

Influence de la turbulence sur le transport de sédiments

Julie Le Louvetel-Poilly, Françoise Bigillon & Jean-Yves Champagne

Laboratoire de Mécanique des Fluides et Acoustique, INSA-Lyon, CNRS UMR 5509
27 avenue Jean Capelle F69261 Villeurbanne Cedex, France
julie.le-louvetel-poilly@insa-lyon.fr

Résumé :

Des expériences en canal à surface libre ont été menées afin d'étudier les interactions entre les structures turbulentes et des particules en mouvement. La vélocimétrie par image de particule a permis de mesurer simultanément les caractéristiques de l'écoulement et du mouvement des particules. Ces mesures permettent de quantifier le rôle des éjections et des sweeps dans le transport de particules. Les particules utilisées sont des billes de verre et de céramique. Nous avons testé 5 conditions hydrauliques avec des Reynolds variant de 3000 à 30000.

Après avoir défini la taille de la zone à étudier autour de chaque bille, qui varie entre 40 et 85 unités de paroi, nous avons observé que 60 à 80% des billes sont transportées par des éjections et des sweeps qui ont une intensité 2 à 10 fois plus forte que la moyenne. Enfin, nous avons observé une forte corrélation entre la vitesse verticale des billes et celle des structures.

Abstract:

Experiments in open-channel flow were performed to study the interactions between turbulence and moving particles. Particle image velocimetry (PIV) was used to measure simultaneously both the turbulent characteristics of the flow and the particle motion. Thus, from these measurements it is possible to quantify the role of sweeps and ejections in particle transport. The particles used are glass and ceramic beads. Five hydraulic conditions were tested with Reynolds number varying from 3000 to 30000. First, we determined the size of the area around each bead, where the flow was analyzed. This size varies from 40 to 85 wall units. Then, we observed that 60 to 80% of the beads are transported by sweeps and ejections, that have an intensity 2 to 10 times larger than the mean turbulent intensity. Finally, we observed a great correlation between the vertical motion of the beads and their surrounding structures.

Mots-clefs :

Structures turbulentes, particules, PIV

1 Introduction

L'étude des écoulements turbulents chargés en particules présente un intérêt aussi bien au niveau environnemental qu'au niveau industriel. Afin de comprendre ce type d'écoulement, il est important de connaître les interactions entre particules et turbulence. En particulier, cette étude cherche à déterminer les caractéristiques de la turbulence de paroi transportant des particules.

La turbulence de paroi est formée de structures cohérentes quasi-périodiques. Ces structures sont composées d'une éjection, d'un sweep et d'une couche de cisaillement (Nakagawa *et al.* 1981). Les éjections sont un mouvement du fluide lent et dirigé vers le haut, alors que les sweeps sont un déplacement du fluide rapide et descendant. Les sweeps et les éjections augmentent le cisaillement au fond, ce qui déstabilise les particules et peut éventuellement les mettre en mouvement. Plusieurs modèles montrent que les éjections sont responsables de l'entraînement (Sumer *et al.* 1981; Niño *et al.* 1996) et du transport des

sédiments (Gyr 1983). Le rôle de ces structures turbulentes dans l'entraînement et le transport de sédiments a été démontré de façon qualitative (Rashidi *et al.* 1990 ; Nezu *et al.* 1993 ; Bigillon *et al.* 2002, 2005). Il a, en revanche, été peu quantifié.

Cet article présente une étude expérimentale dont l'objectif est de déterminer les caractéristiques des structures turbulentes responsables du transport de particules, notamment leur type et leur intensité. Il est divisé en trois parties : la première est une description du protocole expérimental; la seconde est la présentation des résultats ; les principales conclusions sont résumées dans la dernière partie.

2 Protocole expérimental

2.1 Dispositif expérimental

Les expériences ont été réalisées dans un canal rectangulaire à surface libre, de 10 m de long, 25 cm de large et 0,5% de pente. Le fond du canal est recouvert de toile Emery, afin d'avoir une rugosité régulière de hauteur moyenne, $k_s = 0,15$ mm.

Des visualisations de l'écoulement sont réalisées dans un plan vertical situé au centre du canal et 7 m en aval de l'entrée. Les mesures sont faites en utilisant le système de vélocimétrie par image de particules (PIV) commercialisé par *Dantec Dynamics*. La section de mesure est illuminée par un laser pulsé (*New Wave Research Solo Nd:YAG laser*) et les paires d'images sont enregistrées par une caméra FlowSense2M (*Dantec Dynamics*). La résolution de la caméra est 1600x1186 pixels et sa fréquence d'acquisition est de 15 Hz. Pour chaque condition expérimentale, 1000 paires d'images sont enregistrées.

