



**HAL**  
open science

## Etude de couches limites oscillantes par vélocimétrie laser Doppler

Laure Vignal, Hervé Michallet, Dominic A. van Der A, Dominique Mouazé,  
Paulo A. Silva, Tiago Abreu, Eric Barthélemy

► **To cite this version:**

Laure Vignal, Hervé Michallet, Dominic A. van Der A, Dominique Mouazé, Paulo A. Silva, et al..  
Etude de couches limites oscillantes par vélocimétrie laser Doppler. 14e Congrès Francophone de  
Techniques Laser, Sep 2014, Marseille, France. hal-01084706

**HAL Id: hal-01084706**

**<https://hal.science/hal-01084706v1>**

Submitted on 19 Nov 2014

**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.



## ETUDE DE COUCHES LIMITES OSCILLANTES PAR VELOCIMETRIE LASER DOPPLER

Laure Vignal<sup>a,\*</sup>, Hervé Michallet<sup>a</sup>, Dominic Van der A<sup>b</sup>, Dominique Mouazé<sup>c</sup>,  
Paulo A.Silva<sup>d</sup>, Tiago Abreu<sup>e</sup>, Eric Barthélemy<sup>a</sup>

(a) LEGI, CNRS, Université de Grenoble, BP53, 38041 Grenoble Cedex 9, France

(b) School of Engineering, University of Aberdeen, Aberdeen AB24 3UE, Ecosse

(c) M2C, UMR 6143, 24 rue des Tilleuls, 14000 CAEN, France

(d) CESAM & Department of Physics, University of Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal

(e) CESAM & Dep. of Civil Eng., ISEP - Polytechnic of Porto, 4200-072 Porto, Portugal

\*Correspondant: [laure.vignal@legi.grenoble-inp.fr](mailto:laure.vignal@legi.grenoble-inp.fr)

### 1. Introduction

Le transport sédimentaire induit par les vagues à l'approche de la côte est piloté par des processus non linéaires et turbulents. Les non-linéarités des vagues se caractérisent par une dissymétrie de vitesse (les crêtes hautes des vagues sont de courte durée et les creux peu profonds de longue durée) et une asymétrie de vitesse (ou dissymétrie d'accélération, caractérisant la raideur des fronts). Des études récentes [1,2] indiquent que des fronts raides (vagues asymétriques) produisent des vitesses dissymétriques dans la couche limite. Ainsi, pour développer des formules de prédiction de transport des sédiments, la compréhension détaillée de la dynamique de la couche limite de fond et des contraintes de cisaillement sous les ondes de surface apparaît essentielle. Ceci justifie de chercher à réaliser des mesures de vitesse dans les tous premiers millimètres au-dessus du lit.

Par ailleurs, la caractérisation de la turbulence sous les vagues déferlantes reste une question ouverte [3], en particulier pour chercher à évaluer la part provenant de la vague déferlée de celle produite par frottement au fond.

Actuellement, l'essentiel de notre connaissance des couches limites oscillantes est issu de mesures réalisées sur des fonds fixes horizontaux [4]. En laboratoire, l'évolution des non-linéarités des vagues, lors de leur propagation et de leur déferlement, a été principalement étudiée pour des plages de pentes relativement fortes ( $> 1:40$ ). Cependant, des études de terrain récentes sur des plages réelles de pentes moins raides (1:80) ont montré que certains processus non-linéaires sont différents par rapport aux cas des plages de pentes relativement raides ( $> 1:40$ ) [5]. Cette constatation a motivé le lancement d'une série d'expériences de laboratoire dans le cadre du projet européen GLOBEX sur une plage à fond fixe de pente 1:80 ([6] pour une vue globale du projet, [7] pour ce qui concerne les mesures de couche limite).

### 2. Mise en œuvre des expériences

#### 2.1. Installation expérimentale

Les expériences ont été menées dans le canal à houle Scheldt de Deltares (Pays-Bas) de longueur 110m, largeur 1m et hauteur 1,2m (Figure 1). Le canal est équipé de parois latérales en verre sur toute sa longueur sauf dans sa partie centrale de 10m de longueur où les parois latérales sont faites en béton. Le générateur d'onde de type piston, équipé d'un système de compensation à réflexion active (ARC), a une course de 2m. Il peut générer des ondes de hauteur de vague significative maximale de 0,25m pour des vagues irrégulières et de 0,4m pour des vagues régulières. Pour ces expériences une plage en béton de pente 1:80 a été construite à partir de la position  $x=16,6$ m ( $x=0$ m correspondant à la position centrale du batteur-piston). Le diamètre médian  $D_{50}$  des grains composants le béton était de 0,75mm ( $D_{10}$  et  $D_{90}$  de valeurs respectivement 0,49mm et 1,15mm), ce qui permet d'estimer la rugosité du lit. La hauteur d'eau au repos au niveau du batteur était de 0,85 m pour toutes les conditions expérimentales.

