



Étude du frottement turbulent dans un écoulement graduellement varié.

Mohammad Movahedan^(a), Denis Tcheukam-Toko^(b), Michel Bélorgey^(c)

*(a) Doctorant, M2C-groupe mécanique des fluides UMR-CNRS 6143
Université de Caen*

*(b) Maître de conférences département génie énergétique
IUT de Ngaoundéré, Cameroun*

*(c) Professeur, M2C-groupe mécanique des fluides UMR-CNRS 6143
Université de Caen*

Résumé

La plupart des études relatives aux écoulements graduellement variés ont été basées sur l'analyse des grandeurs moyennes et l'évolution de la courbe de remous associée. Les phénomènes d'érosion ou de frottement sur le fond étant globalisés ou déduits à partir de modèles définis pour les écoulements permanents uniformes.

Dans les travaux que nous présentons ici, nous abordons l'étude de l'écoulement au dessus d'un seuil en privilégiant une approche basée sur l'analyse de la turbulence et de la couche limite turbulente, dans un écoulement où les phénomènes liés à l'accélération et la décélération ne peuvent être négligés. Notre but étant d'aboutir à une formulation permettant de définir l'évolution de la contrainte de frottement aux différents points de la surface du seuil.

Abstract

Most of the studies relating to the gradually varied flows were based on the analysis of the average magnitude and the evolution of the associated free surface curve. The phenomena of erosion or of friction on the bottom being globalised or being deduced from models defined for uniform permanent flows. In the work presented here, we study the flow above a threshold by privileging an approach based on the analysis of turbulence and the turbulent boundary layer, in a flow where the phenomena related to the acceleration and deceleration cannot be neglected. Our objective is to obtain a formulation allowing to define the evolution of the shear stress in the various points of the surface of the threshold.

Mots-clés: Écoulements graduellement variés, érosion, frottement turbulent

1.Introduction

Les phénomènes d'érosion en écoulements graduellement variés sont actuellement mal maîtrisés, principalement pour les raisons suivantes:

1.Ce sont des écoulements à surface libre, or ces derniers sont encore trop souvent abordés sous l'aspect « hydraulique » basé sur l'évolution des grandeurs moyennes.

2.Ce sont des écoulements où il existe de fortes variations de vitesse moyenne or les modèles qui conduisent à la définition du frottement turbulent sont principalement élaborés pour des écoulements permanents et uniformes. Les phénomènes d'accélération et décélération de l'écoulement ne sont pas pris en compte

Dans de précédentes études réalisées au laboratoire, nous avons montré que la turbulence au sein de la couche limite générée par la houle sur les fonds marins était différente selon les phases de sommet et de creux de la houle. (Tcheukam-Toko D. ; Bélorgey M. -1996-1997). Plus récemment, nos résultats ont mis en évidence le fait que la houle modulait les échelles de turbulence (Murzyn F. – 2001, Murzyn F. ; Bélorgey M. – 2002) et que l'accélération ou décélération de l'écoulement moyen était un phénomène important à prendre en compte. En effet, nous avons montré que :

- Les phases d'accélération réduisaient la taille des échelles de turbulence.
- Les phases de décélération augmentaient la taille des échelles de turbulence.

Ces phénomènes de turbulence en zone d'accélération ou décélération de l'écoulement, se retrouvent également dans l'étude des écoulements graduellement variés, tant en ce qui concerne l'écoulement au dessus d'un seuil dans un canal, que l'écoulement d'un courant de marée au dessus d'une dune sous-marine.

Les résultats que nous présentons ici portent sur l'analyse d'un écoulement bidimensionnelle au dessus d'un seuil, tant en ce qui concerne le champ moyen que le champ turbulent. Nous avons porté notre attention sur la nature différente de la turbulence entre la zone d'accélération et la zone de décélération. Et nous avons cherché à traduire cette différence au niveau de la modélisation de la contrainte de frottement sur le fond.

2. Dispositif expérimental

Les essais ont été réalisés dans le canal à houle avec circulation du Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière – Groupe Mécanique des Fluides (M2C.GMF – UMR CNRS 6143) de l'Université de Caen.