Afin d'avoir de bonnes visualisations, des particules d'iriodin ($d = 10$ μm et $\rho = 3800$ kg/m^3) sont utilisées comme traceurs. Les caractéristiques de ces particules permettent de faire l'hypothèse que leur vitesse est la même que la vitesse locale de l'écoulement.

2.2 Conditions expérimentales

Les expériences sont réalisées avec des conditions d'écoulement permanent et uniforme. La hauteur d'eau, h , est comprise entre 1 et 4,1 cm. Les conditions hydrauliques correspondent à un régime turbulent, avec des nombres de Reynolds, $Re = U_{deb} h / \nu$ situés entre 3000 et 30000, avec U_{deb} la vitesse débitante de l'écoulement ($U_{deb} = Q / hW$, W étant la largeur du canal et Q le débit) et $\nu = 1,061 \cdot 10^{-6}$ m^2/s pour de l'eau à 18°C. Le nombre de Froude, $Fr = U_{deb} / \sqrt{gh}$, est compris entre 1,1 et 1,2, ce qui correspond à un écoulement torrentiel, avec la constante de gravité $g = 9,81 \text{m/s}^2$. Les valeurs de la vitesse de cisaillement, u_* , estimées à partir de la distribution des contraintes de Reynolds, sont comprises entre 1,95 et 4,1 cm/s. Enfin, le nombre de Reynolds basé sur la rugosité du fond, $Re_* = k_s u_* / \nu$, est compris entre 3 et 6, ce qui correspond à des régimes hydrauliquement lisses ou transitoirement rugueux. Toutes les conditions hydrauliques des tests sont répertoriées dans le tableau 1.

h (m)	u_* (m/s)	Q (l/s)	Re	Fr
0,01	0,019	0,9	3000	1,12
0,02	0,029	2,6	10000	1,19
0,026	0,0324	4	15000	1,21
0,035	0,038	6,3	24000	1,22
0,041	0,041	8	30000	1,22

TAB. 1 – Conditions hydrauliques des tests

Pour chaque condition hydraulique, nous avons fait des tests en eau claire et en écoulement chargé en particules. Les particules utilisées sont des billes de masse volumique, ρ , et de diamètre, d , différents (Cf. TAB 2). Nous avons choisi les caractéristiques des billes afin d'observer leur transport compte tenu de la gamme d'écoulements testés. De plus, leur taille facilite la séparation sur les images PIV entre les traceurs (phase liquide) et les billes (phase solide). Les billes sont injectées dans l'écoulement environ 2 m en amont de la zone de visualisation. La concentration en billes, calculée comme le rapport entre l'aire occupée par les billes sur les images et l'aire totale des images, est de l'ordre de 0.01%. Nous pouvons donc supposer que l'écoulement n'est pas altéré par la présence des billes.

Notation	Materiau	d en μm	ρ en kg/m^3
CeraP	Céramique	125-250	3800
CeraG	Céramique	250-425	3800
Glass	verre	150-250	2600

TAB. 2 – Caractéristiques des billes

3 Résultats

A partir des images PIV, par des méthodes classiques de traitement d'image (Le Louvetel-Poilly *et al.* 2007), on est capable de séparer les deux phases de l'écoulement. De la phase solide, on obtient la position et la vitesse de chaque bille. A partir de la phase liquide, on calcule la vitesse moyenne, u , les fluctuations longitudinales et verticales (u' et v') en tout point de l'écoulement et en particulier autour des billes. En effet, nous souhaitons analyser l'écoulement autour des billes afin d'étudier et de quantifier le rôle des structures turbulentes, de type éjections et sweeps, dans le mouvement des billes. Le problème est alors de définir ce que signifie « autour des billes » et donc de déterminer la taille de la zone à étudier autour de chaque bille.

Dans la présentation des résultats, la première partie est consacrée à définir la taille de la zone d'étude autour de chaque bille. La seconde partie concerne l'analyse des structures turbulentes entourant les billes en mouvement. Nous nous intéressons en particulier à leur type (éjections ou sweeps) et à leur intensité.

3.1 Détermination du voisinage agissant sur une bille

Nous choisissons d'appeler « voisinage » la zone de fluide étudiée autour de chaque bille. Le voisinage est carré, centré autour de la bille et sa taille est notée D^+ , $D^+ = Du_* / \nu$, où D est la dimension de l'arrête du voisinage définie sur la figure 1. Cette figure est un exemple de voisinage d'une bille montrant les vecteurs fluctuations de vitesse qui le composent.

