

APPLICATION DE LA VÉLOCIMÉTRIE LASER 2D A LA CARACTÉRISATION SPATIO-TEMPORELLE DE LA TURBULENCE EN ÉCOULEMENT À SURFACE LIBRE

F. Murzyn, M. Bêlorgey

M2C - Groupe Mécanique des Fluides, U.M.R. 6143 CNRS / Université de Caen.
24, rue des tilleuls. 14000 Caen (France)

RESUMÉ

Les caractéristiques spatio-temporelles d'une turbulence pleinement développée produite par une grille à maille carrée dans un écoulement permanent à surface libre sont étudiées par Vélocimétrie Laser bi-composante. L'analyse des mesures des composantes horizontale et verticale du vecteur vitesse permet une description précise des profils d'intensités de turbulence ainsi que les échelles spatio-temporelles associées à cette turbulence et définies selon la théorie de la turbulence homogène et isotrope (hypothèse de Taylor).

Dans notre étude, nous mettons particulièrement en avant le rôle de la surface libre. A son voisinage, la structure de la turbulence est modifiée par la condition limite imposée par la présence d'une interface eau/air qui bloque les mouvements verticaux. Nous mettons en évidence la manière dont cette action est ressentie du point de vue des macro et micro échelles spatio-temporelles de la turbulence.

L'intérêt de ce travail est de mieux comprendre les paramètres qui affectent le développement des échelles de turbulence et dont l'implication en terme de transport sédimentaire par suspension ou dans la diffusion de polluants est désormais clairement admise.

INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années, on sait que la turbulence joue un rôle dans les processus de transport sédimentaire. En effet, des travaux successifs ont montré qu'elle modifiait la vitesse de chute des particules [1], qu'il y avait un couplage entre la taille des échelles de turbulence et la taille des particules [2], [3] et que la remise en suspension des sédiments étaient affectés par les conditions d'écoulements [4]. Cependant, des incertitudes demeurent sur le rôle précis de la surface libre puisque la majorité des études a été menée en écoulement confiné [1] voire en écoulement oscillant d'un point de vue numérique. Or, la zone située à proximité de cette

interface eau/air est une région très riche en échange dans laquelle sont susceptibles de se mouvoir en suspension une multitude de particules.

On se propose dans ce travail d'étudier la structure de la turbulence au voisinage de la surface libre dans un écoulement turbulent en canal. La turbulence, « classique », est générée par une grille à maille carrée placée dans une section droite de la veine d'essais. La technique de mesure utilisée est la Vélocimétrie Laser à deux composantes. Elle est non intrusive donc non perturbatrice de l'écoulement et nous permet de mesurer simultanément deux composantes du vecteur vitesse en tout point de l'espace. Grâce à l'isotropie de l'écoulement à l'aval de la grille, nous pouvons utiliser l'hypothèse de Taylor pour déterminer les échelles spatio-temporelles de turbulence caractéristiques de l'écoulement à l'aval de la grille. Notre intérêt se porte particulièrement sur le rôle de la surface libre par rapport à ces échelles.

Le dispositif expérimental, les moyens de mesure et la technique de traitement sont décrits dans la partie suivante. Les profils de l'intensité de turbulence seront présentés dans la troisième partie, mettant en évidence une première forme d'action de la surface libre. Les évolutions des échelles spatio-temporelles de la turbulence seront analysées dans la quatrième partie de ce travail. Enfin, une conclusion reprendra les principaux enseignements de cette étude. Une liste des références est également fournie à la suite de cette conclusion.

1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL, MOYENS DE MESURE ET TRAITEMENT DES DONNÉES

2.1- Dispositif expérimental

Les expériences ont été réalisées dans le canal à houle et/ou courant du laboratoire. Il mesure 16.5 m de long, 0.5 m de large pour une hauteur utile de 0.7 m. Les parois latérales sont vitrées pour permettre l'utilisation de techniques de mesure optique telle que la Vélocimétrie Laser. Cette installation est équipée d'une pompe munie d'un variateur de fréquence pour générer un courant dont la vitesse est réglable.

Pendant nos essais, la profondeur d'eau est constante ($d = 0.35$ m) et la vitesse moyenne de l'écoulement est fixe ($\bar{U} = 0.25$ m/s). Un nid d'abeilles est disposé dans le canal pour homogénéiser l'écoulement à sa sortie de la pompe.

