

Étude expérimentale de la turbulence de grille sur le transport sédimentaire

B. Caplain^a, D. Reungoat^a

a. Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux

Résumé :

L'objectif de cette étude est de caractériser le transport sédimentaire dans un écoulement turbulent homogène et isotrope. La turbulence est développée par une grille à mailles carrées (maille de 6.6 mm) choisie de manière à obtenir une faible décroissance spatiale de l'intensité turbulente sur la majeure partie de la veine. Dans une première partie, une analyse sans particules est réalisée sur la base de mesures LDV (Laser Doppler Velocimetry) afin de caractériser l'écoulement de transport. Dans une seconde partie, le mouvement de grosses particules injectées est ensuite quantifié par des mesures PIV/PTV (Particle Image/Tracking Velocimetry) pour différentes concentrations. Une technique de mesures par fluorescence est mise en oeuvre afin de distinguer l'écoulement fluide et la contribution des particules injectées. Une analyse en termes de flux de concentration, champs de vitesses et structure de l'écoulement est réalisée.

Abstract :

The aim of this study is to characterise sediment transport in a homogeneous and isotropic turbulent flow. Turbulence is developed by a square mesh grid (mesh 6.6 mm) chosen in order to obtain a low spatial decrease of the turbulent intensity over the most part of the channel. At first, an analysis is done without particles on the basis of LDV (Laser Doppler Velocimetry) measurements to characterise the fluid flow. Then the motion of injected coarse particles is quantified by PIV/PTV (Particle Image/Tracking Velocimetry) measurements for different concentrations. Fluorescent measurements are developed to distinguish the flow and the contribution of injected particles. An analysis in terms of concentration flux, velocity fields and flow structure is realised.

Mots clefs : turbulence homogène isotrope ; transport sédimentaire ; fluorescence

1 Introduction

Le mascaret est un phénomène très important pour l'écosystème estuarien (turbulences, grande capacité de mélange, transport des sédiments, remobilisation des polluants). Une étude détaillée et une meilleure compréhension des processus physiques est donc nécessaire pour préserver ce phénomène naturel. Beaucoup d'études ont été entreprises pour comprendre l'interaction entre turbulence et transport sédimentaire ([3, 4, 6, 7, 8]). L'objectif de l'étude de laboratoire est double : caractériser le transport sédimentaire dans un écoulement turbulent homogène et isotrope (THI) afin de valider les modèles utilisés dans les simulations numériques sous des conditions d'écoulement contrôlées et stabilisées ; développer une méthodologie de mesures transposables à un canal long (10 m) dans le cas d'un écoulement turbulent à surface libre généré par une onde de propagation représentant les conditions d'un mascaret. Une turbulence homogène isotrope est souvent produite par le moyen d'une grille de turbulence. Dans un premier temps, l'écoulement est qualifié sans particules par des mesures LDV afin de vérifier la symétrie des profils de vitesse et le caractère isotrope de l'écoulement. Dans un second temps, des mesures simultanées PIV/PTV de deux tailles caractéristiques de particules fluorescentes sont réalisées et analysées.

2 Dispositif expérimental et matériels de mesures

2.1 Dispositif expérimental

L'écoulement est généré dans une veine hydraulique rectangulaire de 1.9 m de long de section carrée ($D = 10 \text{ cm}$ de côté) (Figure 1). La veine hydraulique est composée, de l'amont vers l'aval, d'un élément à section divergente ($\sim 15^\circ$), d'un module de régularisation de l'écoulement, d'un élément à section convergente, du canal de mesures et d'un élément à section convergente ($\sim 15^\circ$) (Figure 2). L'écoulement est alimenté par une pompe dont la consigne est asservie par un débitmètre en sortie de veine. La pompe permet d'obtenir une gamme de débit telle que $30 \text{ L/min} \leq Q \leq 135 \text{ L/min}$ correspondant à une gamme de la vitesse horizontale moyenne de l'écoulement au centre de la veine telle que $5 \text{ cm/s} \leq U_m \leq 22.5 \text{ cm/s}$.

