



**HAL**  
open science

# Vélocimétrie par scan 3D d'écoulements turbulents : application à un écoulement à surface libre sur fond poreux

Gauthier Rousseau, Bob de Graffenried, Christophe Ancey

► **To cite this version:**

Gauthier Rousseau, Bob de Graffenried, Christophe Ancey. Vélocimétrie par scan 3D d'écoulements turbulents : application à un écoulement à surface libre sur fond poreux. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097831

**HAL Id: hal-02097831**

**<https://hal.science/hal-02097831v1>**

Submitted on 12 Apr 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Vélocimétrie par scan 3D d'écoulements turbulents : application à un écoulement à surface libre sur fond poreux

Gauthier ROUSSEAU <sup>1</sup>, Bob de GRAFFENRIED <sup>1</sup>, Christophe ANCEY <sup>1</sup>

<sup>1</sup> École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire d'Hydraulique Environnementale

Email auteur correspondant : gauthier.rousseau@epfl.ch

Cet article présente une méthode de mesure utilisant deux techniques laser connues : le scan par adaptation d'indice de réfraction (RIMS) et la vélocimétrie par images de particules (PIV). Le couplage de ces deux techniques permet de mesurer finement les vitesses locales du fluide dans un milieu granulaire saturé. Dans notre cas, nous étudions l'écoulement d'un fluide à surface libre sur un milieu granulaire. Le fluide iso-indice utilisé a des propriétés proches de celles de l'eau et le lit granulaire est formé de billes de verre. C'est une configuration qui s'approche de l'objet d'étude dans notre laboratoire : les torrents de montagne. La spécificité de cette technique est la mesure en continu des vitesses du fluide tandis que la nappe laser se déplace dans la direction perpendiculaire à l'écoulement. Nous utilisons la méthode des doubles moyennes pour déduire les grandeurs d'intérêt telles que la contrainte turbulente ou la contrainte induite par la forme du lit. Nos résultats expérimentaux montrent la robustesse et la répétabilité de cette technique pour étudier le mélange dans les trois dimensions spatiales.

## 1 Introduction

Spécialisés dans l'étude de la dynamique des fluides géophysiques, nous concentrons nos recherches sur les rivières de montagne à forte pente, c.-à-d. des écoulements d'eau turbulents et peu profonds. Ces rivières ont un lit constitué de matériaux grossiers, comme des galets ou des rochers, mais aussi des éléments plus petits qui viennent se loger dans les interstices. À l'interface entre le lit granulaire (qui se comporte comme un milieu poreux) et l'écoulement pleinement turbulent, prend place une zone de transition où le fluide subit une forte accélération. C'est précisément à cet endroit qu'un grain peut être délogé du lit quand son équilibre statique est rompu. Les expériences sur un lit imperméable, lisse ou rugueux, ont été largement documentées dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> s. [1]. Les études précises qui s'intéressent à des lit poreux et mobiles sont plus rares, en partie car elles nécessitent des techniques de mesure spéciales.

La technique la plus courante est d'espacer artificiellement des matériaux solides et de mesurer entre les pores [2]. Les mesures sont alors limitées aux larges interstices et la structure du milieu poreux est fixée artificiellement. Ici, nous employons une méthode dite iso-indice : certains mélanges de fluides ont un indice de réfraction qui peut être ajusté en sorte que matériaux solides transparents et fluide aient le même indice. Le mouvement par translation d'une nappe laser perpendiculairement à l'écoulement permet de réaliser un scan visualisant l'intérieur. Cette technique de scan par adaptation d'indice se nomme *Refractive Index Matched Scanning* (RIMS) en anglais.

La méthode RIMS a été récemment couplée à des techniques de vélocimétrie (voir [3]). En ajoutant des traceurs, on peut utiliser une méthode de vélocimétrie de particule par imagerie pour mesurer les champs de vitesse pendant le scan. Ce type de mesures est soumis à un certain nombre de contraintes car l'écoulement est turbulent. Il est donc nécessaire de prendre des précautions pour mesurer correctement les grandeurs d'intérêt (la contrainte turbulente ou induite par la forme du lit). C'est l'objectif de la technique de mesure par scan 3D que nous présentons dans cet article.