La turbulence est produite par une grille à maille carrée placée dans une section droite de la veine d'essais. La taille de la maille est $M = 0.033$ m pour une épaisseur de barreau $d_b = 0.006$ m.

L'origine O de notre repère se situe dans le plan de la grille sur le fond du canal et au centre de la veine d'essais. La direction privilégiée de l'écoulement est notée \vec{x} et l'axe vertical est noté \vec{z} . L'écoulement est bidimensionnel dans le plan (\vec{x}, \vec{z}) .

1.2- Moyens de mesure

La mesure du champ des vitesses se fait par Vélocimétrie Laser 2D. L'acquisition des composantes horizontales et verticale du vecteur vitesse se fait simultanément moyennant une fenêtre de coïncidence τ_c . Compte tenu de la vitesse moyenne de l'écoulement et des caractéristiques de notre volume de mesure, nous avons choisi $\tau_c = 0.8$ m/s.

Pour déterminer l'influence de la surface libre sur l'écoulement, des mesures sont réalisées à différentes profondeurs relatives z/d , du fond ($z/d=0$) jusqu'à proximité de la surface libre ($z/d=0.93$) et pour différentes positions x/M à l'aval de la grille. Ces acquisitions sont automatisées grâce à une table de déplacement sur laquelle repose la sonde laser et qui peut se mouvoir dans les trois directions de l'espace.

Pour chaque position de mesure, 5000 échantillons sont recueillis, ce qui assure de l'indépendance statistique des données. De plus, la fréquence d'acquisition reste supérieure à 100 Hz.

1.3- Traitement des données

Pour atteindre notre objectif, à savoir la caractérisation spatio-temporelle de la turbulence, nous devons avoir accès à la valeur moyenne de chaque composante du vecteur vitesse ainsi qu'à l'écart type. Si, pour obtenir la vitesse moyenne, une simple moyenne d'ensemble sur la totalité des échantillons enregistrés (1) suffit, il n'en va pas de même pour le calcul de l'écart type (2). Pour ce dernier, nous avons effectué un filtrage dont le but d'éliminer certaines données non représentatives de l'écoulement et qui pourraient perturber l'analyse. C'est ainsi que tous les points de mesure distants de plus de 3 écarts types de la valeur moyenne sont éliminés.

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (1)$$

$$u' = \sqrt{u'^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2 \quad (2)$$

Par cette technique, nous pouvons décrire les évolutions des intensités longitudinale $\left(I_x = \frac{u'}{U}\right)$ et verticale $\left(I_y = \frac{v'}{U}\right)$ de turbulence. De plus, la géométrie de notre écoulement fait qu'autour de l'axe central de l'écoulement, celui-ci est isotrope. L'hypothèse de Taylor [5] est donc applicable. La connaissance de l'énergie cinétique de turbulence κ (3) et de sa dissipation ε (4) nous permettent d'obtenir les dimensions spatiales des macro échelles L_f (5) et des micro échelles λ_f (6) associées à la turbulence.

$$\kappa = 0.5(\overline{u^2} + 2\overline{v^2}) \quad (3) \quad \text{et} \quad \varepsilon = \frac{\partial \kappa}{\partial t} \quad (4)$$

$$L_f = \frac{u^3}{\varepsilon} \quad (5) \quad \text{et} \quad \lambda_f = \sqrt{30\nu \frac{u^2}{\varepsilon}} \quad (6)$$

Dans un premier temps, nous avons étudié les profils verticaux de l'intensité de turbulence sur la majeure partie de la colonne d'eau ($0 < z/M < 10$). Les résultats sont présentés dans la partie suivante.

2. PROFILS DES INTENSITÉS DE TURBULENCE

La figure 1 présente les évolutions des profils verticaux des intensités de turbulence I_x et I_y en fonction de la profondeur adimensionnée z/M pour deux sections différentes à l'aval de la grille ($x/M=30$ et 50).