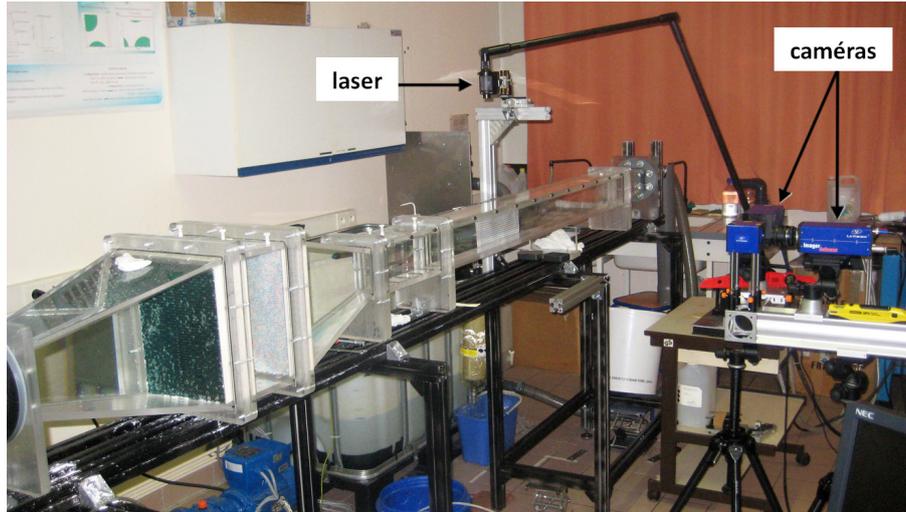


FIG. 1 – Dispositif expérimental

Pour régulariser l'écoulement, nous disposons de 2 types de grille dans le module de régularisation de l'écoulement. Une grille à maillage hexagonal (nid d'abeilles) de 6 mm est placée à la sortie du divergent et une grille à maillage circulaire (réseau de pailles) de 5 mm est disposée avant le convergent (Figure 2). La turbulence est générée par une grille à mailles carrées. Selon [2], la taille des mailles M et l'épaisseur des barres de la grille d sont choisies de façon à obtenir un coefficient de solidité de 0.33. Le coefficient de solidité s'écrit :

$$\sigma = \frac{d}{M} \left(2 - \frac{d}{M} \right) = 0.33 \quad (1)$$

Nous avons choisi une grille avec un maillage de $M = 6.6 \text{ mm}$ et une épaisseur des barres de la grille de $d = 1.2 \text{ mm}$ correspondant à un maillage de 15 mailles de côté. Cette grille de turbulence est placée à l'entrée de la veine de mesures ($x = 0$).

Basé sur U_m et M , le nombre de Reynolds qui caractérise l'écoulement s'écrit :

$$Re_M = \frac{U_m M}{\nu} \quad (2)$$

avec ν la viscosité cinématique de l'eau. Deux vitesses horizontales moyennes ont été étudiées ($U_m = 10 \text{ cm/s}$ et $U_m = 20 \text{ cm/s}$) correspondant à $Re_M = 660$ et $Re_M = 1320$. \vec{x} est la direction longitudinale de l'écoulement ($x = 0$ à la position de la grille de turbulence), \vec{y} la direction transversale ($y = 0$ au centre de la veine) et \vec{z} la direction verticale ($z = 0$ au centre de la veine). U , V et W sont respectivement les composantes horizontale, transversale et verticale de la vitesse.