Ce canal, (canal orange) d'une longueur de 18 mètres (longueur de la veine 12 m) pour une section de 0.5m de large et 0.6m de haut permet de réaliser des écoulements de houle plus courant. Les parois sont en verre de façon à permettre la mesure du champ des vitesses et du champ turbulent par Vélocimétrie laser. Le fond est constitué de plaques de PVC de façon à pouvoir y fixer des maquettes.

Les travaux que nous présentons dans ce papier ne prennent en compte que l'action du courant.

L'écoulement réalisé dans la veine grâce à un circuit de recirculation est un écoulement uniforme à surface libre de débit variable. Il est généré par une pompe hélice VENERONI-POMPES type E30-A1. Les perturbations que celle-ci engendre sur l'écoulement, associées à celles du circuit de retour sont éliminées grâce à un diffuseur à l'aval de la pompe, muni d'ailerons radiales pour éliminer le tourbillon créé par l'hélice, suivi d'un nid d'abeilles placé à l'entrée de la veine d'essais.

La maquette de la dune occupe toute la largeur du canal (0.5m). Son profil est réalisé dans une plaque de PVC de 5mm d'épaisseur, fixée sur 4 supports profilés correspondants. Sa forme est axisymétrique et la crête est bien arrondie pour diminuer le décollement de l'écoulement en ce point. Sa position dans le canal par rapport au nid d'abeilles est donnée sur la figure 1. Ses dimensions ont été choisies à partir des caractéristiques proposées par Ashely (1990) qui pour des formes géométriques analogues, établit une différence entre les rides et les dunes tableau 1.

Le dispositif expérimental a été défini de manière à mettre en évidence l'influence de la variation de vitesse de l'écoulement (accélération, décélération) sur la nature de la turbulence et par là même sur le frottement sur le fond. De ce fait, le nid d'abeilles ayant laminarisé l'écoulement, ce dernier, dans la zone d'étude, n'est pas confiné comme dans un canal classique. Dans cette zone, au centre de la veine, les effets des parois verticales sont

négligeables et il se développe, sur le fond, une couche limite classique, dont l'origine se situe à l'aval du nid d'abeilles.

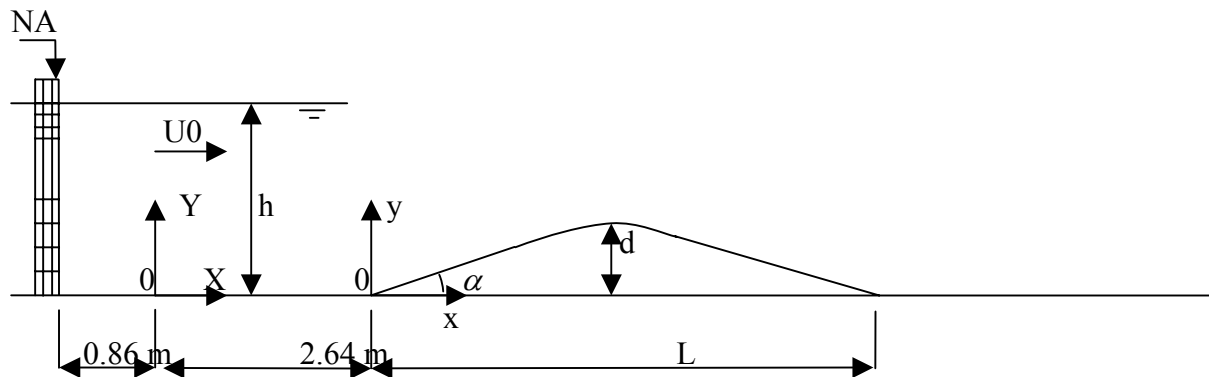


Figure 1: Configuration expérimentale

Tableau 1 : Caractéristiques générales des dunes par rapport aux rides

forme	Pente	Longueur (m)	Hauteur (m)	Effet
Ride	raide	Faible : 0.01-0.5	Faible : qqmm-0.1 m	Modifient la rugosité sur le fond
Dune	faible	Grande : 1-1000	Grande : 0.1-10 m	Affectent le profil de la surface libre

Compte tenu de ces conditions, les paramètres de l'écoulement sont donnés par:

- la vitesse moyenne au centre de la veine : U_0
- la hauteur d'eau : h

La vitesse moyenne au centre de la veine le long du canal évolue peu dans la zone de mesure, ce qui, dans cette zone, confère au canal des propriétés de largeur infinie.