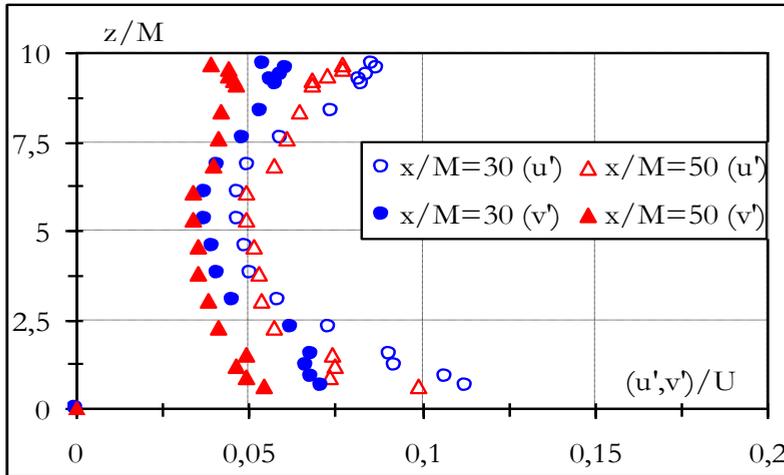


Fig. 1 Profils verticaux des intensités de turbulence

La figure 1 met en évidence plusieurs particularités. Tout d'abord, l'intensité de turbulence, nulle sur le fond (condition limite, pas de mouvement en $z/M = 0$) croît rapidement et atteint son maximum pour $z/M \cong 0,6$. Ensuite, elle décroît à nouveau puis on trouve une région où elle se stabilise. A mesure qu'on se rapproche de l'interface, on remarque des comportements distincts de I_x et I_y . La première augmente lorsqu'on se rapproche de la frontière libre contrairement à I_y qui diminue. La proximité de la surface libre qui bloque les mouvements verticaux explique ces résultats. L'action de l'interface eau/air sur la turbulence est donc plus marquée dans une région qui en est proche.

Cependant, ce premier résultat ne donne pas une description précise du rôle de l'interface. C'est pourquoi, nous avons étudié la structure de la turbulence en estimant les dimensions spatio-temporelles qui lui sont associées.

3. ÉCHELLES DE TURBULENCE ET SURFACE LIBRE

3.1. Macro échelle spatio-temporelle de turbulence

La première caractéristique à laquelle nous nous sommes intéressés est la macro échelle spatiale de turbulence. Elle correspond à la dimension des structures énergétiques de l'écoulement.

Son évolution en fonction de la distance à la grille et pour différentes profondeurs relatives z/d est présentée sur la figure 2.

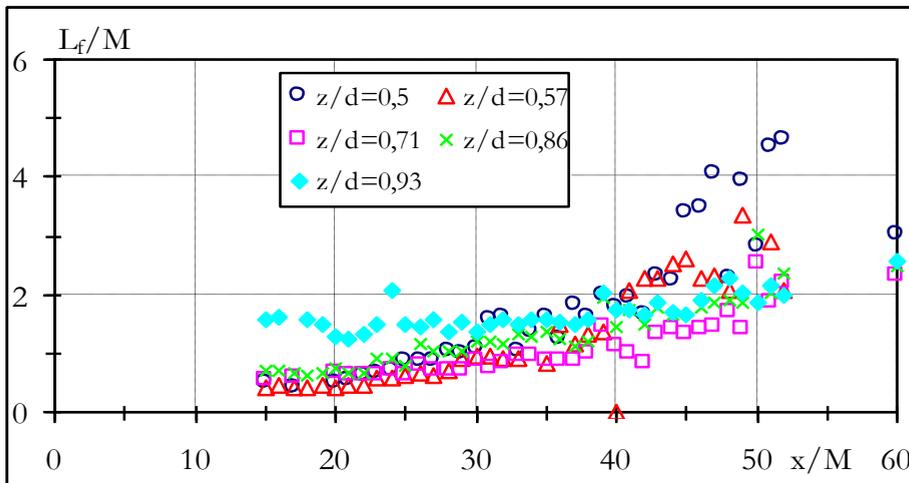


Fig. 2 Macro échelle spatiale de turbulence

La macro échelle spatiale de turbulence croît avec la distance à la grille de 0.5 à 3 M. Le fait marquant qui se dégage de cette figure est que la surface libre entraîne un étirement des structures énergétiques. En effet, pour $z/d=0.93$ et pour $15 < x/M < 30$, on constate que le rapport $\frac{L_f}{M}$ est constant et vaut environ 1.5. Il se différencie nettement de tous les autres cas de figure. Précisément, le facteur de grandissement peut atteindre 3 : la taille des structures énergétiques mesurées juste sous l'interface est le triple de celles mesurées au centre de la colonne d'eau.