Nous présentons, dans un premier temps, les caractéristiques du dispositif expérimental utilisé pour coupler une méthode RIMS à une technique PIV (scans 3D). Dans un deuxième temps, nous analyserons la capacité des scans 3D continus pour mesurer les champs de vitesse. Une comparaison entre une méthodologie à nappe laser fixée et à nappe laser mobile nous permettra d'estimer les erreurs de mesure et de valider nos choix. Enfin, nous commenterons une visualisation 3D permettant de rendre compte de l'effet de la paroi pour illustrer l'intérêt de cette technique.

## 2 Dispositif expérimental

### 2.1 Canal, matériaux et conditions expérimentales

L'expérience est réalisée dans un canal étroit de 6 cm de large et de 2,5 m de long [voir Fig. 1(a)] pour une inclinaison de  $\zeta = 0,5 \%$ . Un réservoir d'une contenance de 30 L relié à un trop-plein permet de libérer un fluide avec un débit constant. Le milieu poreux est constitué d'un lit de billes de verre d'épaisseur  $h_s = 5$  cm. Le milieu est bi-disperse (billes de 7 et 9 mm en proportion égale,  $d_{50} = 8$  mm) pour créer un arrangement aléatoire de billes. La région d'intérêt est placée à une distance suffisamment grande de la sortie pour rendre négligeable les effets de sortie du canal.

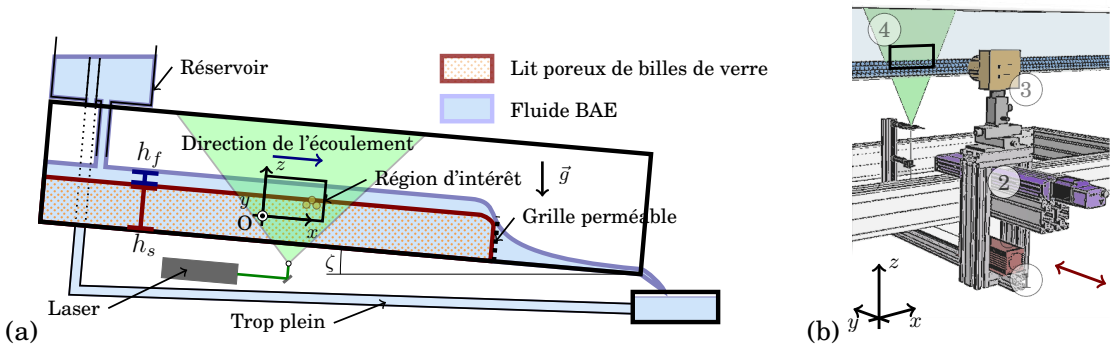


Figure 1: (a) Schéma de principe du dispositif expérimental. (b) Visuel 3D du dispositif. ① : laser; ② : unité linéaire pour le déplacement du système selon  $y$ ; ③ : caméra haute fréquence; ④ : nappe laser

Pour le mélange iso-indice, une proportion en volume de 40 % d'éthanol et 60 % d'alcool de benzyl (BAE) permet d'atteindre un indice optique  $n_f \approx n_{verre} \approx 1,472 \pm 0,002$  à  $20^\circ \text{C}$  (l'indice  $f$  réfère au fluide BAE). Ce mélange a des caractéristiques physico-chimiques proches de celles de l'eau. La viscosité cinématique à cette température a été mesurée par un viscosimètre à tube Cannon-Ubbelohde :  $\nu_f = 3,0 \pm 0,1 \text{ mP} \cdot \text{s}$ . La masse volumique a été mesurée à  $\rho_f = 0,95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Ces valeurs correspondent à des mesures effectuées indépendamment [4]. De la Rhodamine B est diluée dans le fluide pour améliorer le contraste entre les billes et le fluide. Cette configuration BAE/billes de verre a été auparavant utilisée dans notre laboratoire pour localiser des billes en 3D [5].

$\zeta$ (%)	W [cm]	Q [mL/s]	$h_f$ [mm]	$U_s$ [m/s]	$Re_s$	Fr	$U_i$ [m/s]	$d_{50}$ [mm]	$Re_i$	$S_m$ [-]
0,5	6,0	182	11	0,4	1556	1,18	0,015	8	41	1,35

Tableau 1: Conditions expérimentales de test,  $U_s$  est la vitesse de surface maximum,  $Re_s = U_s h / \nu$  est le nombre de Reynolds de surface,  $Fr = U_s / \sqrt{g h}$  est le nombre de Froude,  $U_i$  est la vitesse du fluide interstitiel,  $Re_i = d_{50} U_i / \nu$  est le nombre de Reynolds interstitiel,  $S_m = h / d_{50}$  est la hauteur relative.