Cette particularité nous autorise à définir le nombre de Reynolds de l'écoulement par la relation :

$$Re = \frac{U_0 \cdot h}{\nu} \quad (1)$$

où, ν est la viscosité cinématique de fluide.

Deux conditions d'écoulement ont été étudiées (pour des vitesses inférieures à la valeur critique qui conduirait à l'établissement d'un ressaut hydraulique à l'aval de la dune)

- 1) $U_0 = 0.20 \text{ ms}^{-1}$ $h = 0.248 \text{ m}$
- 2) $U_0 = 0.25 \text{ ms}^{-1}$ $h = 0.248 \text{ m}$

Le champ des vitesses et le champ turbulent ont été analysés à l'aide d'un vélocimètre laser DANTEC à deux composantes en mode rétro-diffusion. Grâce aux particules ajoutées dans l'écoulement, le taux d'acquisition variait entre 30 et 100 Hz ce qui nous assurait une bonne caractérisation du spectre de la turbulence (Nezu et Nakagawa, 1993). La sonde optique d'une focale de 500 mm était fixée sur une table de déplacement (vertical et horizontal) permettant l'automatisation des mesures avec une précision de déplacement de 0.1 mm.

Pour chaque type d'écoulement, un ensemble de 50 profils de vitesse a été réalisé : en amont, au-dessus et en aval de la dune.

Ces profils correspondent à la mesure du champ des vitesses au centre de la veine, où l'influence des parois verticales est négligeable. Pour chacun d'eux :

- le pas de déplacement vertical près du fond ($y < 20\text{mm}$) était de 1mm et de 10mm au delà
- le premier point de mesure était situé à 1mm du fond.

En chaque point de mesure, nous avons déterminé :

- les composantes horizontale et verticale de la vitesse moyenne (moyenne temporelle)

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (2)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (3)$$

où n représente le nombre de mesure instantané en chaque point.

Les intensités de turbulence associées aux fluctuations horizontale et vertical de la vitesse.

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \quad (4)$$

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (5)$$

La tension de Reynolds.

$$-\rho \overline{u'v'} = -\rho \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v}) \quad (6)$$

3. Analyse des résultats expérimentaux

Nous avons analysé l'influence de la forme du fond sur les divers paramètres de l'écoulement :

- Les vitesses moyennes.
- La couche limite sur le fond.
- La nature de la turbulence.

L'écoulement étant graduellement varié (non uniforme), nous avons trois zones d'écoulement :

- Écoulement uniforme à l'amont et à l'aval de la dune.
- Écoulement accéléré sur la face amont de la dune.
- Écoulement décéléré sur la face aval de la dune.

Pour exprimer nos résultats, nous avons choisi l'origine des abscisses à l'amorce de la dune. Le sommet de celle-ci se situe donc à $x/L = 0.5$

3.1. Les vitesses moyennes.

En ce qui concerne les vitesses moyennes dans chaque profil et pour les conditions d'écoulement qui sont les notre, l'influence de la dune :

- s'amorce à une faible distance à l'amont de la dune ($x/L = -1$ ou $x = -L$)
- se prolonge sur une distance plus importante à l'aval ($x/L = 3$ ou $x = 3L$)

Ce résultat nous permet d'évaluer la zone de déformation de la surface libre de part et d'autre de la dune.

