

Détermination des vitesses de glissement dans un écoulement diphasique par utilisation de la vélocimétrie ultrasonore Doppler pulsée

Walid Jaafar, Karim Bekkour

Institut de Mécanique des Fluides et des Solides (IMFS)
UMR CNRS-ULP 7505
2 rue Boussingault 67000 Strasbourg
jaafar@imfs.u-strasbg.fr

Résumé :

Il s'agit d'une étude des champs dynamiques d'un écoulement chargé de matières en suspension. L'objectif étant de distinguer le champ des vitesses du fluide porteur de celui des particules transportées et ainsi déduire la vitesse de glissement. La caractérisation des écoulements mixtes de phases solide et liquide reste à l'heure actuelle encore difficile à appréhender. L'étude expérimentale de ce genre d'écoulement mixte nécessite donc la mise en place de méthodes d'investigations adaptées. Une étude effectuée par vélocimétrie ultrasonore Doppler pulsée pour un écoulement diphasique va être présentée. On a vérifié que l'introduction de la phase solide modifie l'allure des profils de vitesse moyenne. Toutefois, une interprétation directe de ce type de profil semble nous apporter peu d'indications quant au comportement dynamique des particules solides. L'étude des histogrammes de vitesse fait apparaître deux pics assez bien identifiés. L'un des pics correspond à la vitesse la plus probable du fluide porteur. Le second pic correspond à la vitesse, plus faible, des particules transportées.

Abstract:

The study of two-phase flow, such as liquid-solid suspensions, requires the development of adequate experimental tools. They must allow the determination of both velocity distributions for the two species mixed together. It has been demonstrated that the use of ultrasound velocimetry for two-phase flow is able to characterise the dynamic properties of the transported particles. Then, the sliding velocities can be investigated. A significant change of the velocity profile, due to the presence of the solid phase can be observed. However, the direct interpretation of the measurements appears very difficult. The study of the velocity histograms allows us to determine both fluid and solid particles velocities. We interpret the first of the two peaks as the fluid particle velocity and the second peak as the suspension velocity.

Mots-clefs :

Vélocimétrie ultrasonore ; écoulement diphasique ; vitesse de glissement

1 Introduction

La caractérisation et l'optimisation de la gestion des flux de polluants qui transitent dans les réseaux d'assainissement passent par une connaissance approfondie des propriétés dynamiques des matières solides transportées. L'étude de ce genre d'écoulement mixte nécessite la mise en place de méthodes d'investigations particulières.

Diverses méthodes ont été utilisées pour la mesure des profils des vitesses dans des écoulements chargés en particules. Les premiers instruments utilisés (tube de Pitot, anémométrie à fils chauds,...) étaient intrusifs et perturberaient beaucoup l'écoulement [Garcia (1994), Garcia et Parker (1991)]. Le développement récent de la vélocimétrie à effet Doppler résolue en temps ouvre de larges perspectives pour la cartographie des écoulements en temps réel, autant pour le champ de vitesse que pour la distribution des solides transportés [Grant (1997), Saarenrinne *et al.* (2001), Albrecht *et al.* (2003)]. Cette méthode présente l'inconvénient de nécessiter des parois et un fluide transparent. Elle est donc inappropriée pour les écoulements très chargés [Takeda (1995)]. La présence des particules de grosse taille dans l'écoulement

empêche toute étude par voies optiques classiques comme la vélocimétrie laser à effet Doppler (tailles des volumes de mesure engendrés nettement inférieures à celles des particules transportés, réfraction des faisceaux laser au passage d'une particule...). C'est pourquoi le choix de la technique de mesure s'oriente vers l'utilisation de la vélocimétrie ultrasonore pulsée à effet Doppler [Takeda (1986), Jaafar *et al.* (2005)].

