

**APPLICATION DE LA VELOCIMETRIE DOPPLER ULTRASONORE (VDU)
AUX ECOULEMENTS A SURFACE LIBRE TURBULENTS
APPLICATION OF THE ULTRASONIC DOPPLER VELOCIMETRY
TO THE FREE SURFACE TURBULENT FLOW**

MIHOUBI M. K. Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C), UMR CNRS 6143, Université de Basse Normandie, Caen. mihkam@yahoo.fr ou mustapha-Kamel.mihoubi@unicaen.fr

BELORGEY M. Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C), UMR CNRS 6143, Université de Basse Normandie, Caen ; E-mail : belorgey@meca.unicaen.fr

LEVACHER D. Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C), UMR CNRS 6143, Université de Basse Normandie, Caen ; E-mail : daniel.levacher@unicaen.fr

KETTAB A. Ecole Nationale Polytechnique (ENP), 10, Avenue Hassen Badi El Harrach, Alger (16200), Algérie. E-mail : kettab@yahoo.fr

Résumé : Depuis longtemps, l'étude des fluctuations des vitesses turbulentes, des écoulements à surface libre dans les canaux ouverts a suscité un grand intérêt chez de nombreux chercheurs. En effet, l'étude des phénomènes générant de la turbulence au sein d'un écoulement peut mieux aider la compréhension de phénomènes complexes comme l'érosion et le transport solide. Les solutions techniques envisagées de telles études permettront une maîtrise de la conception des ouvrages hydrauliques et contribueront à une optimisation des coûts. Il s'avère que les développements technologiques des deux dernières décennies, ont permis de mettre en place des techniques de mesures de vitesse offrant plus des possibilités d'analyse plus précise. Actuellement les techniques de Vélocimétrie Doppler Laser (VDL), et de Vélocimétrie Doppler Ultrasonore (VDU), qui sont caractérisées par un caractère non intrusif et une analyse des volumes de mesures avec une grande précision spatio-temporelle. Le présent travail est une contribution à l'étude de l'établissement du profil des vitesses d'un écoulement permanent, turbulent à surface libre en canal par l'application de la vélocimétrie Doppler ultrasonore en mode pulsé, à l'aide de l'instrument DOP 1000 (Modèle 1032).

Mots clés : vélocimétrie, turbulence, VDU, Doppler, vitesse de frottement.

Abstract: Since a long time, the turbulent speed variation, in open canals, has given rise to a big interest to many researchers. In fact, the steady of phenomena generating from turbulence inside a flow can best help the comprehension of complex phenomena such as erosion and solid transport. The considered solutions will allow a mastery of the hydraulic works conception and will contribute to costs optimisation. It has been shown that the two last decades development has allow putting on speed measure techniques offering more precise analysis possibilities. Actually, the Laser Doppler Velocimetry (LDV) and the Ultrasonic Doppler Velocimetry (UDV) are characterized by a non-intrusive character and a measure volumes analysis with a great space and time precision. The present work is a contribution to the behaviour study of the speeds' profile and that of the friction coefficient of a free permanent and turbulent flow in a canal by the application Ultrasonic Doppler Velocimetry in pulsed mode using instrument DOP 1000 (Model 1032).

Key words: velocimetry, turbulence, UDV, flow, friction velocity

INTRODUCTION

La découverte des ultrasons et de la piézoélectricité a été un avènement pour l'ouverture d'un champ d'applications au domaine vibratoire inaudible. Les premières utilisations des ultrasons ont connu un grand succès dans le domaine médical, notamment dans la mesure de vitesses du sang dans les vaisseaux sanguins Wells (1969). Ensuite, les travaux célèbres du chercheur Takeda (1986), ont permis l'utilisation du principe dans la Vélocimétrie Doppler Ultrasonore (VDU) dans d'autres fluides.

Depuis, les systèmes basés sur la mesure par technique de VDU ont énormément évolués et de plus en plus utilisés en divers domaines de l'hydraulique (Lhermitte et Lemmin 1994 et Rolland 1995). Cette technique repose sur l'utilisation d'instrument qui fournirait la possibilité d'acquérir de l'information spatiale et temporelle sur les particules liquides sans pour autant faire des hypothèses simplificatrices, capable de fournir de façon significative des informations sur la vitesse et la turbulence d'un écoulement à surface libre.