#### 2.2. Conditions expérimentales

Plusieurs conditions de vagues ont été simulées : irrégulières, bichromatiques et régulières. Compte-tenu des conditions d'écoulement, tous les essais correspondent à un régime d'écoulement transitoire entre laminaire et turbulent, pour un nombre de Reynolds  $Re = \sqrt{2}u_{rms}a/\nu \approx 10^4$ , avec  $\sqrt{2}u_{rms}$  la vitesse orbitale, la viscosité cinématique  $\nu = 1,19 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$  basée sur la température moyenne de l'eau mesurée au cours des expériences. L'amplitude orbitale  $a = \sqrt{2}u_{rms}/\omega$  (avec  $\omega = 2\pi/T$ ,  $T$  étant la période de vague) permet d'estimer que la rugosité relative  $a/k_s$  varie suivant les essais entre 80 et 780, où la rugosité de Nikuradse  $k_s \approx 0,7$ mm est obtenue par analyse de la sous-couche logarithmique des profils de vitesse [7]. Nous avons choisi de présenter dans cette communication seulement les résultats pour une des

conditions de vagues bichromatiques, composée principalement de deux fréquences  $f_1 = 0,42$  Hz et  $f_2 = 0,462$  Hz, d'amplitudes respectives  $a_1 = 7$  cm et  $a_2 = 3$  cm, de sorte que  $Re = 1,5 \times 10^4$  et  $a/k_s = 111$ . Les vagues issues de ce forçage sont organisées en groupes de 10 vagues, la modulation basse fréquence ( $\delta f = f_2 - f_1$ ) définissant la durée du groupe. Le choix des fréquences (tel que  $f_1 = 10 \times \delta f$  et  $f_2 = 11 \times \delta f$ ) permet de reproduire le groupe à l'identique tout le long de l'expérience, et ainsi de réaliser des moyennes d'ensemble afin d'extraire la part de l'écoulement organisé et d'estimer les fluctuations turbulentes.

### 2.3. Mesures dans la couche limite

Différents instruments de mesures ont été installés sur le canal afin de mesurer l'élévation de la surface de l'eau (sondes à vague, caméras) et les vitesses des vagues (anémomètres doppler laser, vélocimètres acoustique doppler) dans les zones caractéristiques de l'écoulement. Une vue d'ensemble de ces mesures a été présentée dans des références récentes [6,8].

Des mesures détaillées des vitesses horizontales et verticales dans la couche limite ont été réalisées à deux positions le long de la plage avec des anémomètres Doppler laser (Figure 2). Dans cet article nous présenterons principalement les mesures obtenues avec le 2<sup>ème</sup> anémomètre, désigné comme LDA (Laser Doppler Anemometer) par la suite, placé en  $x=69,3$ m dans la zone de surf (profondeur locale 19,1cm).

#### 2.3.1. Système LDA

Ce système LDA 2 composantes est un système à fibre optique fonctionnant en rétrodiffusion. Il est composé principalement d'un laser Argon ionisé 300mW refroidi à l'air, d'une sonde transducteur à fibre optique de 112 mm et d'un processeur de signal Dantec BSA F60. Ce système comporte 4 faisceaux cohérents dont deux verts (514,5nm) et deux bleus (488nm). La sonde, équipée d'une lentille de distance focale 500mm, permet de créer un volume de mesure ellipsoïdal de diamètre 76 $\mu$ m et de longueur 1,36mm (dans l'eau). Elle est positionnée devant la paroi latérale vitrée du canal et le volume de mesure dans la direction  $y$  se situe en  $y = -0,17$  m ( $y = 0$  étant l'axe du canal cf. Figure 2).

La sonde déplacée par un système de traverse 3D motorisé a permis de positionner le volume de mesure avec une précision de 0,1mm par rapport au niveau du sommet des rugosités et d'effectuer 18 hauteurs de mesures de 0,1mm à 10mm au-dessus du lit pour les conditions de vagues que nous présenterons dans cet article.

Des sphères creuses de verre revêtu d'argent d'un diamètre moyen de 10 $\mu$ m ont été utilisées pour ensemençer l'écoulement, sauf pendant les 1<sup>ers</sup> jours d'essais car ces particules n'étaient pas disponibles.