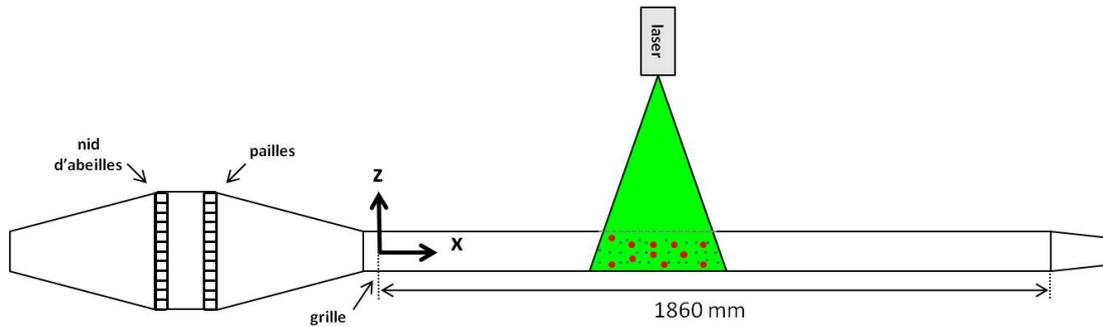


FIG. 2 – Schéma du dispositif expérimental

2.2 Matériels de mesures

L'écoulement turbulent est qualifié le long de la veine par des mesures LDV. Les données ont été acquises par le moyen d'un logiciel BSAFlow de DANTEC. Pour les écoulements turbulents, l'acquisition des données en un point doit être faite très précisément selon deux critères basés sur la durée d'acquisition T et sur le nombre d'échantillons acquis N . T doit être grand devant les échelles temporelles de l'écoulement et N doit être suffisamment grand de façon à ce que l'évolution de la composante de vitesse mesurée ait convergé. Selon [1], $N = 2000$ semble être un minimum. Nous avons ainsi choisi $N = 10000$ et $T = 60$ s. Le système de mesures LDV permet de d'acquérir deux composantes de la vitesse, les composantes horizontale U et verticale W .

Des mesures PIV/PTV-PLIF sont réalisées pour pouvoir mesurer simultanément l'évolution spatiale du champ fluide et du transport solide de grosses particules. Pour cela, des marqueurs fluorescents ont été testés et caractérisés. Un laser Quantel de 2×190 mJ (Twins 190) avec une longueur d'onde de 532 nm est utilisé, une nappe verticale est générée en $y = 0$ dans la direction longitudinale et synchronisée avec deux caméras PCO Sensicam. Un protocole de greffage des particules par des marqueurs fluorescents est appliqué.

3 Résultats

3.1 Caractéristiques turbulentes

Nous cherchons ici à montrer que l'écoulement qui se développe à l'aval de la grille est homogène et isotrope, nous analysons donc les propriétés turbulentes de l'écoulement. Les trois composantes de la vitesse de l'écoulement se décomposent en une vitesse moyenne et une vitesse fluctuante. Les vitesses horizontale et verticale s'écrivent $U = U_m + u$ et $W = W_m + w$ respectivement, avec U_m et W_m les moyennes temporelles de U et W , et u et w les vitesses fluctuantes de U et W . Dans un tel système, les intensités turbulentes longitudinale et verticale s'écrivent $I_x = \sqrt{u^2}/U_m$ et $I_z = \sqrt{w^2}/U_m$ respectivement. Comme le système LDV est 2D, la composante transversale de la vitesse V n'est pas disponible. Pour un écoulement homogène et isotrope, nous supposons que $\overline{w^2} = \overline{v^2}$ et donc que $I_y = \sqrt{v^2}/U_m = I_z$. Les vitesses moyennes et les intensités turbulentes sont mesurés pour deux vitesses U_m de 10 et 20 cm/s correspondant à des Re_M de 660 et 1320.

La Figure 3 représente l'évolution longitudinale de $U_m/(Q/D^2)$ (Figure 3a) et des intensités turbulentes I_x et I_z (Figure 3b) comme une fonction de la distance à la grille x/M . Nous pouvons observer que $U_m/(Q/D^2)$ augmente légèrement entre 1.2 et 1.3 et que les intensités turbulentes décroissent fortement pour $x/M \leq 100$ et plus modérément pour $x/M \geq 100$. I_x et I_z se superposent et suivent la même tendance, ce qui traduit la forte isotropie de l'écoulement. Les valeurs des intensités turbulentes varient peu pour $x/M \geq 100$, elles sont de l'ordre de 4 – 5%.