Takeda (1995) et Soong *et al.*, (1999) ont été parmi les premiers à effectuer des travaux dans le domaine de la mécanique des fluides, spécialement liés aux problèmes de la turbulence, aux écoulements chargés et aux écoulements multiphasiques, suivant un panel de technique d'émission et de réception. En effet, il existe deux configurations comme mode de d'émission et de réception d'un signal Doppler ultrasonores à savoir :

- Avec un faisceau ultrasonore en mode continu : ce système est basé sur l'utilisation de deux transducteurs hémisphériques dans la même sonde, le premier étant destiné à émettre les ondes à une fréquence ultrasonore d'émission f_e et le second à les recevoir à la fréquence de réception $f+f_d$, où la fréquence du Doppler f_d pouvant être positive ou négative, suivant la direction du mouvement associé.

- Avec un faisceau ultrasonore en mode pulsé : il est différent de la configuration précédente, ce système permet de déterminer la distance des cibles responsable des échos Doppler et d'en mesurer leur vitesse. Le principe de mesurer de la vitesse d'une cible est basé sur l'émission en mode pulsé à des intervalles de temps fixes, au moyen d'une fréquence de répétition f_{PRF} (*PRF*, *abréviation de Pulse Repetition Frequency*), de trains d'ondes cohérentes de fréquence d'émission f_0 et de largeurs constantes T_{pulse} . Entre deux émissions successives, le même transducteur joue le rôle d'un récepteur.

L'estimation de la vitesse de la cible par la fréquence du Doppler est reconstituée à partir d'échantillons qui sont séparés dans le temps par T_{PRF} suivant le théorème de Nyquist. Le taux d'échantillonnage d'un signal ne peut être inférieur à deux fois la fréquence maximale contenue dans ce signal échantillonné.

Afin de procéder à la conversion numérique des signaux, on considère que la fréquence de Nyquist f_{Nyq} est liée à la fréquence de répétition (PRF) par la relation:

$$f_{Nyq} = \frac{f_{PRF}}{2} \quad (1)$$

La vitesse maximale suivant l'axe du faisceau ultrasonore égale à :

$$V_{us,max} = \pm \frac{f_{PRF} \cdot Cs}{4 f_e} = \frac{f_{PRF} \cdot \lambda_e}{4} \quad (2)$$

Il en résulte que la distance maximale d'exploration d_{max} se trouve, elle aussi conditionnée par la fréquence de répétition du pulse f_{PRF} exprimée par :

$$d_{\max} \leq \frac{T_{PRF} \cdot C_s}{2} \quad (3)$$

Les équations (2) et (3) permettent d'aboutir à la relation connue sous le nom de relation d'ambiguïté :

$$d_{\max} \cdot V_{us,\max} = \pm \frac{C_s^2}{8f_e} = \pm \frac{C_s \cdot \lambda_e}{8} \quad (4)$$

$V_{us,\max}$: vitesse maximale de la cible suivant l'axe du faisceau ultrasonore

d_{\max} : profondeur maximale d'exploration,

λ_e : longueur d'onde d'émission,

C_s : célérité du son

T_{PRF} : période de répétition des trains d'ondes ultrasonores.

PRINCIPE DU DOPPLER

Considérons une source ultrasonore immobile émettant des ondes à fréquence d'émission f_e et un récepteur se déplaçant à la vitesse v dans un milieu où la célérité des ondes acoustiques est C_s . Par convention, la vitesse est considérée positive quand la cible se déplace en direction du transducteur, et négative quand elle s'en éloigne. Si la trajectoire de la cible forme un angle θ par rapport à la direction de propagation des ondes ultrasonores, la fréquence des ondes perçues par la cible f_p est donnée par la relation suivante :

$$f_p = f_e \left[\left(1 \pm \frac{v \cos \theta}{C_s} \right) \right] \quad (5)$$

Si l'impédance acoustique de la cible est différente du milieu dans lequel elle se déplace, elle rétrodiffuse partiellement les ondes acoustiques. Elle peut, par conséquent, être assimilée à une source ultrasonore mobile. La fréquence des ondes rétrodiffusées f_r perçue par un transducteur immobile est égale :

$$f_r = \left[\left(\frac{C_s}{C_s \mp v \cos \theta} \right) \right] f_p \quad (6)$$

En combinant les équations (4) et (5), la fréquence des ondes reçues f_r est :

$$f_r = \left[\left(\frac{C_s \pm v \cos \theta}{C_s \mp v \cos \theta} \right) \right] f_e \quad (7)$$