### 2.2 Imagerie et optiques

Une caméra Basler acA2040-180kc permet de réaliser des films à une fréquence  $f$  de 420 Hz et à une résolution de  $1496 \text{ px} \times 700 \text{ px}$ . La focale de l'objectif est 35 mm, son ouverture  $f/2,8$ . La caméra est placée à 30 cm de la paroi du canal et permet d'avoir un champ de vision de  $73,8 \times 34,5 \text{ cm}^2$  (soit 10 diamètres de bille en hauteur). Les traceurs utilisés sont de fines particules de verre de diamètre 8 à 12  $\mu\text{m}$ .

Un miroir est monté sur une unité linéaire qui peut se déplacer dans la direction  $y$  et renvoie le faisceau laser (laser Diode-Pumped Solid State, 4 W, 532 nm). Une lentille cylindrique génère une nappe d'une épaisseur d'environ 1 mm dans la direction de l'écoulement, au niveau de la région d'intérêt. La translation de la nappe perpendiculairement à l'écoulement permet de scanner sur une certaine largeur pendant que l'on enregistre les images.

## 2.3 Position des billes et porosité mesurées par RIMS

L'acquisition d'images pendant la translation de la nappe selon  $y$  permet de localiser les billes  $(x_b, y_b, z_b)_n$  ainsi que leurs diamètres respectifs  $D_n$ . A partir de cette localisation, une matrice spatiale 3D de porosité  $B(x, y, z)$  est construite dans l'ensemble de la région d'intérêt, avec une résolution de l'ordre d'un dixième de diamètre de bille. Chaque cellule de la matrice 3D prend la valeur 1 si elle n'est pas contenue dans la bille, 0 sinon. Lorsqu'une cellule est coupée par la surface de la bille, la porosité est calculée en fonction de la proportion occupée par la bille dans la cellule. La porosité moyenne pour une position  $y$  de la nappe laser  $\epsilon_{y=25 \text{ mm}}(z) = \langle B(x, y = 25 \text{ mm}, z) \rangle_x$ <sup>1</sup> peut être obtenue en effectuant une moyenne de la tranche selon  $x$ . Pour déterminer le profil de porosité global  $\epsilon(z)$  selon la verticale, il suffit moyenner la matrice 3D selon  $x$  et  $y$ :  $\epsilon(z) = \langle B \rangle_{xy}$  (voir Fig. 2).

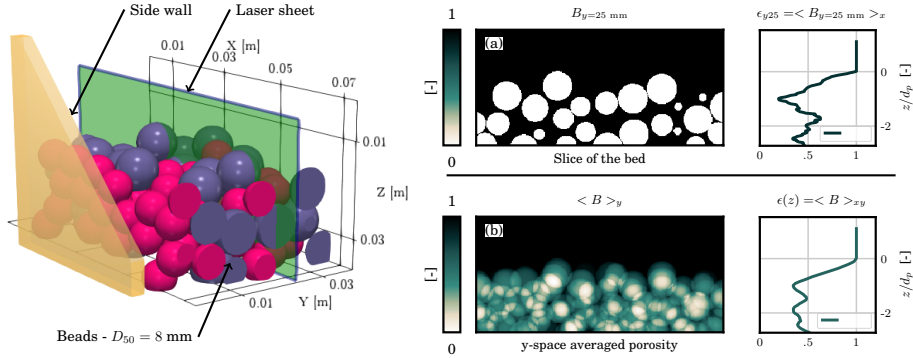


Figure 2: Mesure de la porosité par RIMS, (a) le champs  $B$  moyenné selon  $x$  pour une tranche permet de retrouver un profil peu réaliste. (b) La moyenne d'ensemble selon  $x$  et  $y$  nous permet de retrouver une porosité globale lissée.

On définit la hauteur moyenne spatiale et temporelle<sup>2</sup>  $h_f = \langle \langle z_s(x, t) - z_b \rangle \rangle$  où  $z_s$  est la position de la surface et  $z_b$  la position du lit ( $z_b$  est défini comme étant le sommet de la couche de sédiment).

## 2.4 Technique PIV

Pour une position de la nappe  $y_m$  donnée, un masque est généré à partir de la connaissance de la position des billes. De même, l'interface fluide/air qui se déplace avec le temps est détectée afin de masquer la partie supérieure [voir Fig. 3(a)]. Pour traiter numériquement les séquences, nous avons utilisé la librairie *openCV*.