La Figure 4 représente les profils transversaux et verticaux de $U_m/(Q/D^2)$ et de I_x pour différentes positions x/M . Nous observons que tous ces profils vérifient la symétrie de l'écoulement par rapport au centre de la veine ($y/M = 0$, $z/M = 0$). Nous constatons que les profils de $U_m/(Q/D^2)$ ne varient

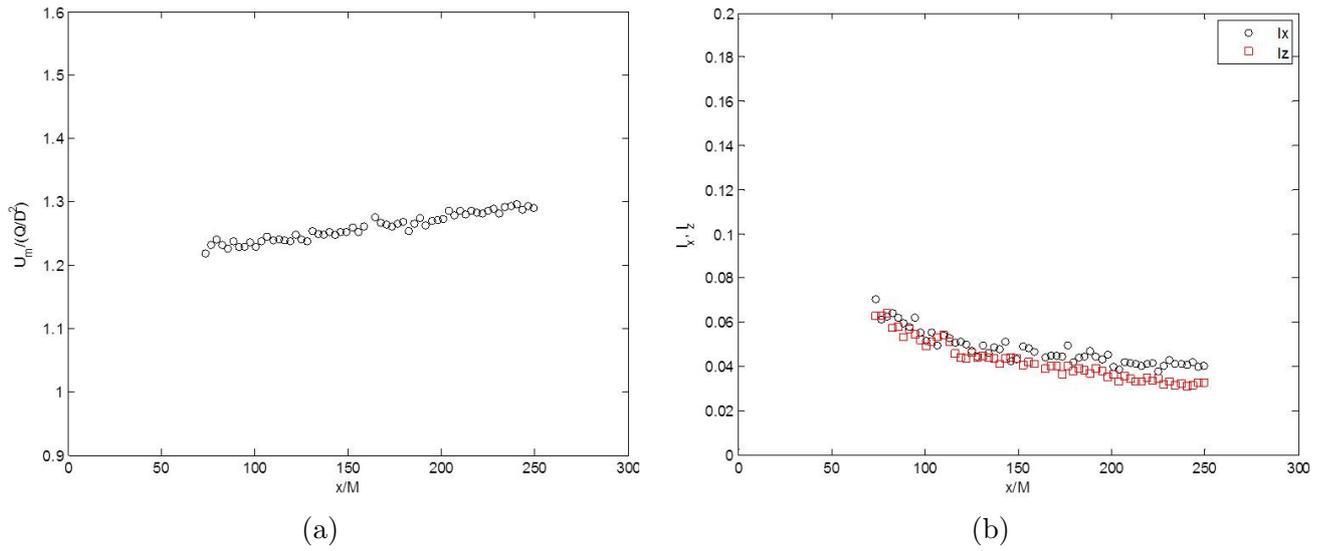


FIG. 3 – Profils longitudinaux de (a) $U_m/(Q/D^2)$ et de (b) I_x, I_z ($Re_M = 1320$).