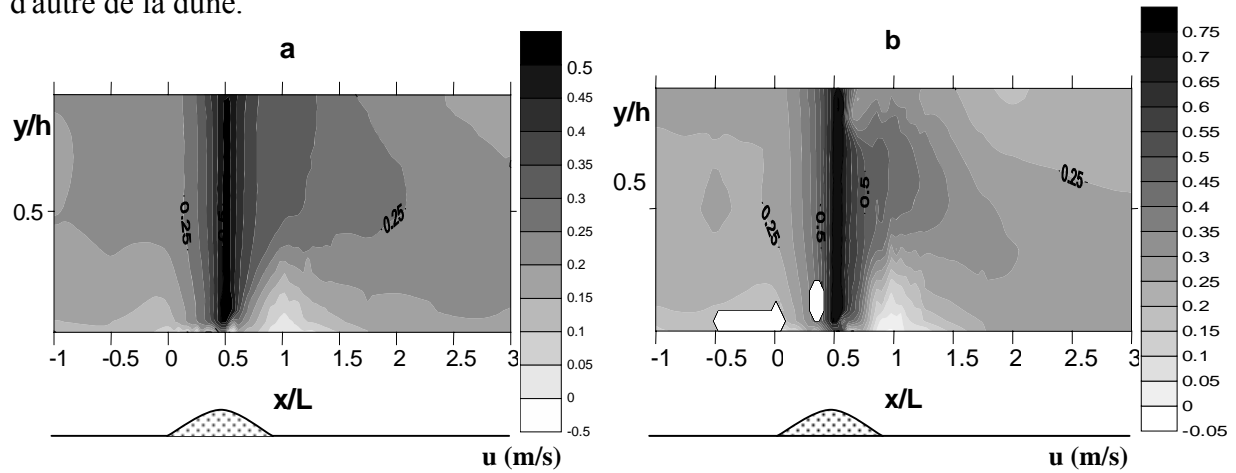


Figure 2: Évolution de la composante horizontale de la vitesse moyenne
a: $U_0=0,20$ m/s , **b:** $U_0=0,25$ m/s

A dessus de la dune, (Figure 2) l'évolution de la composante horizontale de la vitesse est conforme à celle d'un écoulement au dessus d'un seuil, présentant un décollement à l'aval et une circulation après la crête. On remarque cependant une influence plus marquée de la surface libre dans le cas de l'écoulement n° 2. En effet, les vitesses étant plus importantes, le frottement à l'interface air-eau est plus significatif.

La composante verticale est plus sensible à la présence de la dune et l'influence de la déformée de la surface libre est beaucoup plus marquée (Figure 3b).

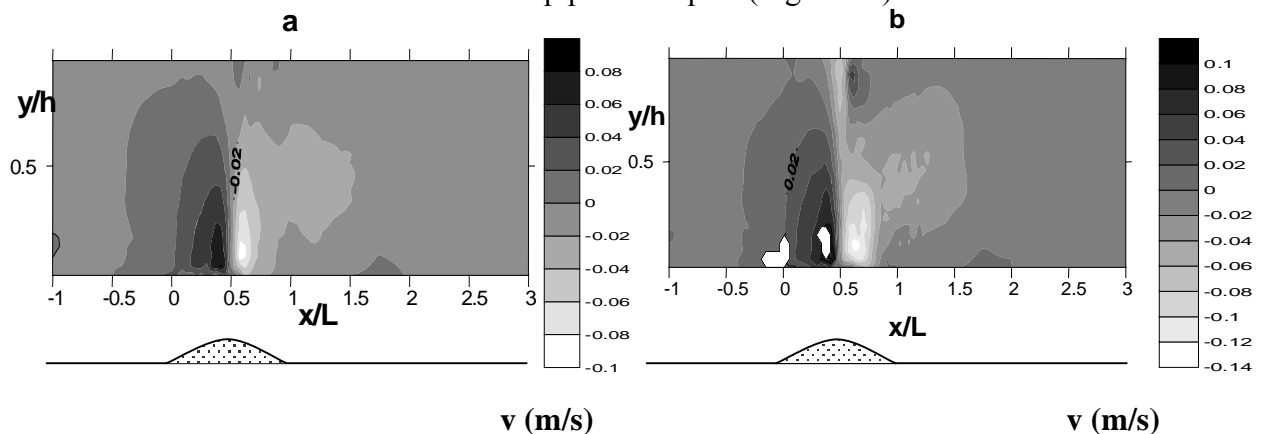


Figure 3: Évolution de la composante verticale de la vitesse moyenne
a: $U_0=0,20$ m/s , **b:** $U_0=0,25$ m/s

3.2.La couche limite.