L'algorithme *Good Feature To Track* (GFT) permet de filtrer en amont les motifs à fort contraste [6]. Puis, un algorithme mesure le « flot optique » (Optical Flow - OF) [7] [voir Fig. 3(b)] par fenêtrage autour des points d'intérêts. Ensuite, une interpolation spatiale est nécessaire pour combler les lacunes où l'information n'était pas de qualité suffisante pour la mesure. Cette opération est souvent réalisée en PTV et est coûteuse en temps de calcul. De récentes améliorations de la librairie *Visual Tool Kit* permettent d'implémenter une structure de données de type arbre (*tree*) pour indexer spatialement les points en constituant des *buckets* de données. Rechercher et réaliser des interpolations spatiales se fait alors plus efficacement. Nous avons employé une méthode d'interpolation gaussienne (rayon de 15 px, écart-type de 5,6 px). Finalement, par ce processus, nous pouvons estimer le déplacement sur une grille entre chaque image [voir Fig. 3(c)]. L'algorithme utilisé a été testé sur des images du *test case A* du challenge de PIV 2014 et semble plus précis que les méthodes classiques de PIV (Voir [8] pour une discussion plus complète sur les différences d'approche entre PIV classique et celles provenant du domaine de la vision par ordinateur). Nous avons mis l'algorithme ainsi que les tests à disposition sur GitHub (<https://github.com/groussea/opyflow>).

1. On définit la moyenne spatiale discrète  $\langle \eta \rangle_x = \frac{1}{M} \sum_{x_0}^{x_M} \eta(x_j)$  et la double moyenne spatiale  $\langle \eta \rangle_{xy} = \frac{1}{MN} \sum_{x_0}^{x_M} \sum_{y_0}^{y_N} \eta(x_j, y_k)$ .  
 2. On définit la moyenne temporelle discrète  $\bar{\eta} = \frac{1}{N} \sum_{t_0}^{t_N} \eta(t_j)$ .

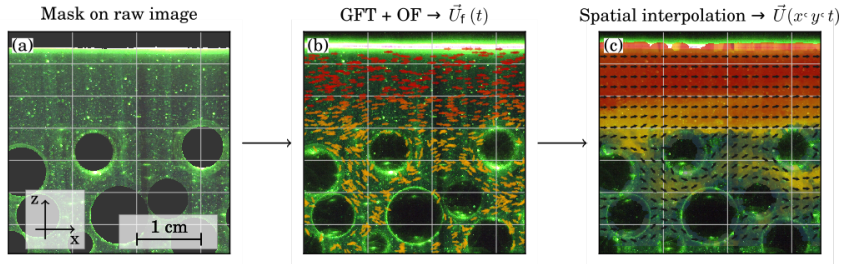


Figure 3: Représentation graphique de l'algorithme de traitement d'images.

## 3 Méthodologie des scans 3D pour mesurer les vitesses

### 3.1 Grandeurs d'intérêt

Un écoulement turbulent peu profond avec une faible hauteur d'eau est fortement hétérogène. Du fait de la turbulence, l'écoulement fluctue avec le temps. D'autre part, il varie spatialement à cause de la rugosité. À l'échelle du volume de mesure, on considère un écoulement unidirectionnel selon  $Ox$ .

Il est nécessaire de réaliser une analyse temporelle et spatiale pour déduire correctement les contraintes qui s'appliquent au fluide. C'est la méthodologie des doubles moyennes (*double averaged methodology* en anglais). Nous ne développerons pas les raisons de ce choix, mais exposerons les grandeurs et relations principales pour comprendre les résultats expérimentaux. Nous invitons le lecteur à lire les travaux de Nikora et ses coauteurs pour plus d'information [9].

La vitesse instantanée peut se décomposer de la manière suivante:

$$u_i = \langle \bar{u}_i \rangle_x(z) + \tilde{u}_i(x, z) + u'_i(x, z, t), \quad (1)$$

où  $i$  représente la composante  $x$  ou  $z$ .  $\tilde{u}_i(x, z)$  est simplement la déviation de la vitesse locale moyenne par rapport à la vitesse  $\langle \bar{u}_i \rangle_x$ . On l'estime en calculant  $\tilde{u}_i(x, z) = \bar{u}_i - \langle \bar{u}_i(x, z, t) \rangle$ .