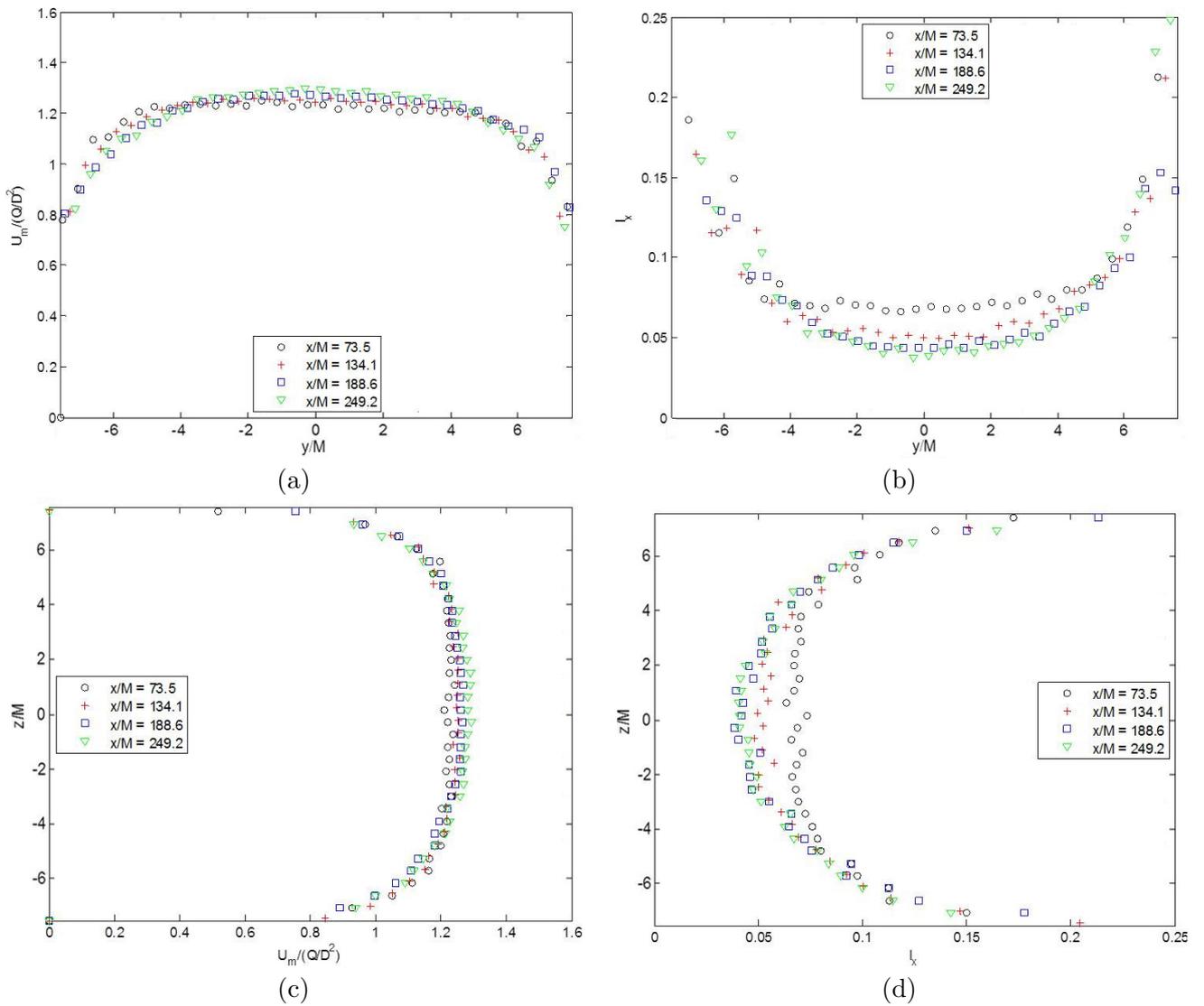


FIG. 4 – Profils transversaux et verticaux de $U_m/(Q/D^2)$ ((a) et (c) resp.) et de I_x, I_z ((b) et (d) resp.) ($Re_M = 1320$).

pas selon x/M (Figures 4a et c respectivement). Par contre, les profils transversaux et verticaux de I_x semblent se superposer et converger pour $x \geq 100$ (Figures 4b et d respectivement).

Nous pouvons finalement conclure que l'écoulement généré est bien homogène isotrope et l'intensité turbulente au centre de la veine varie peu pour $x/M \geq 100$, c'est-à-dire lorsque la décroissance de la turbulence est dominé par la dissipation visqueuse ([2, 5]). Nous choisissons donc d'analyser le transport sédimentaire par mesures PIV/PTV pour $x/M \geq 100$.