Ce résultat est confirmé par la figure 3 où est présentée l'évolution de la macro échelle temporelle de turbulence (7). Elle donne un ordre de grandeur de la durée de vie de ces structures.

$$T_t = \frac{L_f}{u'} \quad (7)$$

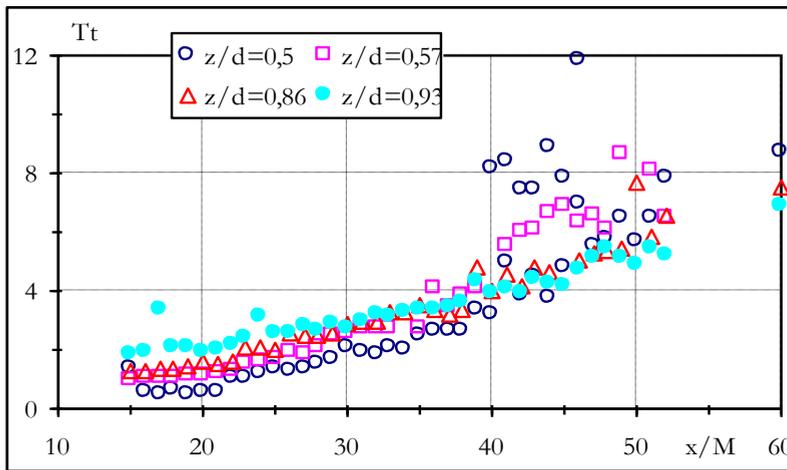


Fig. 3 : Macro échelle temporelle de turbulence

On retrouve clairement sur la figure 3, un comportement similaire à celui mis en évidence sur la figure 2. Pour une position fixe derrière la grille, les plus grandes échelles temporelles se retrouvent à proximité de la surface libre. Leur « durée de vie » varie entre 1 et 6 secondes. Elles sont donc transportées par l'écoulement moyen sur une distance maximale de 2 mètres.

Par ordre de taille décroissant, l'autre échelle caractéristique d'un écoulement turbulent est la micro échelle de Taylor. Elle représente la

dimension minimale des échelles qui ne participent pas au processus de dissipation. Nous avons étudié l'influence de la surface libre sur celles-ci.

3.2- Micro échelle spatio-temporelle de turbulence

La figure 4 présente l'évolution de la micro échelle spatiale de turbulence pour différentes profondeurs relatives à l'aval de la grille.

Contrairement à la macro échelle spatiale, la micro échelle n'est pas influencée par la présence de la surface libre, au moins dans la région étudiée. Elle évolue de la même façon pour toutes les profondeurs relatives z/d et est comprise entre 0.2 et 0.5 M.

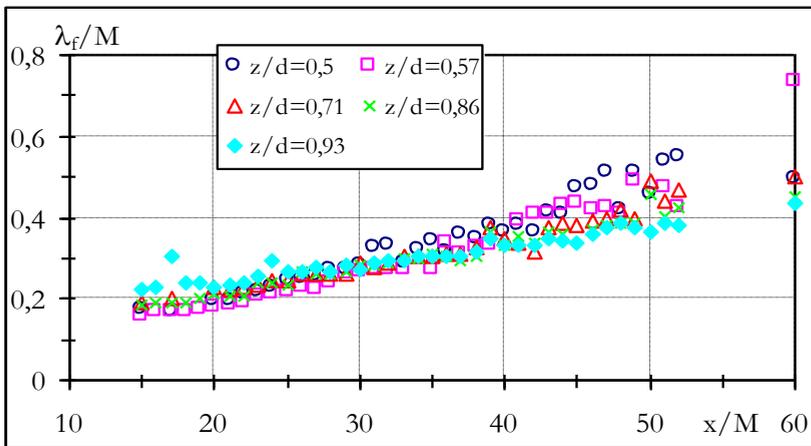


Fig. 4 : Micro échelle spatiale de turbulence

Tant que z/d est inférieure à $1 - \frac{\lambda_f}{d}$, la surface libre n'affecte pas son développement.

En revanche, il n'en est pas de la même façon en ce qui concerne la micro échelle temporelle (8).

$$\tau_t = \frac{1}{\sqrt{15}} \frac{\lambda_f}{u'} \quad (8)$$

Son évolution en fonction de la distance à la grille pour différentes profondeurs relatives z/d est présentée sur la figure 5.