L'écart de fréquence entre l'émission et la réception, donne le décalage en fréquence appelée fréquence Doppler, et égal :

$$f_d = f_e - f_r = \pm \frac{2v \cos \theta}{C_s} f_e \quad (8)$$

La vitesse selon l'axe du faisceau, émis par le transducteur, est déterminée en utilisant la fréquence du Doppler ultrasonore par la relation :

$$V_{us} = \frac{f_d C_s}{2f_e} \quad (7)$$

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif est constitué d'un canal d'une longueur totale de 3,5 m et de section rectangulaire de (0,10 m x 0,25 m), permettant d'effectuer des mesures de calibration de vitesse par le vélocimètre Doppler ultrasonore (figure1). Les parois et le fond du canal sont vitrés d'une épaisseur de 10 mm, permettant ainsi de faire des observations et mesures optiques, notamment par vélocimétrie laser (VDL), ou par vélocimétrie d'images de particules (PIV), ainsi que par une acquisition de séquences d'images vidéo par nappe laser.

Le canal est alimenté par un réservoir à charge constante en matériaux PVC de section carré de coté 0,30 m et 0,25 m de hauteur. L'arrivée d'eau se fait par un système de crépine, l'eau est tranquillisée par des plaques en géomembrane d'environ 5cm d'épaisseur. Dans le canal, le débit est contrôlé par un seuil réglable, le trop-plein d'eau est évacué vers le réservoir d'alimentation du canal. L'alimentation du canal est assurée par un circuit fermé au moyen d'une pompe de débit maximal 5,0 l/s.

Pour une meilleure linéarisation de l'écoulement et afin de réduire les effets de turbulence, deux cages de nid d'abeilles ont été installées avant la sortie du convergent. Un lit de sédiments matérialisé par des billes de verre, par une épaisseur de 20 mm. Afin d'assurer la continuité d'une part entre le fond lisse du canal en amont et d'autre part, le lit de sédiments, deux seuils à plan inclinés, en PVC, de 140 mm de longueur et de 20 mm de hauteur ont été prévus à cet effet. Ceci évite du lit sédimentaire.

Pour modéliser le fond mobile, il a été choisi des billes en verre transparentes de masse spécifique égale à 2570 kg/m³. La porosité du milieu interstitiel varie de 28,5% à 30%. L'uniformité des différents échantillons de billes utilisées (Tableau 1), est vérifiée par l'application des critères de Breusers et al (1991).

Tableau 1: Caractéristiques des billes en verres.

Tailles des billes ϕ (mm)	Diamètre médian D_{50} (mm)	$\frac{D_{95}}{D_5}$	$\sigma_g = \frac{D_{95}}{D_5}$
0,50 – 0,75	0,696	1,170	1,320
0,75 – 1,00	0,918	1,375	1,120
1,00 - 1,25	1,216	1,162	1,298
3,80 - 4,40	3,918	—	—

Les sondes ultrasonores sont des transducteurs de type piézoélectrique de tailles et de fréquences d'émission différentes. Le Tableau 2 récapitule les caractéristiques des sondes employées.