En se basant sur la définition classique de l'épaisseur de couche limite δ ($U_\delta = 0.99 U_0$), nos résultats mettent en évidence (tableau 2)

- Une évolution croissante de δ relativement classique à l'amont de la dune.
- Une très forte décroissance de δ dans la zone d'accélération de l'écoulement (partie amont de la dune)
- Un décollement de la couche limite à l'aval immédiat de la crête.
- Un recollement à la paroi et un retour à une épaisseur δ relativement normale à l'aval immédiat de la dune ($\delta= 0.10m$).

x/L	δ (m)
-2	0,0897
-1	0,0874
-0,5	0,0985
0	0,1181
0,5	< 0,003

Tableau 2 : Évolution de l'épaisseur δ de la couche limite ($U_0=0,25$ m/s)

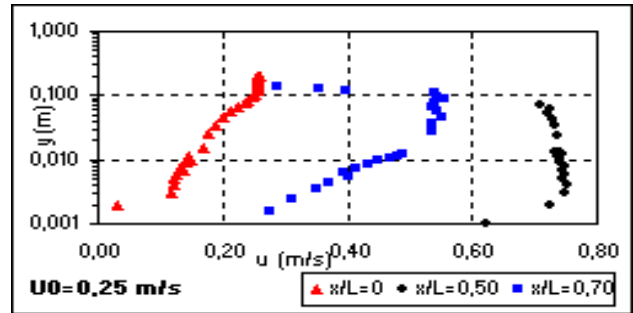


Figure 4: Profiles de la composante horizontale de la vitesses moyennes

3.3.Étude du champ turbulent.

Nous avons abordé l'analyse du champ turbulent par la mesure des taux de turbulence des composantes horizontale et verticale de la vitesse, la détermination de l'énergie cinétique turbulente et l'analyse du coefficient de corrélation R_{uv} .

$$R_{uv} = \frac{-1/n \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})}{\sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}} \quad (7)$$

Nos résultats mettent en évidence les éléments suivants :

- De forts taux de turbulence associés à la zone de décollement à l'aval de la crête (Figures 5 & 6). La présence de ce décollement induit une couche de cisaillement (interface entre l'écoulement moyen et l'écoulement de retour) où la production de turbulence associée au fort gradient de vitesse en cette interface est dominée par les instabilités de Kelvin-Helmholtz. (Müller & Gyr, -1982,1986).

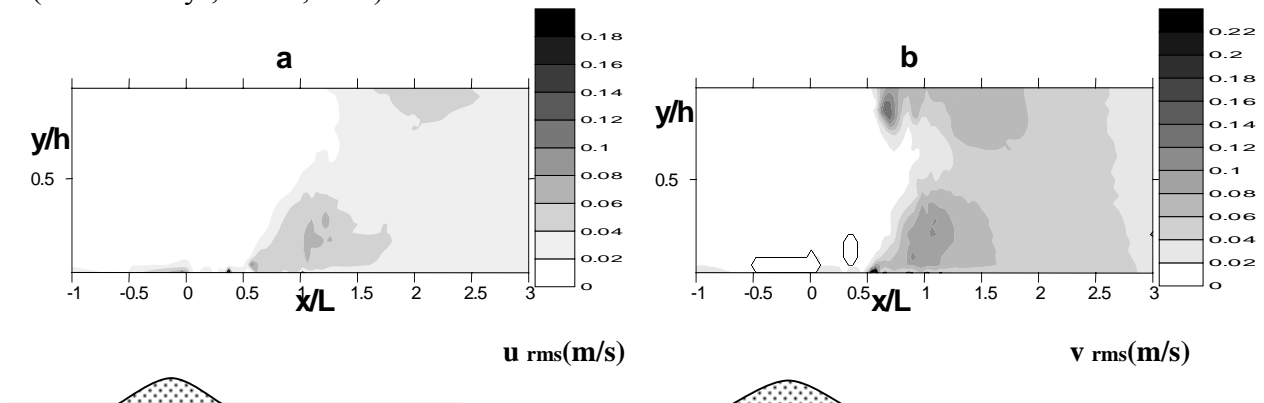


Figure 5: Variation de l'écart type de la composante horizontale des vitesses
 a: $U_0=0,20$ m/s , b: $U_0=0,25$ m/s