Ces grandeurs sont importantes pour estimer la contrainte turbulente  $\tau_t = -\rho_f u'_x u'_y$  et la contrainte induite par la forme du lit  $\tau_v = -\rho_f \tilde{u}_x \tilde{u}_y$ . En effet dans la partie d'écoulement libre, on peut écrire une équation de bilan de quantité de mouvement moyennée [9]:

$$0 = \rho g(h - z) \sin \zeta + \tau_t + \tau_v. \quad (2)$$

Dans le lit cette relation n'est plus valable car on doit prendre en compte l'interaction fluide-solide.

### 3.2 Méthodologie

Pour localiser les billes et déduire la porosité, nous avons eu besoin de réaliser un scan par translation continue de la nappe laser dans la matrice poreuse (voir § 2.3). En visualisant ces scans, nous avons réalisé que nous pouvions exploiter directement ces séquences d'images pour accéder à des informations d'écoulements dans la matrice poreuse et en surface. Plutôt que d'envisager de réaliser des mesures à nappe fixée pour différentes positions  $y_m$ , nous avons exploré une méthodologie de scan continu pour déduire les champs de vitesse.

Cette méthodologie permet de diminuer le stockage de données et le temps d'expérimentation, mais a des limitations quant à l'information récoltée pour une vitesse de translation de nappe laser donnée. Par analogie, un scanner optique d'un document manuscrit ou d'une image nécessite d'ajuster la vitesse de translation du chariot pour définir la résolution de la numérisation. Si l'écoulement est non turbulent, l'information locale dépend simplement de la longueur caractéristique de variation de l'écoulement  $L_u$  due essentiellement à la topographie (qui sera donc de l'ordre de grandeur de la taille d'une bille  $d_{50}$ ). Pour continuer avec l'analogie, dans le cas d'une numérisation de document,  $L_u$  serait l'échelle spatiale de variation des couleurs. Pour avoir au moins un point de mesure pour chaque variation de vitesse, il apparaît alors la condition :

$$V_{MLS} < fL_u, \quad (3)$$

où  $f$  est la fréquence d'acquisition et  $V_{MLS}$  est la vitesse de translation de la nappe laser.

Cependant, contrairement à un scan classique, l'écoulement est ici turbulent, et cela ajoute une condition supplémentaire. L'information cherchée fluctue avec le temps. La mesure instantanée n'est pas la mesure de l'écoulement moyen et il faut attendre un certain temps  $T_{u'}$  pour avoir une mesure locale fiable de la vitesse moyenne. On doit alors respecter la seconde contrainte :

$$V_{MLS} < L_u/T_{u'}, \quad (4)$$

où  $T_{u'}$  représente le temps nécessaire pour obtenir une valeur fiable de la vitesse moyenne de l'écoulement local dans le cas où la nappe est fixée.

Comme nous n'avons pas d'information *a priori* sur  $T_{u'}$ , nous avons effectué une mesure à nappe fixée pour l'évaluer.

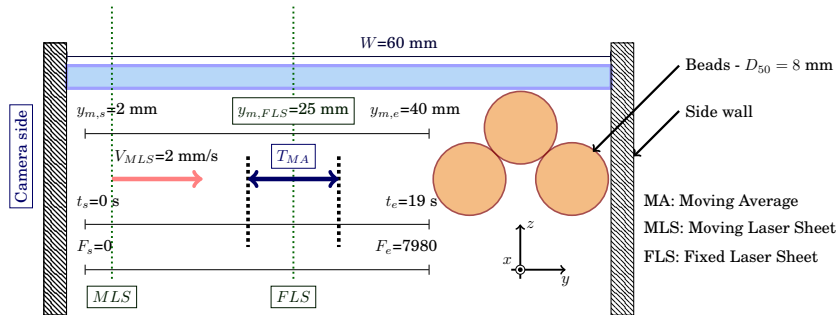


Figure 4: Schéma représentant la méthode de scan continu et comparaison avec une mesure par nappe laser fixe.

	Type	$y_m$ [mm]	$T_{tot}$ [s]	$f$	$V_{MLS}$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
Cas 1	nappe laser fixée (FLS)	25	20	210	0
Cas 2	scan continu (MLS)	2 – 40	20	210	0,002

### 3.3 Mesures sur nappe fixe

#### 3.3.1 Moyennes temporelles et spatiales

La mesure à nappe fixe s'est faite à 25 mm du bord, sur une période de 20 secondes, ce qui permet d'accéder aux informations de turbulence et d'écoulement moyen sur cette tranche de l'écoulement. La figure 5 permet de visualiser les étapes de moyenne temporelle et spatiale pour les fluctuations selon  $x$ ,  $y$  mais aussi de représenter les contraintes de cisaillement turbulente et spatiale. On observe une forte hétérogénéité des vitesses et des contraintes. On peut aussi observer que le profil vertical de contrainte turbulente est du bon ordre de grandeur même s'il existe un léger décalage avec le flux vertical de quantité de mouvement (2).