3.2 Développement des mesures PIV/PTV des particules fluorescentes

Les particules de suivi du champ fluide (diamètre 20-40 μm) sont marquées au Nile Red dont la longueur d'onde de fluorescence est de 605 nm. Les plus grosses particules injectées (diamètre 180-200 μm) sont quant à elles marquées à la Rhodamine 6G qui fluoresce à 555 nm. Deux caméras ont été utilisées avec des filtres passe-bande de 10 nm, centré sur 550 nm pour détecter le mouvement des grosses particules fluorescentes et centré sur 632.6 nm pour détecter les particules de suivi du champ fluide. Trois types de grosses particules sphériques de PMMA sont utilisés : deux types de particules avec un diamètre recentré sur 180-200 μm et sur 250-300 μm , et un type de particules fortement polydisperses avec un diamètre inférieur à 300 μm . Plusieurs configurations sont considérées en combinant deux tailles caractéristiques de grosses particules pour analyser l'influence d'une taille de particules sur celles qui sont marquées. Les mesures sont réalisées pour deux concentrations de chacune de ces deux tailles de grosses particules (Tableau 1). Dix cas ont été réalisés à deux positions longitudinales de la veine ($x/M = 117$ et $x/M = 239$) pour deux vitesses de l'écoulement correspondant à des Re_M de 660 et 1320. La Figure 5 montre les images brutes des deux caméras (Figure 5a et b), le traitement PIV du champ fluide (Figure 5c) et le traitement PTV des grosses particules fluorescentes (180-200 μm - Figure 5d). Les champs représentés traitent du cas 5 pour $Re_M = 1320$ et $x/M = 117$. A la différence des fines particules (Figure 5a), nous pouvons observer la formation d'un dépôt des grosses particules fluorescentes sur la paroi inférieure (Figure 5b). Le dépôt formé et la suspension des 2 types des grosses particules (180-200 μm et 250-300 μm) contribuent davantage au développement de la couche limite. Nous pouvons en effet observer sur la Figure 5c que l'intensité de la vitesse du fluide est plus faible sur la partie inférieure que sur la partie supérieure de la veine.

Fractions volumiques	Cas							
	1	2	3	4	5	6	7	
$V_{180-200\mu m}$ (%)	0	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	
$V_{250-300\mu m}$ (%)	0	0	0	0.02	0.03	0	0	
$V_{\leq 300\mu m}$ (%)	0	0	0	0	0	0.02	0.03	

TAB. 1 – Configurations des expériences.

4 Conclusions

Des mesures LDV ont été réalisées dans un écoulement turbulent généré par une turbulence de grille homogène et isotrope. Les caractéristiques turbulentes de l'écoulement ont été analysées, l'intensité turbulente est de l'ordre de 4 – 5% à partir d'une distance à la grille supérieure à 100 fois la maille de la grille. Une technique de mesures PIV/PTV de particules fluorescentes a été développée et validée, il est possible d'estimer simultanément les champs de vitesse du fluide et des grosses particules. L'effet des interactions interparticulaires a été observé en corrélation avec le dépôt dans la veine. L'analyse des résultats se poursuit actuellement.

5 Remerciements

L'étude a pu être réalisée grâce au financement de l'Agence National de la Recherche (Projet MASCARET 10-BLAN-0911-01). Nous remercions l'Institut PPRIME pour leur matériel PIV/PTV et Patrick Braud pour l'assistance technique.