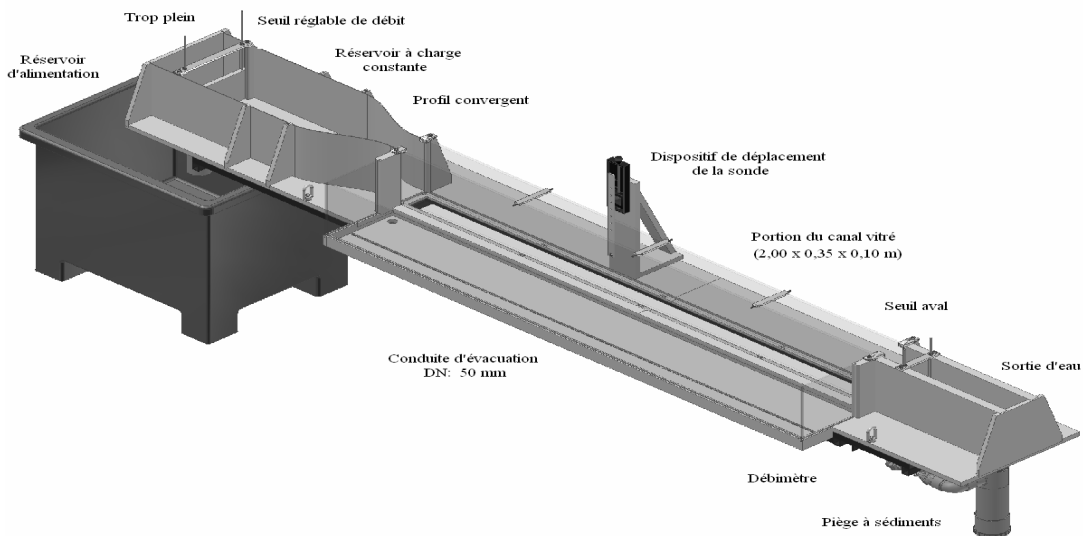


Fig. 1 : Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Tableau 2: Caractéristiques des sondes.

Type de sonde	Fréquence (MHz)	Diamètre actif (mm)	Longueur (mm)	Angle de divergence γ (°)	Pression maximale (bar)
TR0410RS	4	8	10	3,3	3,0
TR0208 LS	2	8	90	6,5	3,0

Pour obtenir des mesures fiables, l'emplacement judicieux de la sonde est impératif (Rolland, 1995). Dans le cas étudié, on propose de plonger la sonde dans le canal d'un angle α par rapport à la verticale de façon qu'elle affleure la surface de l'eau, d'environ de 2mm sans qu'elle n'entraîne des effets de sillage et tourbillons considérables voir la figure 2.

La vitesse suivant l'axe ultrasonore en fonction de l'emplacement de la sonde par rapport à l'écoulement est donnée par :

$$V_{us+} = v_+ \cos \alpha + u_+ \sin \alpha \quad (8)$$

$$V_{us-} = v_- \cos \alpha - u_- \sin \alpha \quad (9)$$

Par combinaison de deux équations précédentes (8) et (9) on peut déterminer les composantes u et v :

$$u = \frac{\bar{V}_{us+} - \bar{V}_{us-}}{2 \sin \alpha} \quad (10)$$

$$v = \frac{\bar{v}_{us+} + \bar{v}_{us-}}{2 \cos \alpha} \quad (11)$$

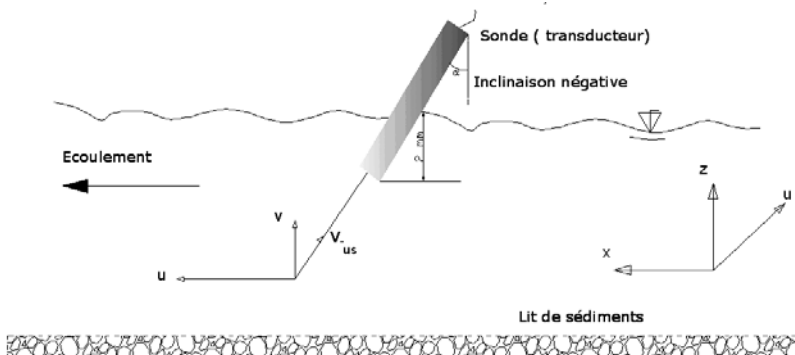


Fig. 2: Installation de la sonde de mesure dans le cas d'un fond rugueux

L'établissement des profils de vitesses a été effectué par deux types d'écoulement et deux positions angulaires avec un pas spatial de 25,0 cm comme suit :

- Ecoulement en eau claire : ($x_1= 81,5\text{ cm}$; $x_2= 106,5\text{ cm}$; $x_3= 131,5\text{ cm}$).
- Ecoulement lit de sédiments : ($x'_1= 89,0\text{ cm}$; $x'_2= 114,0\text{ cm}$; $x'_3= 139\text{ cm}$).