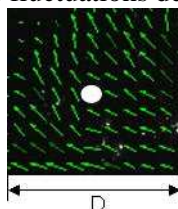


FIG. 1 – Exemple de voisinage autour d'une bille

Les travaux précédents (Rashidi *et al.* 1990 ; Nezu *et al.* 1993 ; Bigillon *et al.* 2002, 2005) ont montré que les structures responsables du transport de sédiments, sont de forte intensité turbulente w , $w = \frac{u'v'}{u'v'}$. Nous avons donc étudié l'évolution de l'intensité turbulente moyenne entourant les billes en fonction de la taille du voisinage. La figure 2 montre cette évolution pour

les trois types de billes, pour un écoulement de $Re = 24000$. Pour chaque type de bille, lorsque la taille D^+ augmente, deux tendances apparaissent. Tout d'abord, l'intensité des structures reste constante et ne semble pas dépendre de D^+ . Puis, à partir d'une taille critique, l'intensité turbulente décroît de façon rapide.

Ces tendances peuvent s'expliquer par la taille des structures turbulentes présentes dans l'écoulement. Tant que le voisinage choisi se trouve au sein d'une structure turbulente, l'intensité moyenne reste maximale. En revanche, dès que le voisinage devient plus grand que la structure, il est composé des vecteurs très intenses de la structure, ainsi que d'autres vecteurs beaucoup moins intenses, ce qui entraîne une chute de l'intensité moyenne entourant les billes. La taille du voisinage est donc choisie de façon à rester au sein de la structure tout en gardant le maximum d'information fluide : plus le voisinage est grand, plus il y a de vecteurs vitesses entourant une bille. La figure 2 nous permet de choisir, pour un Re de 24000, une taille, D^+ , de 70 unités de paroi. Nous avons remarqué que la taille du voisinage est comparable à la taille typique des structures rencontrées dans les écoulements turbulents (Nakagawa *et al.* 1981 ; Bigillon *et al.* 2002 ; Kumar *et al.* 1998), ce qui nous conforte dans l'idée que la distance D^+ peut donc être considérée comme la taille des structures responsables du mouvement des billes.

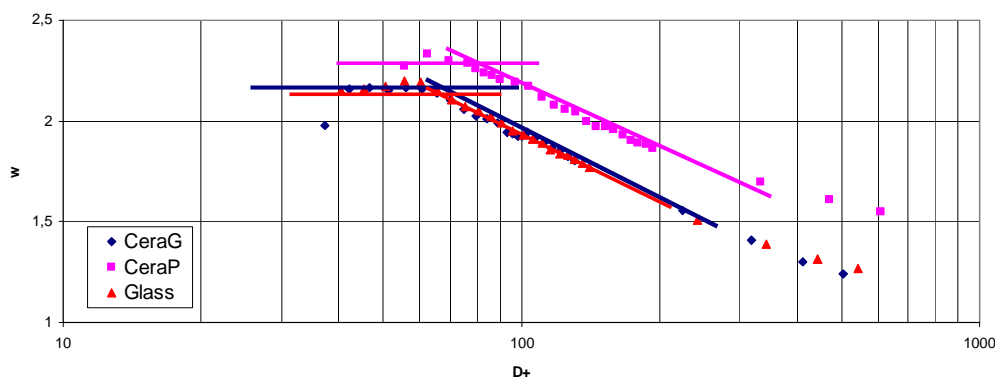


FIG. 2 – Etude de l'évolution de l'intensité moyenne turbulente autour des billes, en fonction de la taille du voisinage, $Re=24000$

Cette analyse a été faite pour toutes les conditions hydrauliques. Les tailles de voisinage choisies pour chaque écoulement sont répertoriées sur la figure 3. On voit que D^+ augmente avec le nombre de Reynolds, ce qui est conforme à la comparaison de résultats précédents (Nakagawa *et al.* 1981 ; Bigillon *et al.* 2002 ; Kumar *et al.* 1998) qui font apparaître une augmentation de la taille des structures avec le nombre de Reynolds.