Le manque d'ensemencement a entraîné une mauvaise qualité des données pour les deux premières altitudes de mesure qui ont donc été retirées lors de l'analyse.

Afin d'accéder aux mesures de vitesse très proches du lit, la sonde a été tournée de telle sorte que les deux composantes de vitesse à 45° par rapport à la direction normale au lit soient mesurées (Figure 3a). Les composantes horizontale  $u$  et verticale  $w$  de vitesse ont été obtenues ensuite par transformation orthogonale de ces composantes mesurées en tenant compte de la pente du lit 1:80 ( $\theta = \text{atan}(1/80)$ ).

La sonde a également été légèrement inclinée vers l'avant d'un angle de 4° (dans l'air soit environ 3° dans l'eau). Ceci a permis de faire des mesures proches du lit sans que les faisceaux soient obstrués du fait de l'imparfaite planéité du lit. L'angle était suffisamment petit pour éviter la distorsion des volumes de mesure due à la réfraction et suffisamment grand pour permettre une mesure proche du fond.

La profondeur d'eau au repos était de 0,19m au niveau du volume de mesure LDA et la hauteur de vague locale était de l'ordre de 10 cm. Simultanément à la mesure LDA l'élévation locale de la surface de l'eau est enregistrée à partir d'une sonde à vague capacitive positionnée sur le côté opposé du canal ( $y = 0,4$  m). En utilisant cette mesure de la surface de l'eau en tant que référence, l'information de phase pour la mesure de la vitesse au niveau de chaque  $z$  a pu être obtenue. La moyenne de phase a été réalisée sur 90-140 cycles de groupe de vagues pour les conditions bichromatiques.

#### 2.3.2. Estimation des incertitudes de mesure

Parmi les sources d'incertitudes lors des mesures LDA effectuées dans notre configuration expérimentale se distinguent les incertitudes dues à l'instrument lui-même (optique et électronique), les incertitudes sur la localisation du niveau du lit et les incertitudes sur la dimension et le positionnement du volume de mesure.

##### Incertitudes dues au système LDA :

Le système optique a été réglé en s'assurant de la qualité du croisement des faisceaux et de leur focalisation. Comme nous avons choisi de travailler en acquisition des données en coïncidence (à savoir validation des mesures de vitesse selon les deux composantes de vitesses simultanément), il était donc encore plus important de vérifier la superposition des deux volumes de mesures dans le canal. Nous avons pour cela utilisé une caméra (capteur CCD nu étanche 640pixels x 480 pixels, pixel de 7,5 $\mu$ m) placée dans le canal rempli d'eau. Une 1<sup>ère</sup> étape nous a permis de définir la position du volume de mesure en imageant un faisceau passant par la fibre de collection du système sur le capteur de la caméra

(volume de mesure focalisé équivalent à environ 10 pixels). Ensuite en laissant la caméra au même emplacement, nous avons procédé à l'alignement de chacun des 4 faisceaux indépendamment en les réglant de façon à ce qu'ils illuminent les mêmes pixels du capteur.

#### Incertitudes sur la localisation du niveau du lit :

Le niveau local du lit ( $z=0\text{mm}$ ) a été déterminé en déplaçant progressivement le volume de mesure vers le lit jusqu'au niveau où le signal de vitesse périodique ait disparu pour la 1<sup>ère</sup> fois et en même temps coïncidé avec un important courant d'anode sur les photomultiplicateurs signe d'une réflexion sur une paroi.

#### Incertitudes sur les dimensions du volume de mesure :

La sonde, équipée d'une lentille de distance focale 500mm, permet de créer un volume de mesure ellipsoïdal de diamètre  $76\mu\text{m}$  et de longueur 1,03mm dans l'air. En considérant l'indice de réfraction de l'eau 1,33, la longueur du volume de mesure dans l'eau a été estimée à 1,33mm. De plus comme la sonde a été inclinée vers l'avant d'un angle de  $3^\circ$  dans l'eau, l'extension verticale théorique du volume de mesure dans notre configuration expérimentale était de  $148\mu\text{m}$ . En pratique, comme nous avons travaillé en coïncidence pour l'acquisition des données LDA, la majorité des signaux doppler validés sont issus du centre du volume de mesure i.e. où les volumes de mesures des faisceaux verts et bleus se superposent.