Le principe de mesure est basé sur la modulation en fréquence d'une onde ultrasonore pulsée, diffusée par les particules en suspension dans le fluide [Jaafar (2006)]. Le système fonctionne alternativement en émission et en réception. Ceci constitue une mesure sur une corde de l'écoulement. L'écho rétrodiffusé est alors démodulé afin de ne conserver que la modulation en fréquence f_D ou fréquence Doppler induite par le mouvement des particules. Cette modulation est liée à la vitesse v des particules par la formule classique de l'effet Doppler :

$$v = \frac{c \cdot f_D}{2f_0 \cdot \cos \theta}$$

Avec f_0 la fréquence d'émission, c la célérité du son dans le milieu et θ l'angle entre l'axe de tir et l'axe de l'écoulement.

Nous donnerons dans cette note quelques résultats expérimentaux relatifs à l'étude d'un écoulement turbulent en conduite de laboratoire d'un fluide chargé en particules solides : étude du champ dynamique du fluide porteur et caractérisation des vitesses des particules transportées.

2 Dispositif expérimental

L'étude expérimentale est réalisée dans une partie d'une boucle hydraulique (FIG. 1) sur une conduite horizontale en plexiglas de section circulaire ($D = 20$ mm). La boucle se compose d'une partie horizontale et d'une partie verticale pour l'alimentation. Elle est équipée d'une pompe centrifuge multicellulaire pilotée via un boîtier de commande qui permet de programmer précisément plusieurs protocoles d'écoulements. Le boîtier dispose d'une sortie analogique proportionnelle au régime du moteur, que nous pouvons récupérer à travers la carte d'acquisition, nous permettant ainsi d'accéder aux évolutions précises en temps réel des débits. La boucle comporte de nombreuses vannes trois voies permettant des configurations d'écoulement différentes. On entend par configuration la possibilité de maîtriser le sens de l'écoulement du fluide dans la boucle. Ainsi, on peut soit faire circuler du fluide directement de la pompe vers la partie horizontale de la boucle pour les grandes vitesses, soit le faire transiter préalablement dans le réservoir et là le fluide circule gravitairement. Cette configuration a été utilisée pour les vitesses ne dépassant pas 0.5 m/s. On parle respectivement de configuration « pompe amont » et configuration « pompe aval » ou « gravitaire ».



FIG. 1– Représentation en trois dimensions de la boucle hydraulique

Le fluide porteur est de l'eau du réseau urbain. Le choix du matériau solide s'est porté sur le sable de Fontainebleau en ne conservant que la fraction granulaire comprise entre 100 et 250 μm obtenue par tamisage à sec. Ce sable présente l'avantage d'avoir des caractéristiques géométriques connues et les grains sont relativement uniformes. Leur masse spécifique est de 2600 kg/m^3 . La distribution granulométrique a été mesurée à l'aide d'un granulomètre laser à diffraction. On a vérifié que les résultats étaient bien reproductibles et que la granulométrie de chaque échantillon était assez étroite, justifiant ainsi le choix du matériau. On observe aussi que toutes les courbes sont quasi-symétriques au point d_{50} (diamètre correspondant à 50 % de la masse totale des grains) ce qui correspond à un diamètre moyen des grains d'environ $160 \mu\text{m}$. Les expériences ont été réalisées pour des concentrations de solides égales à 13 g/l . La pompe aspire les particules à partir d'un bac relié à la boucle par un tuyau. Le bac a été équipé d'un agitateur mécanique avec hélice afin d'empêcher la sédimentation des particules.

Les mesures ont été réalisées à l'aide du vélocimètre équipé d'un transducteur émettant à 8 MHz , sur un écoulement en charge d'une solution de sable à 2 mètres à l'aval d'un coude. Le transducteur de diamètre 5 mm , fait un angle de 73.8° par rapport à l'axe de l'écoulement. Le tir est réalisé à contre courant. La fréquence de répétition des trains d'ondes est de $PRF=15625 \text{ Hz}$, la durée du train d'ondes est de $0.5 \mu\text{s}$ et la période d'échantillonnage spatial des volumes de mesure est de $2 \mu\text{s}$. Les distributions de vitesses sont obtenues par accumulation sur 40 FFT , ce qui permet d'avoir une erreur d'estimation de la moyenne négligeable (de l'ordre de 0.1%).