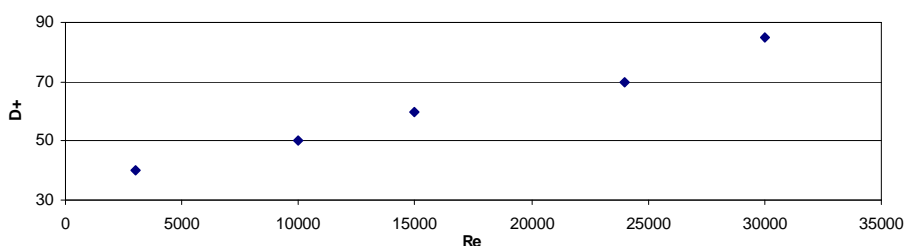


FIG. 3 – Tailles de voisinage en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement

3.2 Caractéristiques des structures turbulentes responsables du transport des billes

Une fois le voisinage choisi, il est possible d'étudier le type et l'intensité des structures turbulentes entourant chaque bille en mouvement.

Le type de structure turbulente est déterminé grâce à la méthode des quadrants (Bigillon *et*

al. 2002 ; Nezu *et al.* 1993). Cette méthode consiste à classer les vecteurs fluctuations de vitesse du voisinage des particules dans 4 quadrants définis par le plan (u',v') . Ainsi les éjections correspondent au quadrant 2 ($u' < 0$ et $v' > 0$) et les sweeps au quadrant 4 ($u' > 0$ et $v' < 0$). Nous considérons ensuite qu'une particule appartient au $i^{\text{ème}}$ quadrant si au minimum 50% des vecteurs de son voisinage sont dans le $i^{\text{ème}}$ quadrant. Les résultats obtenus mettent bien en évidence que les billes sont transportées par des sweeps et des éjections, ce qui est conforme aux observations précédentes (Niño *et al.* 1996 ; Bigillon *et al.* 2005). On voit en effet que 60 à 80% des billes sont transportées par des sweeps et des éjections. En général, on observe une dominance des éjections : 30 à 55% des billes sont entourées par des éjections et seulement 20 à 50% par des sweeps.

De plus, comme observé lors de précédents travaux expérimentaux (Rashidi *et al.* 1990; Nezu *et al.* 1993; Bigillon *et al.* 2002, 2005), les structures responsables du transport des particules sont de forte intensité. Dans notre étude, l'intensité, w , des structures turbulentes entourant les billes en mouvement peut atteindre localement des valeurs aussi fortes que 20. L'intensité moyenne des éjections est comprise entre 2 et 3. L'intensité des sweeps est un peu plus faible et vaut en moyenne entre 1,3 et 1,9.

Enfin, nous étudions la corrélation entre la vitesse verticale (V_p) de la bille et celle de la structure turbulente qui l'entoure. Notamment, on constate que 55 à 82 % des billes localisées dans des éjections, ont une vitesse ascendante. De même, on observe que 60 à 85% des billes entourées par des sweeps ont une vitesse descendante. On voit donc apparaître une forte corrélation entre le mouvement du fluide, vers le haut pour les éjections et vers le fond pour les sweeps, et la vitesse verticale des billes.

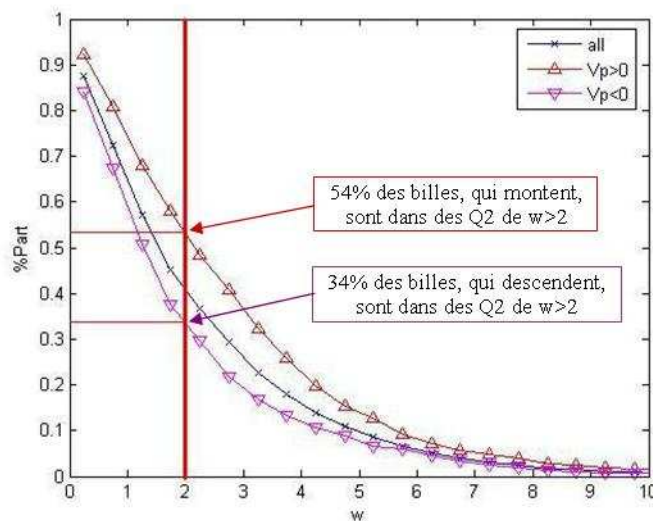


FIG. 4 – Distribution des billes en fonction de l'intensité, w , de l'éjection qui les entoure, cas des petites billes de céramique (CeraP) et $Re=30000$.