#### 3.3.2 Statistique turbulente

En examinant les figures 5 et 6, on comprend aisément que la dynamique turbulente dépend de l'endroit où s'effectue la mesure. Si on situe un point de mesure au-dessus des billes dans l'écoulement proche de la surface libre (points A1, B1, C1), alors la turbulence est spatialement homogène et de faible intensité. Si on s'intéresse à la turbulence au niveau du sommet des sédiments alors l'intensité et la variation spatiale augmente. En aval de la bille (point C3), la vitesse moyenne est proche de 0 et le rapport signal sur bruit devient important. Le point A3, en amont d'une bille, est un point particulier où les vitesses sont faibles, mais où la turbulence relative reste importante. Les zones de l'écoulement correspondant au point A3 constituent la contrainte la plus forte pour la vitesse  $U_{ls}$ . Ce point intéresse la problématique de transport sédimentaire car les fluctuations sont susceptibles de déloger la bille de

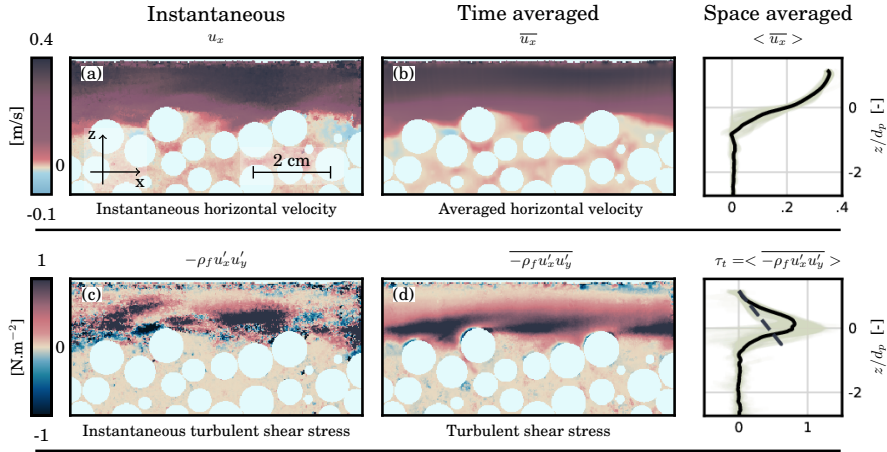


Figure 5: De la mesure instantanée à la moyenne spatiale. La nappe laser est fixée à  $y_m = 25$  mm de la paroi. Les mesures instantanées sont toutes représentées à un même temps aléatoirement choisi pendant la mesure. (En bas à droite) La ligne droite à tirets représente l'intégration de la contrainte  $\rho g(h - z) \sin \zeta$ .

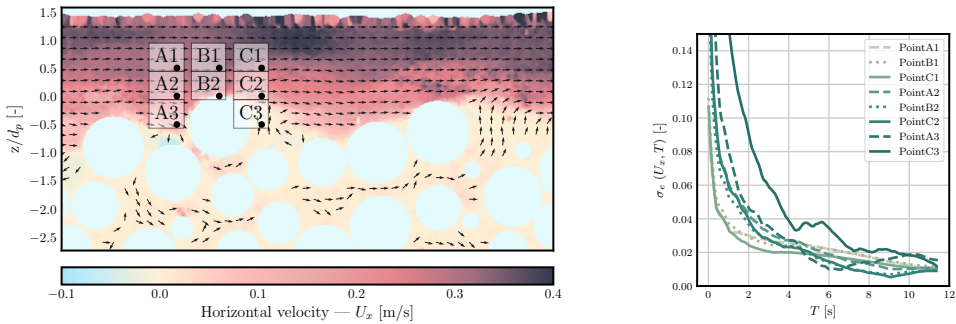


Figure 6: À Gauche, position des points d'intérêt pour l'analyse statistique de la turbulence. À droite, évolution de l'écart type de l'erreur empirique.  $\sigma_e(U_x, t) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \sqrt{((\overline{U_x})_T^i - (\overline{U_x})_{T_{tot}})^2 / (\overline{U_x})_{T_{tot}}}$ , où  $(\overline{U_x})_T^i$  la vitesse moyenne calculée sur  $n = 700$  échantillons de longueur  $T$  par rapport à la moyenne empirique calculée sur  $T_{tot} = 20$  secondes. L'erreur passe sous la barre des 10 % après 2 secondes.

son emplacement. D'après la figure 6, on peut voir que le temps  $T_{u'}$  est de l'ordre de 2 secondes pour avoir une erreur relative sur la moyenne de 10 %.