#### Discussion sur les incertitudes de positionnement du volume de mesure :

La sonde déplacée par un système de traverse 3D motorisé a permis de positionner le volume de mesure avec une précision de 0,1mm par rapport au niveau du sommet des rugosités. La Figure 3b montre schématiquement les dimensions du volume de mesure par rapport aux grains constituant le lit. Ce schéma permet de souligner la difficulté à déterminer précisément le positionnement de la mesure vis-à-vis des rugosités locales.

#### Sources d'incertitudes liées à l'acquisition et au traitement des données LDA :

Pour chaque condition de vagues nous avons réalisées plusieurs essais de 75 minutes et durant chaque essai nous avons enregistré 2 points de mesure LDA en changeant la hauteur du volume de mesure, ainsi chaque acquisition LDA a duré approximativement la moitié du temps d'un essai. Comme le système LDA enregistre seulement une vitesse lorsqu'une particule d'ensemencement traverse le volume de mesure les vitesses sont enregistrées de façon irrégulière. Ainsi, une interrogation s'est présentée à nous au moment du post-traitement des données : l'échantillonnage non régulier des données propres à la LDA et l'interpolation nécessaire de ces données notamment

pour l'évaluation des spectres. Un exemple de mesures est présenté Figure 4, qui illustre que l'échantillonnage n'est pas régulier. Le manque de traceurs dans le volume de mesure à certains instants ne permet pas toujours d'obtenir de mesure directe. Ces instants se produisent généralement proche de la renverse, lorsque les vitesses sont faibles. Une première étape consiste à interpoler le signal à ces instants. Une interpolation linéaire s'est avérée produire les meilleurs résultats. Le signal est ensuite ré-échantillonné avec un pas de temps régulier à 128 Hz. Pour cet exemple, une moyenne d'ensemble sur 90 groupes de vagues a ensuite été calculée, également tracée sur la Figure 4. On peut noter que le signal interpolé est généralement très proche de la moyenne d'ensemble.

Les spectres présentés sur la Figure 5 illustrent la qualité des mesures et la pertinence du traitement. Le spectre du signal total de la vitesse horizontale en zone de déferlement (Figure 5a) présente de nombreux pics aux différents harmoniques des fréquences  $\delta f, f_1, f_2$  [8], pour chaque élévation au-dessus du lit. Lorsque l'on soustrait la moyenne d'ensemble de chaque signal, on obtient les parties fluctuantes dont les spectres sont tracés sur la Figure 5b. Les pics ont disparus et une décroissance de l'énergie en puissance  $-5/3$  de la fréquence, caractéristique d'un régime inertiel, apparaît clairement au-delà de 1 Hz environ. La signature de mouvements basse-fréquence reste notable, en particulier pour la mesure à 10 mm au-dessus du lit.

### 3. Résultats et discussion

Les moyennes d'ensemble de la vitesse horizontale qui traduisent l'écoulement organisé à trois élévations sont tracées sur la Figure 6a. Ces vitesses horizontales rendent compte des caractéristiques des vagues en zone de déferlement, avec des crêtes pincées et des creux plus longs et de plus faible amplitudes. A l'extérieur de la couche limite ( $z = 10$  mm) certaines vagues présentent un front très raide et une face arrière de pente plus douce (par exemple la vague représentée entre 18 et 20 s). Cette forme est significative d'une vague fortement asymétrique, en forme de dent de scie, typique d'une vague déferlante. Lorsque l'on s'approche du lit, le signal devient moins asymétrique et davantage dissymétrique. L'avance de phase de la vitesse dans la couche limite est également clairement visible.

Les moyennes d'ensemble des composantes fluctuantes de vitesse horizontale sont tracées sur la Figure 6b. Les fluctuations sont plus fortes à l'extérieur de la couche limite. Une modulation à l'échelle du groupe est observée, ce qui traduit que les grandes vagues produisent davantage de fluctuations turbulentes. En  $z = 10$  mm, des maximums relatifs sont observés proches de la renverse lors du passage du creux à la crête pour

certaines vagues, en particulier celles qui présentent les creux les plus forts (à  $t = 7,2$  s,  $9,5$  s,  $11,7$  s). Dans la couche limite, les maximums relatifs se produisent juste après les crêtes, avec un léger retard en  $z = 1$  mm par rapport à  $z = 0,25$  mm. Cela traduit probablement la production de turbulence par frottement au fond et la diffusion de cette turbulence vers le haut de la colonne d'eau.