3 Résultats expérimentaux

L'objectif de cette étude est de distinguer le champ des vitesses du fluide porteur de celui des particules transportées. Une comparaison entre des mesures effectuées par vélocimétrie ultrasonore pour un écoulement d'eau claire et chargé de matière en suspension va être présentée pour différentes vitesses d'écoulement. Les données expérimentales seront comparées à des modèles théoriques d'un écoulement turbulent lisse paramétrés par les vitesses moyennes mesurées à l'aide de la pompe centrifuge faisant office de référence. Le profil théorique de la vitesse est divisé en deux zones : le voisinage immédiat de la paroi où on peut supposer que la vitesse ne dépend pas du diamètre et la région centrale où il est légitime de supposer que la rugosité n'intervient plus. Pour la zone proche de la paroi, on subdivise encore cette classification en trois parties et le profil de vitesse suit une loi logarithmique. Dans la région centrale, on constate que la vitesse varie peu avec la distance de la paroi et que, de plus, la valeur de la viscosité n'influence pas le résultat. L'expérience montre qu'une loi parabolique donne de bons résultats [Graf et Altinakar (1991) et Jaafar (2006)].

3.1 Comparaison des profils moyens de vitesse

Une première expérience a été réalisée avec une configuration « pompe aval », c'est à dire la pompe refoule directement le fluide du bac vers le réservoir, puis vers la partie horizontale de la boucle. La hauteur du fluide dans le réservoir va fixer la vitesse d'écoulement en aval. On a utilisé deux vitesses d'écoulement 0.25 et 0.40 m/s donnant respectivement deux nombres de Reynolds de 5000 et 8000 (FIG. 2).

On remarque qu'il y a un décalage entre les vitesses d'eau claire et les vitesses de l'eau chargée en suspensions solides. Pour la vitesse de 0.25 m/s , le profil de vitesse n'est plus symétrique et l'écoulement est fortement influencé par les particules. Plus on s'approche du fond de la conduite, plus les particules suivent le mouvement du fluide porteur.

Une deuxième expérience a été réalisée avec la configuration « pompe amont » pour travailler à des vitesses encore plus importantes. La vitesse d'écoulement qui transite dans la boucle est contrôlée par la pompe. On a utilisé deux vitesses d'écoulements 1.50 et 1.75 m/s donnant respectivement deux nombres de Reynolds de 24000 et 30000 .

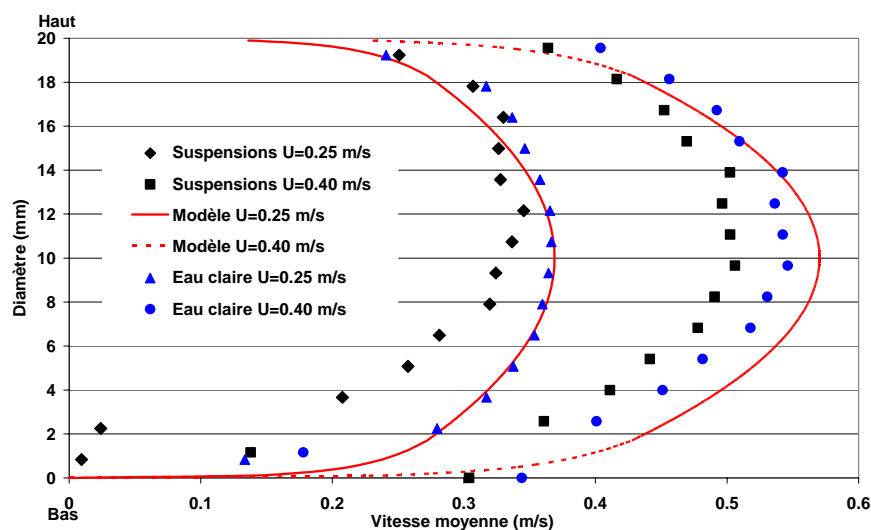


FIG. 2 – Comparaison entre les profils moyens de vitesse au centre de la conduite de deux écoulements de 0.25 et 0.40 m/s