RESULTATS ET DISCUSSION

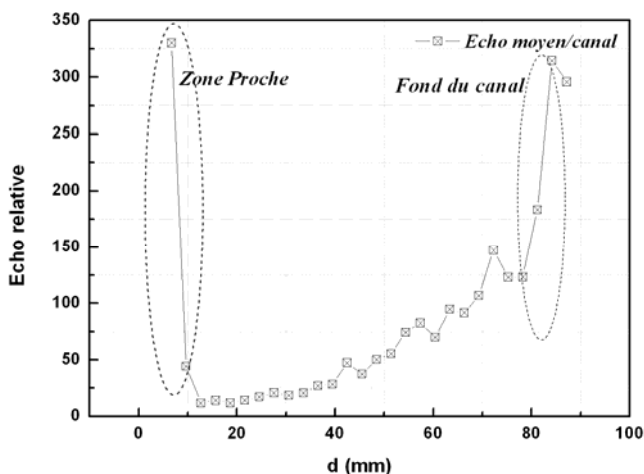
Pour matérialiser et caractériser l'influence du fond sur les mesures de vitesses dans leur voisinage immédiat, nous avons procédé à des mesures d'écho sans vitesse d'écoulement, c'est-à-dire en eau statique pour des différentes valeurs de la fréquence de répétition (PRF). Cette expérience a permis de localiser la zone proche de saturation du signal, située à la sortie du transducteur (sonde) et situer le fond du canal caractérisé avec le pic d'écho. Cette étude a permis aussi de mettre en évidence le choix de la PRF ainsi que l'influence de la résolution sur le volume de mesure qui se traduit par la profondeur d'exploration du vélocimètre (figure 3).

La figure 4, montre bien la symétrie des profils de vitesses suivant l'axe du faisceau ultrasonore, définie par la profondeur d'exploration d , et ce dans les deux orientations de la sonde par rapport à l'écoulement. Dans le cas du profil où la sonde est orientée dans le d'écoulement, on observe qu'il présente une légère déviation. Cette déviation s'explique par présence de faible sillage généré par la sonde au niveau de l'écoulement en surface.

Tableau 3. Récapitulatif des essais de mesures effectuées en canal.

Test	Q (l/s)	h (cm)	B/h ----	X (cm)	D ₅₀ (mm)	Fr ----	U (cm/s)	R _e x 10 ³ ----
ESC_24	0,57	13,3	0,75	106,5	—	0,080	9,20	136,56
ESC-24-	0,57	13,3	0,75	106,5	—	0,080	9,20	136,56
ES_25	0,57	13,3	0,75	114,0	3,918	0,081	9,20	136,56
ES-25-	0,57	13,3	0,75	114,0	3,918	0,081	9,20	136,56
ES_26+	0,63	13,1	0,76	139,0	1,216	0,077	8,78	128,37
ES_26-	0,63	13,1	0,76	139,0	1,216	0,077	8,78	128,37
ES_27	0,63	12,6	0,76	114,0	0,918	0,078	8,76	123,18
ES_27-	0,63	12,6	0,76	114,0	0,918	0,078	8,76	123,18
ES-28	0,63	12,0	0,77	139,0	0,696	0,073	8,0	107,14
ES_28-	0,63	12,9	0,77	139,0	0,696	0,073	8,0	107,14

ESC : Essai en eau claire ; ES : Essai avec lit de sédiments ; (+) : Angle d'inclinaison positif ; (-) Angle d'inclinaison négatif ; Q : débit du canal ; h : tirant d'eau ; B : largeur du canal ; X : position de la sonde ; U : vitesse d'écoulement en surface ; F : nombre de Froude, Re : nombre de Reynolds

**Fig. 3.** Matérialisation du fond du canal

Pour éliminer toutes les perturbations engendrées, il serait pratique, d'envisager la mise en place de la sonde dans une enceinte remplie d'eau protégée par un film Mylard et distant de la surface du plan d'eau de quelques millimètres.

La détermination des composantes de vitesses longitudinale et verticale a permis de distinguer le caractère de l'écoulement turbulent d'un fond rugueux par rapport à celui d'un fond lisse. L'effet de la rugosité est surtout marqué sur les composantes

verticale et horizontale en particulier au voisinage de la couche intérieure et de la sous couche visqueuse de l'écoulement (figures 5 et 6).

Dans le domaine de couche intérieure ($0,01 < \frac{z}{d} < 0,2$), la détermination de la vitesse de frottement pour un fond rugueux peut être évaluée par la méthode de Clauser (1956), connue sous le nom loi de la paroi :

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \text{Ln} \left[\left(\frac{z + z_o}{k_s} \right) \right] + E \quad (12)$$

u^* : vitesse de frottement,

z : hauteur déterminée à partir du sommet moyen des rugosités,

z_o : niveau de référence $0,15 \leq z_o \leq 0,25 k_s$,

κ : constante de von Kármán égale à 0,40,

k_s : la rugosité standard $k_s = D_{50}$.