La Figure 7 montre les profils verticaux des écart-types, des fluctuations et des moyennes pour les vitesses horizontales et verticales, ainsi que les paramètres de dissymétrie  $Sk$  et d'asymétrie  $As$  de vitesse horizontale définis comme :

$$Sk(z) = \frac{\overline{(u(z,t) - \bar{u}(z,t))^3}}{u_{rms}^3(z)} \quad (1)$$

$$As(z) = \frac{\text{Im}(\overline{H(u(z,t))})}{u_{rms}^3(z)} \quad (2)$$

avec  $H(u(z,t))$  la transformée d'Hilbert de  $u(z,t)$ ,  $\text{Im}$  la partie imaginaire et  $\overline{(\quad)}$  la moyenne temporelle.

Sur cet exemple, le niveau de la valeur maximale de l'écart-type de  $u$  (Figure 7a) permet d'évaluer l'épaisseur de la couche limite, soit  $e \approx 2$  mm. Une zone logarithmique très nette apparaît pour  $z$  compris entre  $0,3$  mm et  $1,5$  mm. Pour  $z < 0,3$  mm, il est probable que le profil soit affecté par les rugosités locales. L'écart-type de la vitesse verticale  $w$  est faible et à peu près constant sur tout le profil.

Les fluctuations de  $w$  sont à peu près constantes sur le profil et sont 2 à 3 fois plus faibles que les fluctuations de  $u$  (du fond vers l'extérieur de la couche limite, voir Figure 7b).

Il est vérifié Figure 7c que les vitesses verticales moyennes sont très faibles, alors que les vitesses horizontales moyennes présentent des valeurs positives (vers la côte) dans la couche limite et négatives (vers le large) à l'extérieur. Cette tendance confirme la présence de courants moyens contraires, dont le rôle sur le transport sédimentaire est avéré [9,10].

Enfin, il apparaît qu'asymétrie et dissymétrie sont quasiment constants à l'extérieur de la couche limite, mais évoluent rapidement en se rapprochant du lit. La forte diminution de l'asymétrie  $As$  dans la couche limite qui coïncide avec une augmentation de la dissymétrie  $Sk$  confirme certaines observations de la littérature [1,2]. Les présentes mesures LDA permettent de déterminer que l'asymétrie tend vers 0

au fond, tandis que la dissymétrie  $y$  atteint sa valeur maximale.

#### 4. Remerciements

Ce travail est soutenu par la Communauté Européenne dans le cadre du programme HYDRALAB IV *Integrated Infrastructure Initiative*, contrat no. 261520, projet GLOBEX.

#### 5. Références

- [1] Henderson, S.M., Allen, J.S., Newberger, P.A., Nearshore sandbar migration predicted by an eddy-diffusivity boundary layer model, *J. Geophys. Res.* 109(C06024) (2004).
- [2] Berni, C., E. Barthélemy, Michallet, H., Surf zone cross-shore boundary layer velocity asymmetry and skewness: an experimental study on a mobile bed, *J. Geophys. Res.*, 118, doi:10.1002/jgrc.20125 (2013).
- [3] Huang, Z.-C., Hwung, H.-H., Hsiao, S.-C., Chang, K.-A., Laboratory observation of boundary layer flow under spilling breakers in surf zone using particle image velocimetry, *Coastal Engg.*, 57 343-357 (2010).
- [4] Van der A, D.A., O'Donoghue, T., Davies, A.G., Ribberink, J.S., Experimental study of the turbulent boundary layer in acceleration-skewed oscillatory flow, *J. Fluid Mech.*, 684, 251-283 (2011).
- [5] de Bakker, A.T.M., Tissier, M.F.S., Ruessink, B.G., Shoreline dissipation of infragravity waves, *Cont. Shelf Res.*, 72(1), 73-82 (2014).
- [6] Ruessink, B.G., Michallet, H., Bonneton, P., Mouazé, D., Lara, J., Silva, P.A., Wellens, P., GLOBEX: Wave dynamics on a gently sloping laboratory beach. *Proceedings Coastal Dynamics 2013*, paper 131, 24- 28 June, Arcachon, France (2013).
- [7] Van der A, D.A., Mouazé, D., Vignal, L., Silva, P.A., Abreu, T., Barthélemy, E., Michallet, H., Wave boundary layer on a low sloping beach. *Proceedings Coastal Dynamics 2013*, paper 131, 24- 28 June, Arcachon, France (2013).
- [8] Michallet, H., Ruessink, G., Rocha, M.V.L., de Bakker, A., van der A, D., Ruju, A., Silva, P.A., Sénéchal, N., Marieu, V., Tissier, M., Almar, R., Abreu, T., Birrien, F., Vignal, L., Barthélemy, E., Mouazé, D., Cienfuegos, R., Wellens, P., GLOBEX: Wave dynamics on a shallow sloping beach. *Proceedings HYDRALAB IV Joint User Meeting*, Lisbon (2014).
- [9] Yu, X., Hsu, T.J. and Hanes, D.M., Sediment transport under wave groups: relative importance between nonlinear wave shape and nonlinear boundary layer streaming. *J. Geophys. Res.*, 115 (2010).
- [10] Kranenburg, W.M., Ribberink, J.S., Schretlen, J.J.L.M., Uittenboogaard, R.E., Sand transport beneath waves: The role of progressive wave streaming and other free surface effects. *J. Geophys. Res.*, 118, 1-18 (2013).