Ainsi, pour définir la vitesse de translation théorique qui peut nous permettre de visualiser l'écoulement en prenant  $L_u \approx D_{50}/2 = 4$  mm, on trouve  $V_{MLS} \approx 2$  mm/s. Dans cette configuration, la condition la plus contraignante est l'inégalité (4) car  $f \gg 1/T_{u'}$ .

### 3.4 Comparaison entre la mesure fixe et le scan continu

Nous avons réalisé un scan avec la vitesse  $V_{MLS} = 2$  mm/s de  $y_m = 2$  mm à  $y_m = 40$  mm. Pour comparer les deux méthodologies, nous avons estimé le champ de vitesse moyen pour la position  $y_m$  (nappe mobile) =  $y_m$  (nappe fixe) = 25 mm.

On peut comparer l'estimation des profils de vitesse et de contrainte turbulente dans le cas où la nappe est fixée et dans le cas où la nappe est déplacée jusqu'à cette position. Le paramètre de moyenne temporelle glissante  $T_{MA}$  (voir Fig. 4) est déterminant car il indique sur quelle durée mais aussi sur quelle largeur effectuer une moyenne pour déterminer les informations locales. La figure 7

permet d'apprécier l'erreur sur la mesure en soustrayant aux profils obtenus les profils de vitesse et de contrainte turbulente obtenus pour une nappe fixée. On obtient empiriquement une erreur minimale sur les profils pour  $T_{MA} = 2$  secondes, ce qui correspond à nos attentes d'après le raisonnement de la section 3.3.2.

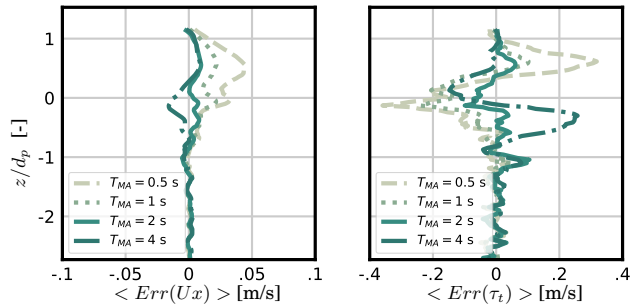


Figure 7: Comparaison entre les mesures de la nappe fixe et de la nappe mobile.  $Err(Ux) = \langle \overline{u_x} \rangle_{MLS-TA=2s} - \langle \overline{u_x} \rangle_{FLS}$ . On observe que l'erreur sur la mesure dépend du temps que l'on utilise pour réaliser la moyenne glissante.

## 4 Observations

### 4.1 Représentation 3D et effet de la paroi

Après avoir vérifié la vitesse moyenne et appliqué une moyenne glissante locale, nous pouvons tracer les trois composantes spatiales du champ de vitesse moyenne (voir Fig. 8). La vitesse  $\overline{u_x}$  augmente lorsqu'on s'éloigne de la paroi selon  $y$ . Cela nous permet d'estimer la zone où l'effet des parois est négligeable à partir de  $y_m = 10$  mm. Cette mesure montre aussi que toute mesure à moins de 5 mm sera fortement perturbée par la paroi, ce qui peut remettre en cause un certain nombre de mesures expérimentales réalisées dans le passé. Cela justifie pleinement, *a posteriori*, l'emploi de la technique d'adaptation d'indice pour faire des mesures loin de la paroi. D'autres résultats ont été obtenus et permettront de tester les aspects théoriques du développement d'une couche limite pour des écoulements turbulents à faible hauteur d'eau.