E : constante déterminée graphiquement.

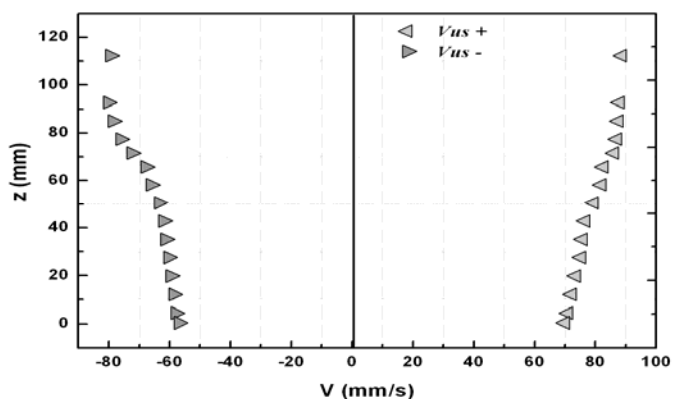


Fig. 4 Profils des vitesses moyennes suivant le l'axe du faisceau ultrasonore en présence du fond rugueux, cas des billes avec $D_{50} = 3,918$ mm

Il s'agit donc de déterminer les paramètres a et b de la droite de régression, tel que :

$$u = a \ln \left[\left(\frac{z + z_o}{D_{50}} \right) \right] + b \quad (13)$$

En tenant compte de l'équation (12), on peut en déduire la vitesse de frottement

$$u_* = a \kappa \quad (14)$$

La vitesse de frottement u_* obtenue est de l'ordre de 0,054 m/s. Si l'on compare cette valeur à celle déduite de la méthode du gradient (pente) d'énergie, $u_* = \sqrt{gR_h I} = 0,037$ m/s. Cette différence de valeur significative (figure7) résulte d'une part, par la présence de l'écho générée par la réflexion du fond du canal en verre, ainsi que celle des billes qui accentuent les problèmes de réflexion et d'autre part, il faut savoir que

la méthode du gradient répond aux conditions strictes d'un écoulement uniforme, c'est-à-dire on doit supposer l'égalité de la pente du radier et d'énergie ce qui n'est pas toujours évident (Graf et Altinakar, 1993). Par conséquent on ne peut se permettre de faire une validation des mesures.

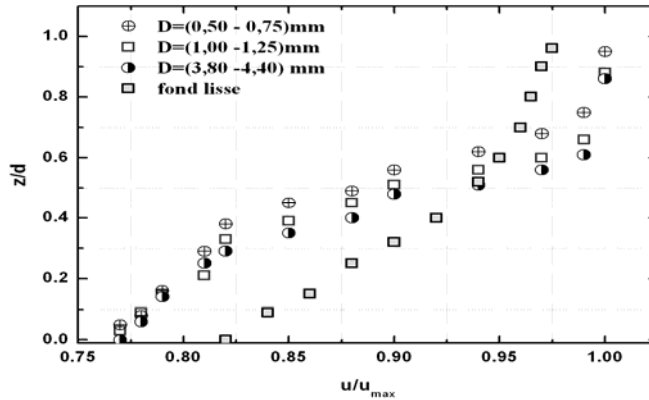


Fig. 5 Profils des vitesses longitudinales en fond rugueux

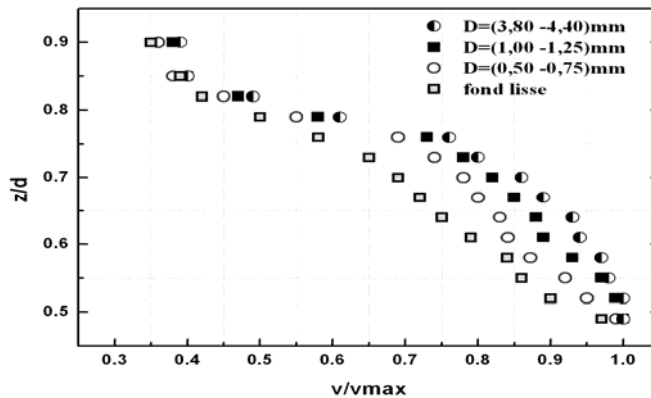


Fig. 6 Profils des vitesses verticales en présence du fond rugueux

Il est intéressant de se référer à d'autres méthodes, telles que la détermination de la vitesse moyenne à l'intérieur de la sous-couche visqueuse (Kirkgöz, 1989) ou bien par des mesures directes à l'aide d'une sonde de frottement.