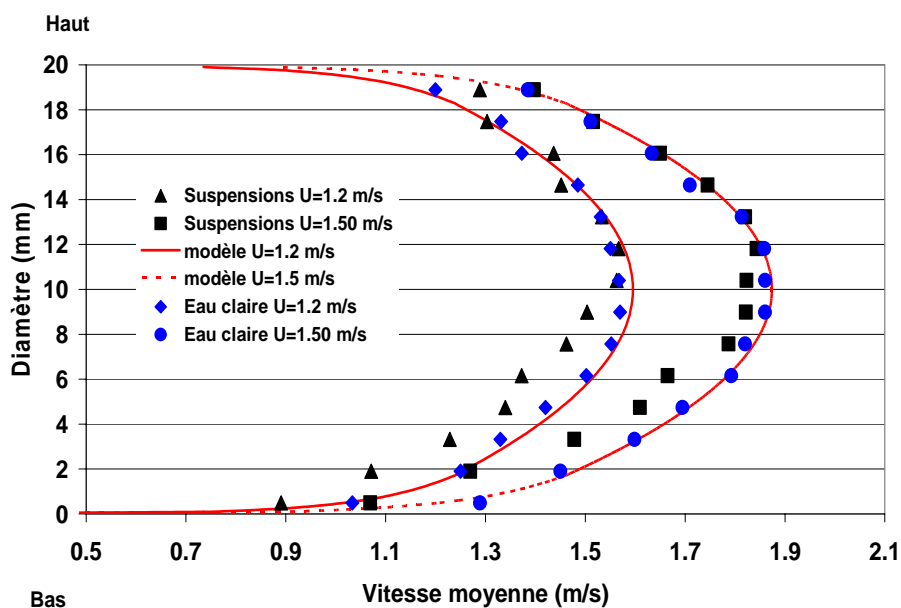


FIG. 3 – Comparaison entre les profils moyens de vitesse au centre de la conduite de deux écoulements de 1.20 et 1.50 m/s chargés et non chargés

Pour chacune des deux vitesses utilisées, on remarque que les profils de vitesse du fluide porteur sont quasi-symétriques et que leurs évolutions sont conformes aux modèles utilisés. Néanmoins, on observe aussi que l'introduction de la phase solide modifie relativement l'allure des profils de vitesse moyenne. La vitesse mesurée reflète à la fois celle du fluide et celle des particules freinées par les chocs particules/particules et particules/paroi. Ce phénomène est donc d'autant plus important que le débit d'écoulement diminue. La différence de densité entre les deux phases a engendré une sédimentation des particules surtout avec les plus faibles vitesses : la présence d'un plus grand nombre de particules dans le bas de la conduite ralentit

sensiblement l'écoulement. Toutefois, une interprétation directe de ce type de profil semble nous apporter peu d'indications quant au comportement dynamique des particules solides. Une analyse des histogrammes des vitesses est proposée afin de distinguer les vitesses moyennes d'écoulement des deux phases et d'estimer les vitesses de glissement.

3.2 Détermination des vitesses de glissement

Les histogrammes de vitesse pour les écoulements de 1.20 et 1.50 m/s sont présentés dans la figure 4. Cette étude fait apparaître deux pics assez bien identifiés. L'un des pics correspond à la vitesse la plus probable du fluide porteur au point considéré (valeur de la vitesse la plus élevée). Le second pic correspond à la vitesse, plus faible, des particules transportées, interceptées au point considéré. Cette distinction est rendue possible en considérant que la suspension, soumise à un fort gradient de vitesse entre ses extrémités, est ralentie dans sa progression par un frottement visqueux.

