relation logarithmique

$$\frac{U_{max} - U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z + \omega}{h}\right) + E_1, \quad (9)$$

et celui de la couche extérieure ($X < z/h \leq 1$) par une relation parabolique

$$\frac{U_{max} - U}{u_*} = \lambda \left(1 - \frac{z + \omega}{h}\right)^2, \quad (10)$$

où E_1 est une constante d'intégration.

La validité de la relation parabolique pour la couche extérieure de l'écoulement est illustrée à la figure 4. Puisque le profil de la vitesse longitudinale est régulier et continu à la frontière X des deux couches, ces deux relations et leurs dérivées peuvent être combinées en ce point, et produire les égalités suivantes

$$\lambda = \frac{1}{\kappa 2X(1-X)} \quad (11)$$

et

$$E_1 = \frac{1}{\kappa} \left(\frac{1-X}{2X} + \ln X\right). \quad (12)$$

L'estimation de la vitesse de frottement u_* implique donc, dans un premier temps, la détermination de X et le calcul de λ . La seconde étape consiste en l'estimation par régression des paramètres Ω et ϕ tirés de la relation

$$\frac{U}{U_{max}} = -\Omega \left(1 - \frac{z + \omega}{h}\right)^2 + \phi, \quad (13)$$

liée à l'équation (10) modifiée de la façon suivante :

$$\frac{U}{U_{max}} = -\frac{\lambda u_*}{U_{max}} \left(1 - \frac{z + \omega}{h}\right)^2 + 1. \quad (14)$$

Tous les éléments sont alors réunis pour établir

$$u_* = \frac{\Omega}{\lambda} U_{max}. \quad (15)$$

Les vitesses de frottement déduites de la relation parabolique sont compilées au tableau 2. Ces résultats sont essentiellement comparables à ceux déduites des profils de la tension de Reynolds (figure 3b), avec un coefficient de détermination de 0.91 et des écarts oscillant entre 1 et 19%. Afzalimehr et Anctil (1999) ont montré que la méthode reposant sur la relation parabolique, tout comme celle fondée sur les profils de la ten-

sion de Reynolds, est beaucoup moins sensible à l'ajustement du niveau de référence que celle de Clauser, ce qui lui confère un avantage certain.

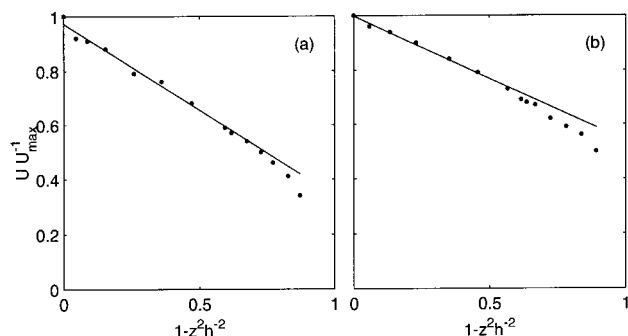


Fig. 4. Applicabilité de la méthode parabolique. Série 9 écoulement décéléré (a) et série 4 écoulement accéléré.

Méthode globale

Un modèle simple a été proposé (e.g. Chow, 1959) pour établir la vitesse de frottement de manière globale sans disposer d'un profil de la vitesse longitudinale. Ce modèle lie la vitesse de frottement u_* à l'accélération gravitationnelle g , à la profondeur de l'écoulement h et à la pente de frottement S_f de la manière suivante

$$u_* = \sqrt{ghS_f}. \quad (16)$$

Pour les écoulements permanents et uniformes, la pente de frottement est identique à la pente du lit S_0 : c'est le modèle à gradient nul. Pour les écoulements permanents et non uniformes, la pente de frottement peut être établie en appliquant la relation suivante reposant sur l'équation de Saint-Venant (e.g. Afzalimehr et Anctil, 1999)

$$S_f = S_0 - \frac{dh}{dx}(1 - F_r^2). \quad (17)$$

Le tableau 2 regroupe également les vitesses de frottement déduites de la méthode globale. Ces résultats concordent essentiellement avec ceux tirés des profils de la tension de Reynolds, avec un coefficient de détermination de 0.91 et des écarts variant de 2 à 18% (figure 3c). Une telle approche macroscopique ne permet toutefois pas d'élucider comment un gradient de pression influence la vitesse de frottement. De plus, cette approche est fonction de la variation longitudinale de la profondeur de l'écoulement dh/dx , un paramètre passablement plus difficile à observer dans un cours d'eau naturel qu'en laboratoire.

Constante de von Kármán

L'estimation de la vitesse de frottement depuis un profil de la vitesse longitudinale moyenne exige une connaissance préalable de la constante de von Kármán, peu importe que l'on opte pour une approche reposant sur la relation logarithmique et la

couche intérieure de l'écoulement ou l'approche parabolique et la couche extérieure de l'écoulement. Il existe une vaste littérature sur la constante de von Kármán, couvrant un grand nombre de scénarios d'écoulements et de granulométries du lit. Par exemple, citons, Nezu et Rodi (1986) qui ont obtenu $\kappa = 0.41$ pour une surface lisse et Kironoto et Graf (1995) qui ont obtenu $\kappa = 0.4$ pour un lit de gravier.