Figure 1 Photographie du canal à houle Scheldt de Deltares.

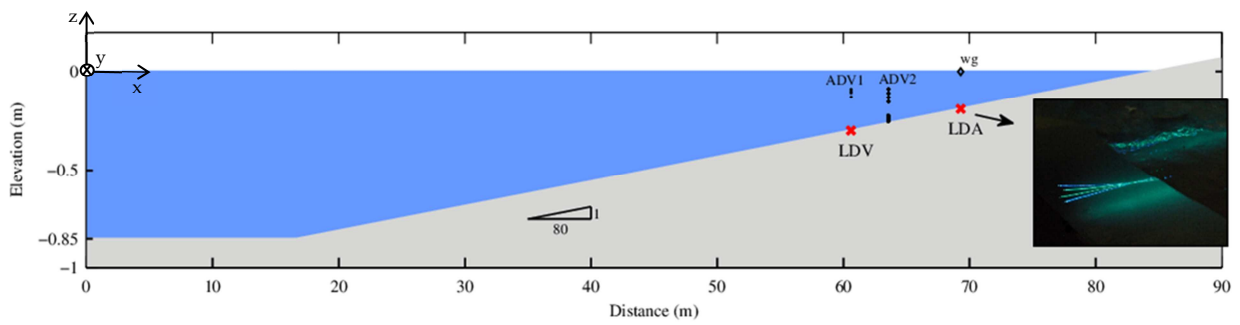
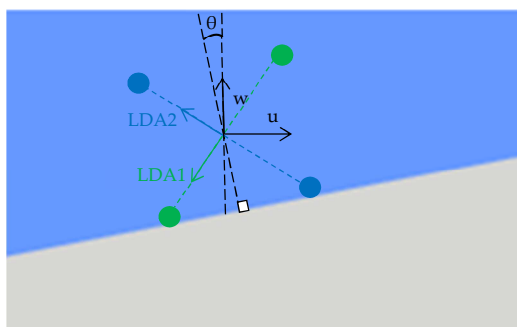
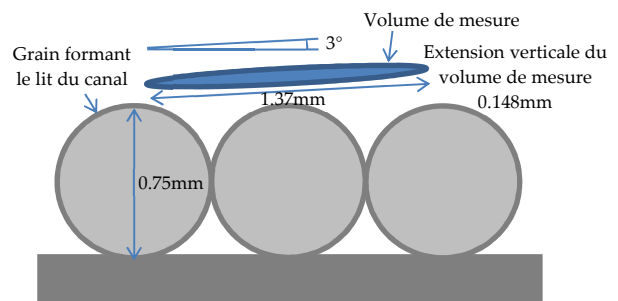


Figure 2 Section longitudinale du canal à houle Scheldt de Deltares, illustrant les emplacements des mesures de la couche limite le long du profil de plage 1:80 (ADV ; Acoustic Doppler Velocimeter, wg : sonde à vague, LDV : Laser Doppler Velocimeter, LDA : Laser Doppler Anemometer). La photographie montre les deux paires de faisceaux laser du système LDA.



a.



b.

Figure 3 Système LDA (a) Position des faisceaux laser par rapport au lit du canal avec le repère (x,y,z) et (b) Représentation schématique du volume de mesure LDA par rapport à la taille des rugosités.