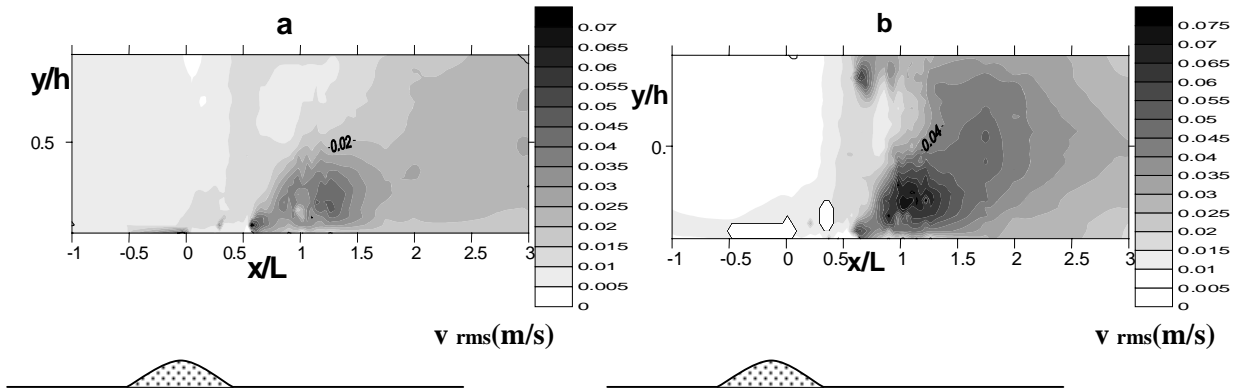


Figure 6: Variation de l'écart type de la composante verticale des vitesses
a: $U_0=0,20$ m/s , *b:* $U_0=0,25$ m/s

- Une zone de fort taux de turbulence à la surface libre, immédiatement après le passage de la crête. Ce phénomène qui est fonction de la vitesse de l'écoulement est plus marqué pour le taux de turbulence associé à la composante verticale de la vitesse.
- Des caractéristiques particulières dans l'évolution du coefficient de corrélation R_{uv} (Figures 7). En intensité, nos résultats sont globalement en accord avec ceux de Vendity et Bennett, (2000) qui dans un écoulement au dessus d'une dune trouvent $R_{uv} < 0.5$ pour $0 < y/h < 0.5$ (sauf à l'aval de la crête pour l'écoulement n°2). Par contre une analyse plus détaillée montre que ce coefficient présente des maximum importants (pour $x/L = 0.2 ; 0.65 ; 1.3$), à l'aval immédiat des ruptures de pente ($x/L = 0 ; 0.5 ; 1$)

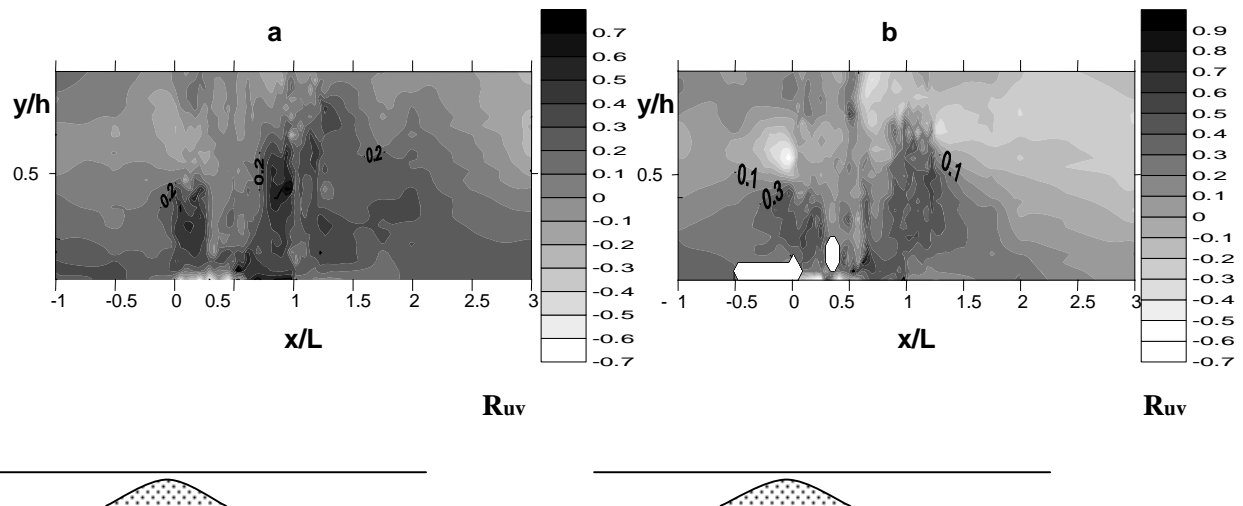


Figure 7: Variation de la corrélation R_{uv} ;
a: $U_0=0,20$ m/s, *b:* $U_0=0,25$ m/s