L'équation (7) permet la détermination de la constante de von Kármán, en recourant à la vitesse de frottement u_* établie à l'aide des profils de la tension de Reynolds. Ces résultats sont placés au tableau 2, pour une valeur moyenne de 0.4 et un écart-type de 0.058. De tels résultats montrent que cette constante est bien la même pour des rugosités relatives petites ou intermédiaires.

Conclusion

Des essais expérimentaux ont été réalisés afin d'établir la vitesse de frottement d'écoulements non uniformes accélérés et décélérés sur lit de cailloux, pour une rugosité relative intermédiaire. Les analyses et interprétations ont mené aux résultats suivants.

La forme des profils de la vitesse longitudinale moyenne observée est concave pour les écoulements accélérés et convexe pour les écoulements décélérés, tel que décrit dans la littérature pour des écoulements non uniformes sur lit de gravier et de petites rugosités relatives.

Les écoulements accélérés produisent des vitesses de frottement plus faibles que les écoulements décélérés, ce qui est en contradiction avec les observations rapportées dans la littérature pour des écoulements sur lit de gravier et de petites rugosités relatives. L'échelle des rugosités relatives influence donc largement les vitesses de frottement observées.

Les vitesses de frottement tirées des profils de la vitesse longitudinale moyenne concordent avec celles déduites des profils de la tension de Reynolds. Cette dernière méthode, considérée dans cette étude comme référence, exige toutefois une instrumentation plus sophistiquée et des manipulations plus longues que ses alternatives, ce qui n'est pas toujours facile à effectuer en nature. Parmi les méthodes reposant sur les profils de la vitesse longitudinale moyenne, la méthode de la relation parabolique a pour principaux avantages d'être peu sensible à l'ajustement du niveau de référence et de reposer sur la couche extérieure de l'écoulement (passablement plus épaisse que la couche intérieure).

La méthode globale proposée dans cette étude mène également à des résultats comparables à ceux tirés des profils de la tension de Reynolds. Il faut toutefois être conscient que cette approche ne permet pas une meilleure compréhension du phénomène de résistance à l'écoulement. Cette méthode repose de plus sur la variation longitudinale de la profondeur de l'écoulement dh/dx , un paramètre difficile à observer avec précision en nature.

Remerciements

Ces travaux ont été rendus possible grâce à une subvention accordée au second auteur par le Fonds pour la Formation de Chercheurs et l'Aide à la Recherche et par une bourse accordée au premier auteur par le gouvernement iranien.

Références

1. AFZALIMEHR, H. et ANCTIL, F. (1999), Velocity distribution and shear velocity behaviour of decelerating flows over a gravel bed, *Can. J. Civil. Eng.*, 26, 468-475.
2. AFZALIMEHR, H. et ANCTIL, F. (2000), Accelerating bed shear stress in gravel-bed channels, *Hydrol. Sci. J.*, 45, 113-124.
3. BATHURST, J.C. (1985), Flow resistance estimation in mountain rivers, *J. Hydr. Eng.*, 111, 625-643.
4. CHOW, V.T. (1959), *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.
5. CHAUSER, F.H. (1956) The turbulent boundary layer, *Adv. App. Mech.*, 4, 1-51.
6. GRAF, W.H. et ALTINAKAR, M. (1993), *Hydraulique fluviale, Tome I*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
7. HAMA, F.R. (1954), Boundary-layer characteristics of smooth and rough surfaces, *Trans. Soc. Naval Arch. Marine Engng*, 62, 333-358.
8. HARRIS, F.J. (1978), On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform, *Proc. IEEE*, 66, 51-83.
9. HINZE, J.O. (1975), *Turbulence*, 2nd edn. McGraw-Hill, New York.
10. KIRONOTO, B.A. et GRAF W.H. (1995), Turbulence characteristics in rough non-uniform open-channel flow, *Proc. Instn Civil Engrs Wat., Marit. & Energy*, 112, 336-348.
11. NEILL, C.R. et HEY, R.D. (1982), Gravel-bed rivers: Engineering problems, *Gravel-bed Rivers*, R.D. HEY, J.C. BATHURST et C.R. THORNE eds., John Wiley & Sons, New York, pp. 15-25.
12. NEZU, I. et RODI, W. (1986), Open channel flow measurements with a laser doppler anemometer, *J. Hydr. Eng.*, 112, 335-355.
13. NEZU, I. et NAKAGAWA, H. (1993), *Turbulence In Open Channel Flows*, IAHR Monograph. A. A. Balkema Publishers, Rotterdam.
14. NIKORA, V.I. et GORING, D.G. (1998), ADV measurements of turbulence: Can we improve their interpretation?, *J. Hydr. Eng.*, 124, 630-634.
15. SIMONS, D.B. et SUNTURK, F. (1992), *Sediment Transport Technology*. Water Resources Publications, Fort Collins.
16. SONG, T. et GRAF W.H. (1994), Non-uniform open-channel flow over a rough bed, *J. Hydroscience Hydraulic Engng*, 12, 1-25.
17. TENNEKES, H.J. et LUMLEY, L. (1972) *A First Course In Turbulence*, The MIT Press, Cambridge.
18. VEDULA, S. et ACHANTA, R.R. (1985), Bed shear from velocity profiles: A new approach, *J. Hydr. Div.*, 111, 131-143.
19. WOLMAN, M.G. (1954), A method of sampling coarse river bed material, *Trans. Geophys. Union*, 35, 951-956.