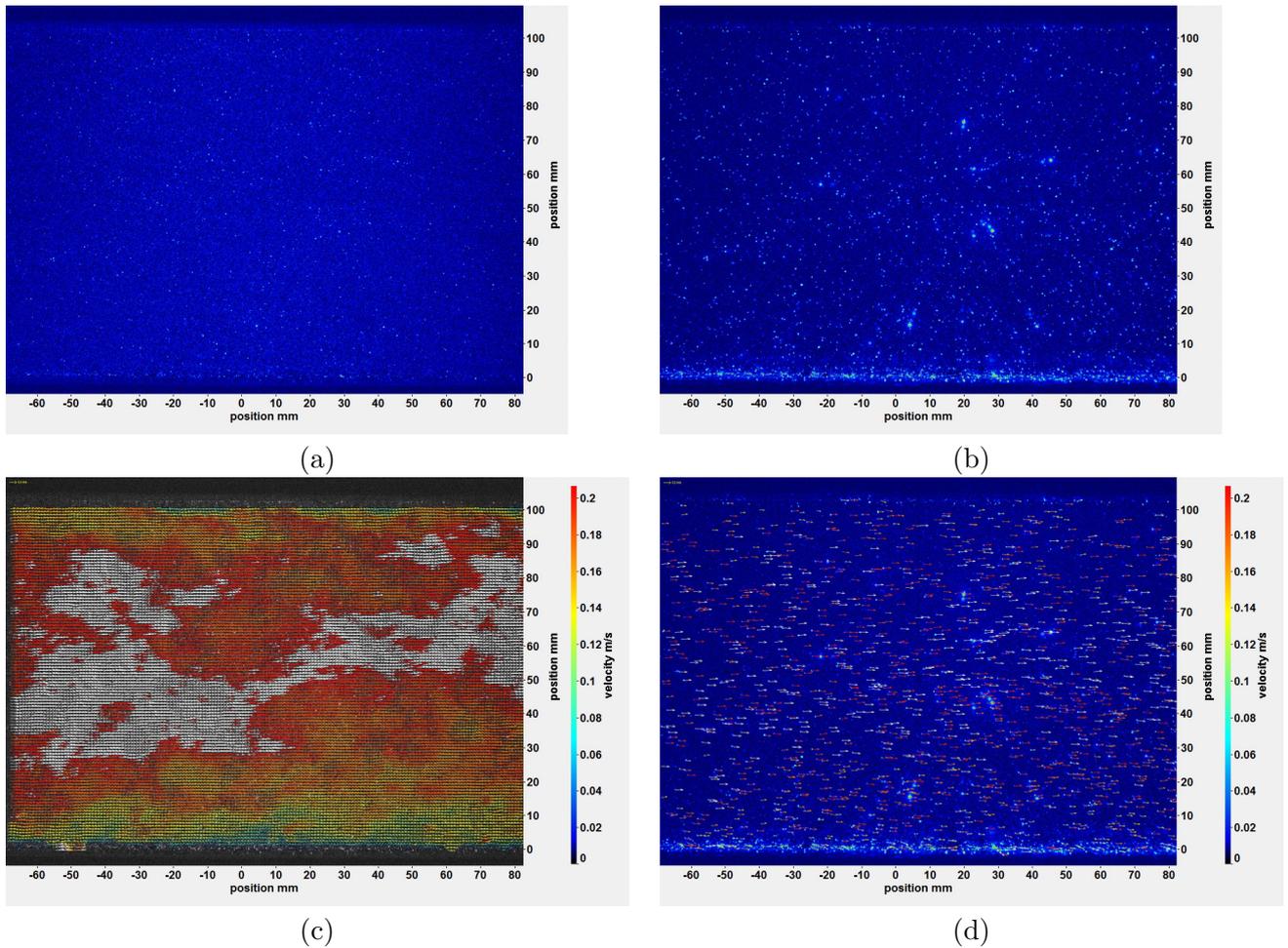


FIG. 5 – Images brutes (a) du champ fluide et (b) du champ de grosses particules. Champs de vitesses par traitements (c) PIV et (d) PTV. Cas 5 : $V_{180-200\mu m} = 0.03\%$, $V_{250-300\mu m} = 0.03\%$, $x/M = 117$ et $Re_M = 1320$.

Références

- [1] Belmabrouck, H., Michard, M. 1998 Taylor length scale measurement by Laser Doppler Velocimetry. *Experiments in Fluids* **25** 69-76
- [2] Comte-Bellot, G., Corrsin, S. 1966 The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence. *Journal of Fluid Mechanics* **25** 657-682
- [3] Cox, D.T., Kobayashi, N. 2000 Identification of intense, intermittent coherent motions under shoaling and breaking waves. *Journal of Geophysical Research* **105** (C6) 14223-14236
- [4] Deigaard, R., Fredsoe, J., Hedegaard, I.B. 1986 Suspended sediment in the surf zone. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* **112** (1) 115-128
- [5] Murzyn, F., Bêlorgey, M. 2005 Experimental investigation of the grid-generated turbulence features in a free surface flow. *Experimental Thermal and Fluid Science* **29** 925-935
- [6] Mutlu Sumer, B., Whitehouse, R.J.S., Torum, A. 2001 Scour around coastal structures : a summary of recent research. *Coastal Engineering* **44** 153-190
- [7] Mutlu Sumer, B., Chua, L.H.C., Cheng, N.-S., Fredsoe, J. 2003 Influence of turbulence on bed load sediment transport. *Journal of Hydraulic Engineering* **129** 585-596
- [8] Rashidi, G., Banerjee, S. 1988 Turbulence structure in free-surface channel flows. *Physics of Fluids* **31** (9) 2491-2503