3.4. Contrainte de frottement

L'étude de la couche limite en écoulement graduellement varié nous permet d'exprimer la contrainte de frottement sous la forme:

$$\tau_p = - \left[\frac{d(\rho U_0^2 \delta_2)}{dx} + \rho U_0 \frac{dU_0}{dx} \delta_1 \right] \quad (8)$$

La détermination de cette contrainte nécessite l'analyse, en fonction de l'abscisse X dimensionnelle, des évolutions de U_0 , et des grandeurs intégrales associées à la couche limite: δ_2 (grandeur liée à épaisseur de déplacement Figure 8) et δ_1 (grandeur liée à l'épaisseur de «variation» de quantité de mouvement Figure 9), ainsi que de leur dérivées.

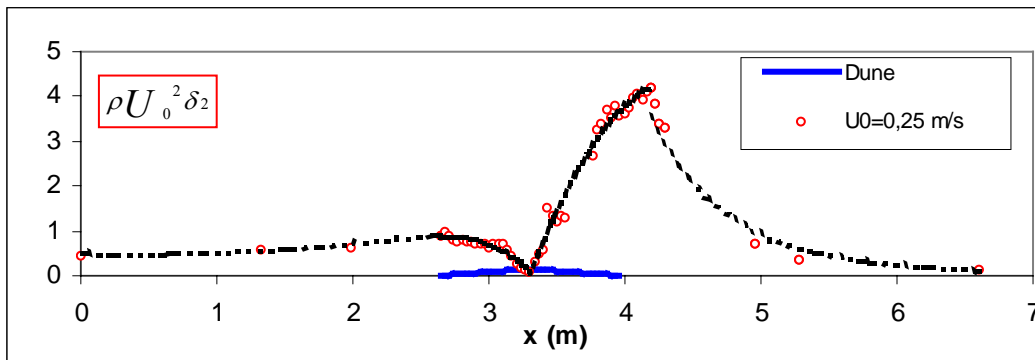


Figure 8: Évolution de la grandeur $\rho U_0^2 \delta_2$ (origine voir Fig. 1)

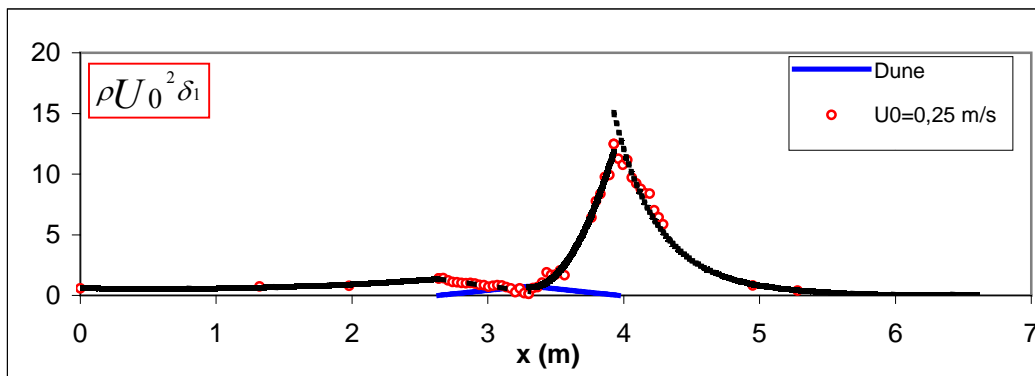


Figure 9: Évolution de la grandeur $\rho U_0^2 \delta_1$ (origine voir Fig. 1)

Ces évolutions montrent que dans les zones où l'écoulement est accéléré ou décéléré, les variations de ces grandeurs (grandeurs liées à la δ_1 et δ_2) sont très importantes, ce qui nous autorise à penser que la contrainte de frottement sur le fond est dans ces zones, principalement sensible la variation de quantité de mouvement. Par contre, une caractérisation plus précise de cette contrainte ainsi que sa modélisation nécessitent des mesures plus fines du champ des vitesses et du champ turbulent au voisinage immédiat de la paroi.