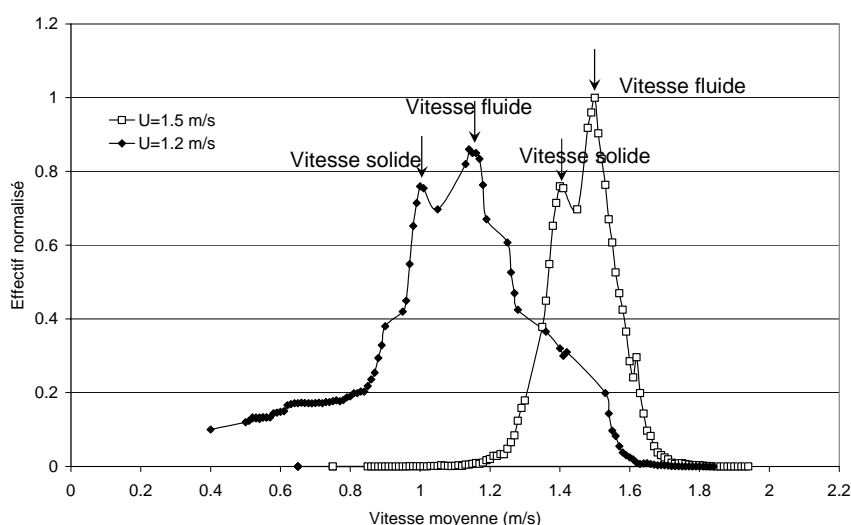


FIG. 4- Histogrammes de vitesse de deux écoulements de 1.20 et 1.50 m/s.

Les figures 5(a) et 5(b) représentent les résultats obtenus pour les deux configurations d'écoulement et on peut distinguer deux régimes d'écoulement :

- Régime d'écoulement hétérogène

Pour les faibles vitesses d'écoulement ($\bar{u} = 0.25$ m/s), la répartition des particules solides s'effectue sur une large partie inférieure de la conduite, la partie supérieure restant libre. Le profil des vitesses des particules solides est continu mais dissymétrique sur une grande partie de la section (> 60 %). Les vitesses de glissement diminuent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du bas de la conduite.

- Régime d'écoulement quasi homogène

Pour les grandes vitesses ($\bar{u} = 1.50$ m/s), on constate que l'on a un régime d'écoulement quasi homogène, l'évolution du profil des vitesses des particules solides suit de façon continue et assez symétrique l'évolution du profil de vitesse du fluide porteur. Cela nous incite à penser que la répartition des grains de sable est uniforme dans la quasi-totalité de la section. Cependant les valeurs des vitesses des particules solides mesurées restent inférieures à celles mesurées pour le fluide. Les valeurs des vitesses de glissement, maximales près des parois où le cisaillement est important, semblent passer par un minimum au centre de la conduite.