Pour approfondir l'étude de cette corrélation, nous avons comparé l'intensité des éjections transportant les billes qui montent et celle des éjections entourant les billes qui descendent. La figure 4 montre le pourcentage de billes descendant ou montant en fonction de l'intensité de l'éjection qui les entoure, dans le cas de petites billes de céramique (CeraP), dans un écoulement de $Re = 30000$. Sur ce graphe, on voit que 54% des billes qui montent ($V_p > 0$) sont dans une éjection d'intensité moyenne supérieure à 2 alors que seulement 34% des billes qui descendent ($V_p < 0$) sont entourées par une éjection d'intensité supérieure à 2. Ceci met en évidence que la majorité des billes qui montent sont entourées par des éjections d'intensité moyenne comprise entre 2 et 10, alors que la plupart des billes qui descendent (66%) sont dans des éjections d'intensité moyenne faible (inférieure à 2).

De plus, si on détermine l'intensité moyenne, pour chaque test, d'une éjection entourant

une bille montante, elle est comprise entre 2,2 et 4,5 alors que celle entourant une bille descendante est comprise entre 1,6 et 2,2. Ceci indique que l'intensité nécessaire pour faire monter une bille dans l'écoulement est 2,2 à 4,5 fois supérieure à l'intensité moyenne de l'écoulement. Si une éjection a une intensité trop faible, elle ne semble pas avoir assez d'énergie pour donner un mouvement ascendant à la bille. On observe la même tendance chez les sweeps : ceux entourant des billes descendantes sont plus intenses (w compris entre 1,5 et 2,1) que ceux entourant des billes ascendantes (w compris entre 1,1 et 1,9).

4 Conclusions

L'interaction entre le mouvement des particules et les structures turbulentes a été étudiée en utilisant de la vélocimétrie par image de particules. Cette technique a permis d'avoir simultanément les champs de vitesse fluide, ainsi que la position et la vitesse des particules. On peut ainsi étudier les caractéristiques de l'écoulement autour de chaque particule.

Une partie importante de l'analyse a été consacrée à la détermination de la taille du « voisinage » de la particule, c'est-à-dire, la taille de la fenêtre d'étude autour de chaque particule. Cette taille varie entre 40 et 85 unités de parois en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement, ce qui est comparable à la taille des structures turbulentes rencontrées dans ce type d'écoulement.

L'analyse des interactions entre les billes et les structures turbulentes a ensuite montré que 60 à 80% des billes sont entourées par des éjections et des sweeps. Ces structures, responsables du transport, sont 1,3 à 3 fois plus intenses que la moyenne. De plus, il a été montré que 60 à 85% des billes se déplacent en accord avec la structure turbulente qui les entoure, c'est-à-dire qu'elles montent dans des éjections et descendent dans des sweeps. Enfin, nous avons observé que l'intensité des structures transportant ces billes est plus grande que celle des structures entourant des billes dont la vitesse n'est pas corrélée avec la structure. Ces résultats permettent de confirmer le rôle important des sweeps et des éjections dans le transport de sédiments et donnent une information supplémentaire sur l'intensité nécessaire pour les transporter.

Références

- Bigillon, F. and Garcia, M.H. 2002 Exploratory study of Flow-Particle interaction using Particle Image Velocimetry, In HMEM, July 28 – August 1, Estes Park, Colorado, USA.
- Bigillon, F. and Garcia, M.H. 2005 Etude par PIV de l'interaction entre structures turbulentes et particules solides. Fluvisu11, 6-9 juin 2005, Lyon, France.
- Gyr, A. (1983), Towards a better definition of the three types of sediment transport, *J Hydraul Res.* 21, 1-15.
- Kumar, S. and Gupta, R. and Banerjee, S. 1998 Experimental investigation of the characteristics of free-surface turbulence in channel flow. *Phys Fluids.* 10, 437 – 456.
- Le Louvetel-Poilly, J, Bigillon, F. and Champagne, J.Y. 2007 Experimental investigation on the turbulent structures involved in particle motion, IAHR 2007, July 1-6, Venice, Italy.
- Nakagawa, H. and Nezu, I. 1981 Structure of space-time correlation of bursting phenomena in an open-channel flow. *J Fluid Mech.* 104, 1-43.
- Nezu I. and Nakagawa H. 1993 Turbulence in open channel flows, IAHR Monograph, Balkema, Rotterdam, The Netherlands
- Niño, Y. and Garcia, M. 1996 Experiments on particle-turbulence interactions in the near-wall region of an open channel flow: Implication for sediment transport. *J Fluid Mech.* 326, 285-319.
- Rashidi, M., Hetsroni, G. and Banerjee, S. 1990 Particle-turbulence interaction in a boundary layer. *Int J Multiphase Flow.* 16, 6, 935-949.
- Sumer, B. M. and Deigaard, R. 1981. Particle motion near the bottom in turbulent flow in an open channel. Part 2. *J Fluid Mech.* 109, 311-337.