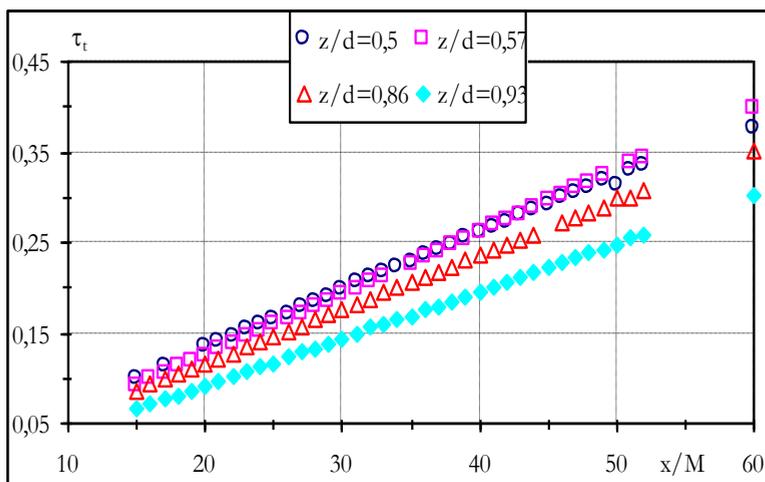


Fig. 5 : Micro échelle temporelle de turbulence

Plus on se rapproche de l'interface et plus la micro échelle temporelle diminue (Fig. 5). Son évolution générale croissante reste toujours la même mais ses valeurs changent. Ces structures ont donc une « durée de vie » d'autant plus courte qu'on est proche de la surface libre. Cette propriété est importante car cette échelle caractérise le gradient de vitesse. Elle est donc représentative de la taille moyenne des zones tourbillonnaires. En outre, sa détermination est fondamentale puisque cette échelle joue également un rôle important dans les processus de mélange au même titre que les échelles de Kolmogorov. La description de son évolution spatio-temporelle est donc nécessaire pour comprendre des phénomènes particuliers comme la diffusion de polluants au sein des écoulements.

CONCLUSIONS

L'implication de la turbulence dans les processus de transport sédimentaire a été mise en évidence par le biais de différents travaux au cours des dernières années. En particulier, l'interaction existante entre les échelles de turbulence et la taille des particules a été soulignée et il apparaît donc très utile de comprendre également les paramètres qui peuvent agir sur leur développement. C'est dans cette optique que ce travail a été entrepris. Nous avons choisi de nous focaliser sur l'action de la surface libre.

En étudiant le champ des vitesses par Vélocimétrie Laser dans un écoulement de canal, nous avons pu accéder aux dimensions spatio-temporelles de la turbulence générée par une grille. Nos résultats montrent

que la surface libre affecte le comportement des structures énergétiques alors que, dans la limite des conditions testées dans ce travail, elle ne modifie pas les propriétés spatio-temporelles de la micro échelle de Taylor.

Ce résultat est important car cette région de l'écoulement est une zone particulièrement riche en échange entre les deux milieux. De plus, la compréhension des mécanismes de cette interaction entre l'écoulement et les particules est fondamentale si on veut mieux appréhender les problèmes environnementaux qui lui sont liés (transport de polluants, turbidité des eaux,...).

Appliquée au cas des écoulements périodiques comme la houle [6], le prolongement de ce travail montre également l'importance des paramètres période et amplitude sur la structure de la turbulence.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Dietlin, F., 1982 Contribution à l'étude de l'influence de la turbulence sur la vitesse de sédimentation de particules marines., Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 294 pages..
- [2] Cadiergue, S., 1998 Analyse des caractéristiques de la vitesse de chute de particules solides en écoulement turbulent., Thèse de Doctorat, Université de Caen, 158 pages
- [3] Belorgey, M., Arsie, A., Cadiergues, S., 1999 The importance of the turbulent scale in coastal engineering. Proceedings of HYDRALAB workshop, Hanovre, (17-19 février 1999).
- [4] Hanes, D.M., 1988 Intermittent sediment suspension and its implication to sand tracer dispersal in wave-dominated environments., *Marine Geology*, 81, pp. 175-183, (1988).
- [5] Bailly, C., Comte-Bellot, G., 1999 Turbulence. Cours de D.E.A. École Centrale de Lyon.
- [6] Belorgey, M., Murzyn, F., 2001 Influence of waves on the turbulent scales, *Wave Phenomena III : waves in fluids from the microscopic to the planetary scale*, Université d'Alberta, Edmonton, (11-15 juin 2001).