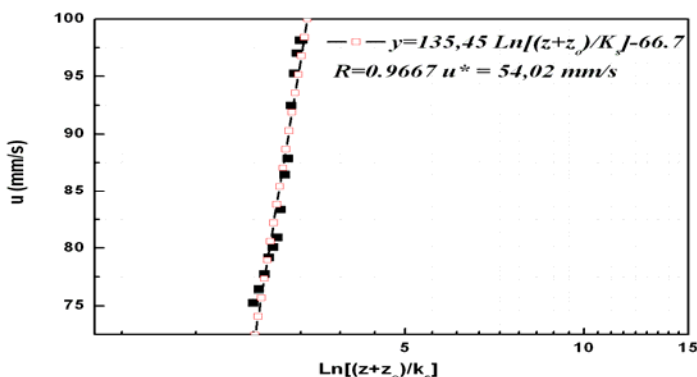


Fig. 7 Profil de vitesse sur fond rugueux suivant la loi de Clauser (1956).

CONCLUSION

Cette étude a permis de mettre en évidence les limites et préférences d'une instrumentation ultrasonore non intrusive dans les mesures d'écoulement à surface libre. L'importance de l'application de la vélocimétrie Doppler ultrasonore dans l'étude des écoulements à surface libre s'avère très prometteuse dans l'étude divers problèmes liés aux fluides diphasiques (solide/liquide) tels que les problèmes du transport solide dans les cours d'eau.

L'application du DOP 1000 présente l'avantage d'acquérir des informations spatio-temporelles d'un écoulement sans recourir à la calibration de l'instrument du fait que les mesures sont obtenues uniquement par mesure de la fréquence Doppler. Cependant pour une validation des mesures, il est indispensable d'effectuer des mesures comparatives avec une autre technique non intrusive comme par exemple le calage des mesures avec ceux du vélocimètre Doppler laser (VDL), une alternative qui permettra de connaître les limites de l'appareil.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bélorgey, M., Le Bas, J., Grandjean, A., 1989. Application of laser Doppler velocimetry to the study of turbulence generated by swell in the vicinity of walls or obstacles, Coastal Engineering, Volume 13, Issue 2, pp 183-203.
- Breusers, H.N., Raudkivi, A.J., 1991. Scouring, IAHR, Hydraulic Structures Design Manuel N°2, Balkema, Rotterdam, NL.
- Clauser, F.H., 1956. The turbulent boundary layer. Advanced appl. Mech., Vol. 4, pp 1-51.
- Graf, W. H., Altinakar, M.S., 1993. Hydraulique fluviale. Presses Polytechniques et universitaires Romandes, Lausanne, 272 p.
- Kirkgoz, M.S. 1989. The turbulent velocity profiles for smooth and rough channel flow. Journal of Hydraulics Engineering 115, pp1543-1561.
- Lhermitte, R., Lemmin, U., 1994. Open-Channel Flow and Turbulence measurements by High-Resolution Doppler Sonar, J. Atm. Oceanic Tech., vol. 11, N°5, pp1295-1308.

- Rolland, T.,1995. Développement d'une instrumentation Doppler ultrasonore : Application aux écoulements turbulents en hydraulique. Thèse de doctorat es sciences techniques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 158 p.
- Soong, Y.; Gamwo, I. K. ; Blackwell A.G., 1999. Ultrasonic Characterizations of Slurries in a Bubble Column Reactor. *Ind. Eng.Chem. Res.* 38 pp 2137-2143.
- Takeda, Y.(1986).Velocity measurement by ultrasound Doppler shift method. *International Journal of Fluid Flow*, Vol. 7, pp 313-318.
- Takeda, Y.,1995 .Velocity profile measurement by ultrasonic Doppler method. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp 444- 453.
- Teufel, M., Trimis, D., Lohmüller, A., Takeda, Y., Durst, F., 1992. Determination of velocity profiles in oscillating pipe-flows by using laser Doppler velocimetry and ultrasonic measuring devices. *Flow Measurement and Instrumentation*, Volume 3, Issue 2, pp 95-101.
- Wells, P.N.T. (1969). *Physical principles of ultrasonic diagnosis*. New York Academic Press, *Medical Biology Engineering*, 7, pp 641-652