4. Conclusion

Nos premiers résultats montrent qu'en écoulement graduellement varié, la nature de la turbulence et les grandeurs intégrales associées à la couche limite dépendent fortement de la nature accélérée ou décélérée de l'écoulement.

Nous avons pu analyser, dans notre cas, l'évolution des grandeurs associées à la contrainte de frottement sur le fond dans le cas d'un écoulement au dessus d'un seuil, mais nos études doivent être poursuivies pour aboutir à une modélisation de cette grandeur en fonction de l'intensité de cette accélération (ou décélération)

5. Références

1. Allen, J.R.L., Sedimentary structures: their character and physical basis, Elsevier, Amsterdam, 539 pp., 1982.
2. Ashely, G. M., Classification of large scale sub aqueous bedforms: A new look at an old problem." J. of Sedimentary petrology, 60(1), 160-172, 1990.
3. Ashworth, P.J., S.J. Bennett, J. L. Best, and SJ McLelland, Eds., Coherent Flow Structures in Open Channels ,733 pp., John Wiley, New York, 1996.
4. Bélorgey, M., Murzyn, F., Influence of the wave on the turbulent scales : Wave Phenomena III congrès, Edmonton, Canada june 2001
5. Best, J.L., The fluid dynamics of small-scale alluvial bedforms, in Carling, P.A. & Dawson, M. (Eds) Advances in Fluvial Dynamics and Stratigraphy, John wiley & Sons Co., Chichester, 67-125, 1996.
6. Fredsoe, J., Deigaard, R., Mechanics of costal sediment transport, word Scientific, Singapore, 1992.
7. Lapoint, M.F., Burst-like sediment suspension events in a sand bed river, Earth Surf. Processes Landforms, 17, 253-270, 1992.
8. McLean, S.R., J.M. Nelson and R.L. Shreve, Flow-sediment interactions in separating flows over bed forms in. Coherent Flow Structures in Open Channels, edited by P.J. Ashworth et al., pp. 203-226, John Wiley, New York, 1996.
9. Muller, A., Gyr. A., Visualization of mixing layer behind dunes, Mechanics of sediment transport (Ed. By B. M. Summer and A. Muller) pp.41-45. A.A. Balkema, Rotterdam, 1982.
10. Müller, A., Gyr. A., On the vortex formation in the mixing layer behind dunes, J. Hyd. Res., 24, 359-375, 1986.
11. Murzyn, F., Bélorgey, M., Turbulence structure in free-surface channel flows, Hydraulic Measurements and Experimental Methods Conference, ASCE, Estes Park (CO), USA, 28 juillet-1^{er} août 2002
12. Murzyn, F., Bélorgey, M., Modulation des échelles de turbulence sous l'action de la houle, : 7^{ème} Journées Nationales Génie Civil - Génie Côtier, Anglet, France, 15-17 mai 2002
13. Nelson et al., Mean flow and turbulence fields over 2-dimensional bedforms, Water resources research, 29(12), 3935-3953, 1993.
14. Nezu, I., Nakagava, H., IAHR, Turbulence in Open-channel flows, Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1993.
15. Parker, G., Some speculations on the relation between channel morphology and channel-scale flow structures, in. Coherent Flow Structures in Open Channels, edited by P.J. Ashworth et al., pp. 423-458, John Wiley, New York, 1996.
16. Raudkivi, A.J., Study of sediment ripple formation, J. Hyd. Division, Pro. ASEC, 89(HY6), 15-33, 1963

17.Tcheukam-Toko, D., Lambert, E., Bêlorgey, M., Influence de la modulation du modèle longueur de mélange sur la compréhension des mécanismes à l'interface courant-fond sédimentaire. : 3^e Congrès International Limnologie -Océanographie , Nantes : Octobre 1996

18.Tcheukam-Toko, D., Lambert, E., ; Bêlorgey, M., Turbulence dans la Couche Limite générée par la Houle et:ou le Courant sur fond lisse, 13^{ème} Congrès Français de Mécanique, POITIERS, 1-5 septembre 1997

19.Venditti, J.G., Bennett, S.J, Spectral analysis of turbulent flow and suspended sediment transport over fixed dunes, J. Geophysical Research-Oceans, 105(9), 22035-22047, 2000.