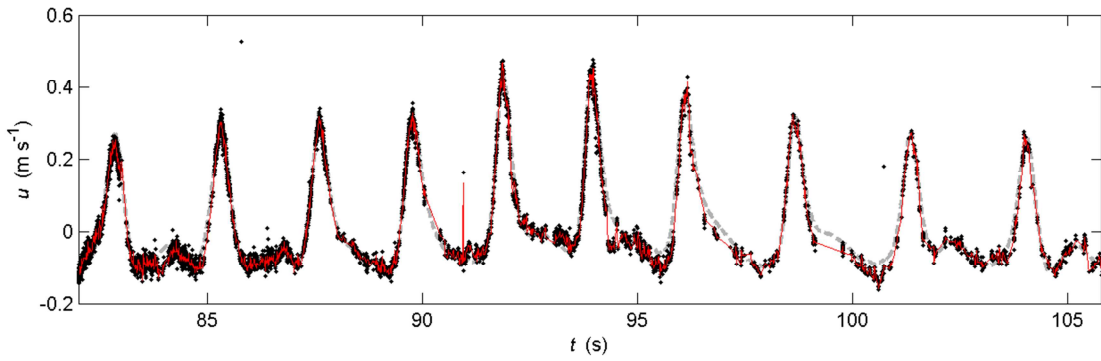


Figure 4 Mesures instantanées de la vitesse horizontale en  $z = 1$  mm (points noirs), interpolation linéaire (trait rouge), moyenne d'ensemble calculée sur 90 répétitions du groupe de 10 vagues (tirets gris).

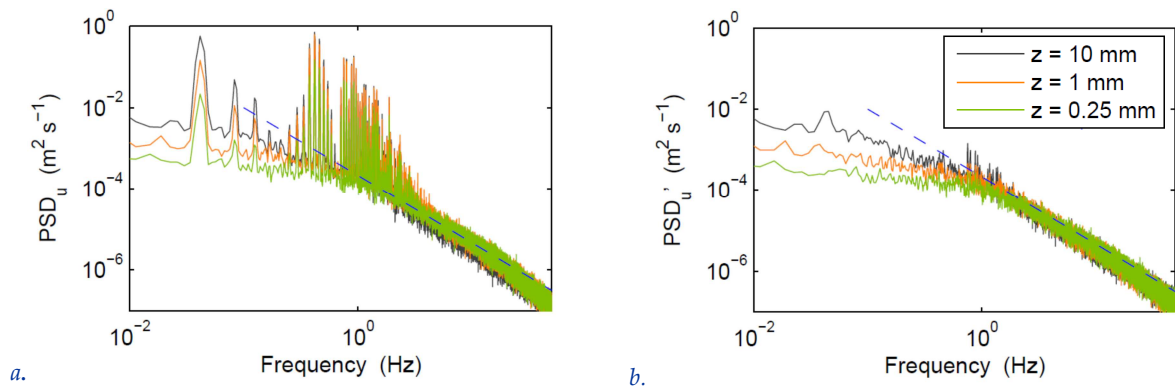


Figure 5 Densité spectrale, à trois élévations  $z$ , du signal total de vitesse horizontale (a) et de sa composante fluctuante (b), les tirets indiquant la pente en  $-5/3$ .