## 5 Conclusion et perspectives

Cet article a présenté une technique de vélocimétrie par scan 3D d'un écoulement turbulent à surface libre à faible hauteur. La mesure de ce type d'écoulement nécessite d'accéder à l'écoulement interstitiel dans le lit granulaire. Nous avons employé une technique de mesure par PIV et « flot optique » (*optical flow*). L'analyse numérique s'est faite à l'aide d'outils *open source* accessibles via les bibliothèques *opencv* et *vtk*, qui offrent des algorithmes répondant pleinement à nos besoins métrologiques. Nous avons retenu une mesure par scan continu car elle permet à la fois de déterminer la porosité moyenne du lit et de livrer des informations sur l'écoulement en une seule prise d'image. Une vitesse de translation du scan suffisamment lente – en comparaison du rapport entre échelles spatiale et temporelle caractéristiques des variations de vitesse – permet d'accéder aux informations locales des fluctuations temporelles de vitesse et leur moyenne dans le temps. Nous avons démontré qu'en changeant le temps de moyenne autour du point de mesure, il est possible d'améliorer les mesures de vitesse. Cette technique fournit une information riche et, nous semble-t-il nouvelle ; nous espérons qu'elle améliorera la compréhension de la dynamique de ce type d'écoulement ainsi que son rôle dans le transport de sédiment à faible hauteur d'eau.

En ce qui concerne l'instrumentation, le choix de réaliser une mesure à l'aide d'une nappe laser et d'une caméra contraint à mesurer seulement deux composantes de la vitesse sur les trois nécessaires à



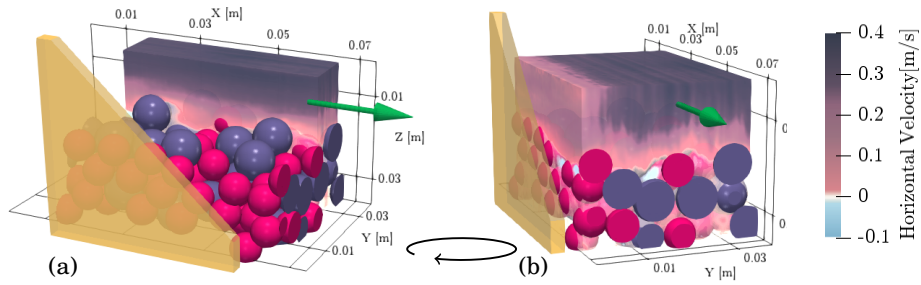


Figure 8: Visualisation 3D de la vitesse horizontale. (a) vision de profil avec une découpe du champ de vitesse au niveau de la position de la nappe laser fixe  $y_m = 25$  mm. Le champ est similaire à celui de la figure 5(b). (b) La vision face à l'écoulement sans coupe selon  $y$  permet d'estimer le gradient de vitesse dû à la paroi.

une mesure complète de l'écoulement. On peut simplement pivoter la nappe laser et regarder selon un autre angle pour mesurer la composante selon  $y$ . On pourrait aussi utiliser une technique de stéréoscopie par scan pour estimer la troisième composante.

## Références

- [1] Iehisa Nezu and Wolfgang Rodi. Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(5):335–355, 1986.
- [2] Dubravka Pokrajac and Costantino Manes. Velocity measurements of a free-surface turbulent flow penetrating a porous medium composed of uniform-size spheres. *Transport in porous media*, 78(3):367, 2009.
- [3] Wei-Jay Ni and Hervé Capart. Cross-sectional imaging of refractive-index-matched liquid-granular flows. *Experiments in Fluids*, 56(8):163, 2015.
- [4] Kai-Di Chen, Yi-Feng Lin, and Chein-Hsiun Tu. Densities, viscosities, refractive indexes, and surface tensions for mixtures of ethanol, benzyl acetate, and benzyl alcohol. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 57(4):1118–1127, 2012.
- [5] Kasper van der Vaart, Parmesh Gajjar, Gaël Epely-Chauvin, Nicolas Andreini, JMNT Gray, and Christophe Ancey. Underlying asymmetry within particle size segregation. *Physical review letters*, 114(23):238001, 2015.
- [6] Jianbo Shi et al. Good features to track. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1994. Proceedings CVPR'94., 1994 IEEE Computer Society Conference on*, pages 593–600. IEEE, 1994.
- [7] Jean-Yves Bouguet. Pyramidal implementation of the affine lucas kanade feature tracker description of the algorithm. *Intel Corporation*, 5(1-10):4, 2001.
- [8] Dominique Heitz, Etienne Mémin, and Christoph Schnörr. Variational fluid flow measurements from image sequences: synopsis and perspectives. *Experiments in fluids*, 48(3):369–393, 2010.
- [9] Vladimir Nikora, Ian McEwan, Stephen McLean, Stephen Coleman, Dubravka Pokrajac, and Roy Walters. Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background. *Journal of hydraulic Engineering*, 133(8):873–883, 2007.