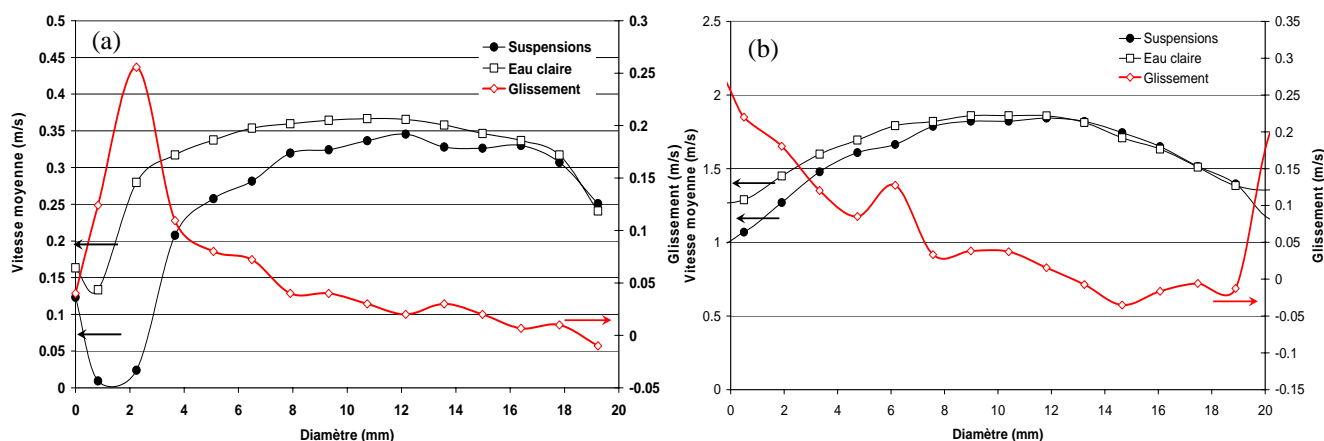


FIG. 5 – Profils des vitesses du fluide porteur et des suspensions solides pour une deux vitesses moyennes de 0.25 et 1.50 m/s.

4 Conclusion

L'étude des écoulements mixtes des phases solide et liquide (mise en évidence des régimes d'écoulement, étude du comportement des deux phases, analyse des interactions entre les deux espèces, étude du transfert de chaleur au sein du mélange...) reste à l'heure actuelle encore difficile à appréhender. Elle fait toutefois l'objet de nombreuses recherches, aussi bien expérimentales que théoriques ou numériques. Nous avons montré, à travers les résultats présentés dans ce papier, que la technique de vélocimétrie ultrasonore pulsée à effet Doppler apparaît bien adaptée à l'approche expérimentale de tels types d'écoulements : elle donne accès aux mesures des vitesses du fluide porteur, mais surtout à celles des particules solides transportées.

Références

- Albrecht, H. E., M. Borys, N. Damaschke and C. Tropea, "Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques" Springer, New York (2003).
- Balasubramaniam, V. M. and S. K. Sastry, "Liquid-to-particle convective heat transfer in non-Newtonian carrier medium during continuous tube flow" *Journal of Food Engineering* 23, 169-187 (1994).
- Garcia, M. H. and G. Parker, "Experiment of bed sediment into suspension" *J. Hydr. Eng.* 117, 414-435 (1991).
- Garcia, M. H., "Depositional turbidity currents laden with poorly sorted sediments" *J. Hydr. Eng.* 120, 1240-1263 (1994).
- Graf, W. H. and M. Altinakar, "Hydrodynamique" Eyrolles (1991).
- Grant, I., "Particle image velocimetry: a review" *Proc. Inst. Mech. Eng.* 211, 55-76 (1997).
- Jaafar, W., S. Fischer and K. Bekkour. Utilisation de la vélocimétrie ultrasonore Doppler pulsée pour la détermination des profils turbulents de vitesse. 17^{ème} Congrès Français de Mécanique (paper n°121). Troyes, France. Septembre 2005.
- Jaafar, W., "Étude des champs de vitesse dans les effluents des réseaux d'assainissement : Expérimentation et simulation numérique," Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I. 225p. (2006).
- Saarenrinne, P., M. Piirto and H. Eloranta, "Experiences of turbulence measurement with PIV*" *Measurement Science and Technology* 12, 1904-1910 (2001).
- Takeda, Y., "Velocity Measurement by Ultrasound Doppler Shift Method" *International Journal Heat and Fluid Flow* 7(4):, 313-318 (1986).
- Takeda, Y., "Velocity Profile Measurement by Ultrasonic Doppler Method" *Experimental Thermal and Fluid Science* 10, 444-453 (1995).