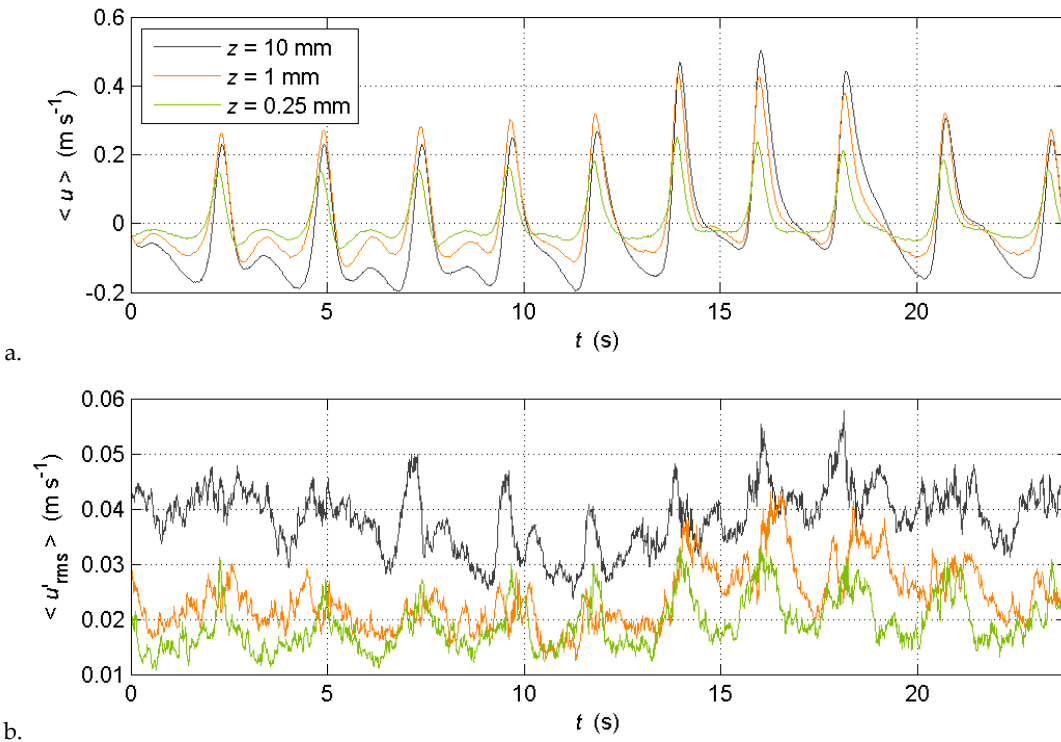


Figure 6 Séries temporelles à trois élévations, de la moyenne d'ensemble de la vitesse horizontale (a) et de sa composante fluctuante (b).

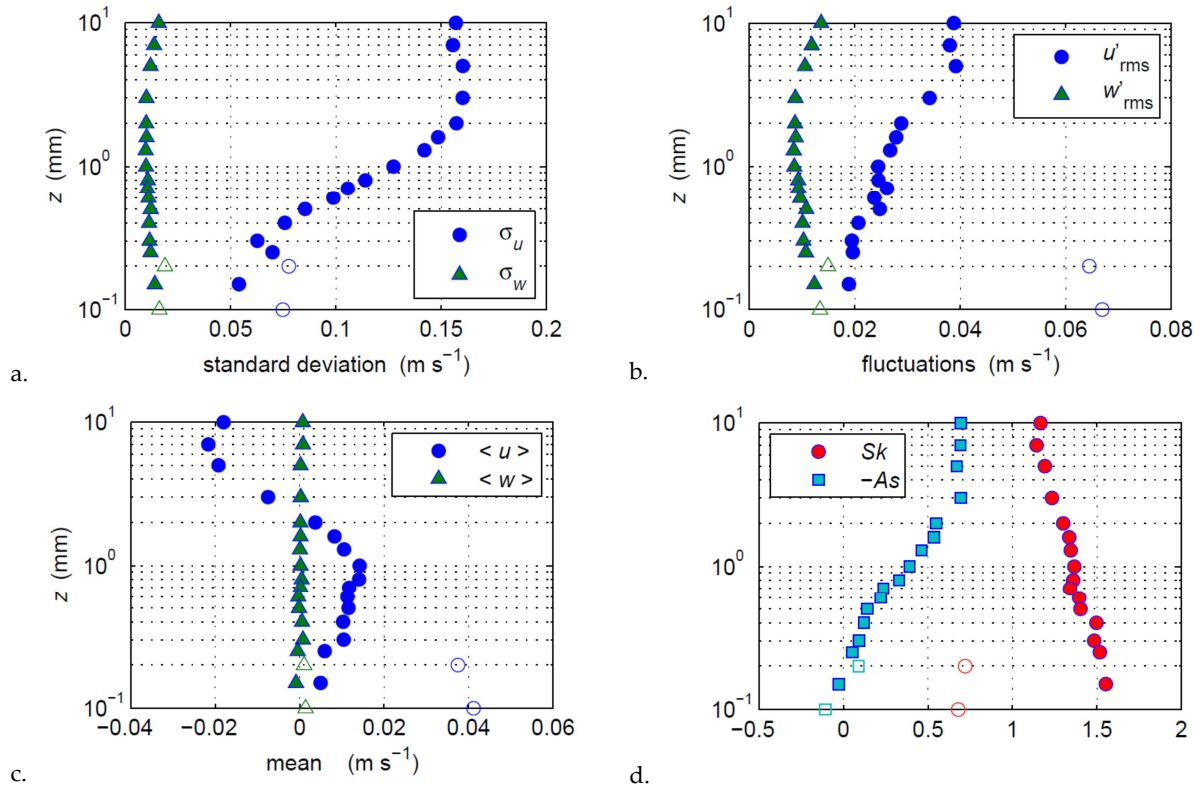


Figure 7 Profils verticaux: (a) de l'écart-type des vitesses horizontales et verticales, (b) des composantes fluctuantes, (c) des valeurs moyennes, (d) de la dissymétrie  $Sk$  et de l'asymétrie  $As$  de vitesse horizontale. Les symboles vides indiquent les mesures effectuées sans ensemencement.