

Crédit photo : H. Bonnard / P'

ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ÉCOULEMENT GÉNÉRÉ PAR UN OBSTACLE DE FOND EN ZONE À HAUTE VITESSE

T. COMBRET⁽¹⁾, A. SANTA CRUZ⁽¹⁾, F. HADRI^(1,2), S. GUILLOU⁽¹⁾
thomas.combret@unicaen.fr; alina.santa-cruz@unicaen.fr; ferhat.hadri@uvsq.fr;
sylvain.guillou@unicaen.fr

⁽¹⁾ Laboratoire Universitaire de Sciences Appliquées de Cherbourg (LUSAC), Unicaen, Cherbourg-en-Cotentin

⁽²⁾ Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles (LISV), Université de Versailles, Saint-Quentin-en-Yvelines
Corresponding author : Alina Santa Cruz

Résumé

Nous nous intéressons à la caractérisation de l'écoulement ambiant dans les fonds marins. Ces écoulements sont fortement marqués par la morphologie complexe des fonds. Dans cette contribution nous simplifions la modélisation de la bathymétrie des fonds marins en utilisant des obstacles cylindriques longs, pour lesquels on peut considérer que l'écoulement est « pseudo-2D ». L'objectif est de déterminer l'impact du rapport de forme de la section droite de l'obstacle sur le sillage généré par sa présence [1, 2]. Cette étude expérimentale est centrée sur la caractérisation de l'écoulement autour d'un obstacle cylindrique « long », qui occupe toute la largeur (W) de la zone d'étude. Les mesures sont faites en utilisant la Vélocimétrie par Images de Particules (PIV-2D) pour des vitesses de l'ordre 3,3 m/s.

La caractérisation du proche sillage, faite sur la base des champs de vitesses moyens obtenus pour nos six obstacles, met en évidence la modification de l'organisation de la topologie de l'écoulement d'un cas à l'autre. En effet, en plus de la variation de la longueur de la zone de formation tourbillonnaire moyenne, nous observons la présence de deux, voire trois zones de recirculations moyennes dans le proche sillage. Nous pouvons également observer la présence éventuelle d'une zone de recirculation moyenne juste en amont de l'obstacle.

Summary

In this study we deal with the characterization of the ambient flow generated by the complex morphology of the seabed. In this contribution, we simplify the modelling of the bathymetry by using long cylindrical obstacles; we can consider that the flow organization is «pseudo-2D». The aim is to determine the impact of the shape of the obstacle on the wake generated [1, 2]. The purpose of this experimental study is to characterize the flow around a “long” cylindrical obstacle. The measurements are made using particle image velocimetry (2D-PIV) with 3.3 m/s incoming flow velocity.

The near wake characterization, obtained from the mean velocity fields for our six obstacles,

highlights the modification of the organization of the topology. Indeed, we observe the presence of two or even three average recirculation zones in the near wake and, in some cases, the presence of an average recirculation zone placed upstream of the obstacle. Moreover, we can also observe the variation of the ratio length of the average vortex formation zone.

I – Introduction

Les côtes normandes sont identifiées comme des zones présentant un potentiel énergétique important propice à l'installation de parcs d'hydroliennes, du fait des forts courants marins qui y sont présents. Les projets d'installation de machines dans ces sites, soulèvent des interrogations sur divers facteurs agissant sur la performance des turbines qui y seraient placées. Notamment, il s'avère nécessaire d'insister sur la compréhension des mécanismes qui se mettent en place lors de la génération de l'écoulement ambiant turbulent compte-tenu de la forte complexité des fonds rocheux [3]. Dans la zone du Raz-Blanchard, les relevés bathymétriques indiquent la présence de rugosités dont la hauteur peut atteindre 5 m. La vitesse des courants marins est de l'ordre de 5 m/s. Aussi, in situ, le nombre de Reynolds¹ (basé sur la hauteur de la rugosité) est de l'ordre de $2,5 \cdot 10^7$.

La présence de structures tourbillonnaires générées à cause des variations de la bathymétrie des fonds marins complexes est un sujet qui fait l'objet d'études numériques et expérimentales [3, 4]. Modéliser simplement les rugosités des fonds marins, qui à la base présentent un certain niveau de complexité, permet d'appréhender les mécanismes de formation tourbillonnaire mis en œuvre dans ces écoulements [5, 6, 7].

Dans cette contribution, la variation de la bathymétrie est modélisée par des obstacles cylindriques longs, de section rectangulaire². Notons, que l'étude des sillages générés par ce type d'obstacles longs a été abordé essentiellement via une approche numérique [8, 9, 10, 11]. L'approche développée ici est expérimentale et l'étude est réalisée dans le Tunnel Hydrodynamique (TH) du LUSAC [12]. Les variations de bathymétrie des fonds marins sont modélisées par des cylindres longs, de section rectangulaire, posés sur le fond de la zone d'étude du TH. Dans une première contribution récente nous avons présenté les premières expérimentations menées sur ce sujet de recherche dans ce même dispositif expérimental [1], pour des écoulements à vitesses importantes, pour deux cylindres longs de section rectangulaire qui d'après la littérature génèrent un écoulement qui reste « pseudo-2D » [2]. Nos premiers constats sur l'impact des dimensions de la section droite de l'obstacle sur la topologie de l'écoulement moyen [12], ont ouvert la porte vers un travail plus poussé que nous présentons ici.

Dans la suite, nous nous intéresserons, en premier lieu à la caractérisation de l'organisation du sillage pour un obstacle cylindrique de section carrée. Ensuite, nous étudierons l'impact du rapport de forme de la section droite rectangulaire du cylindre sur l'organisation du sillage généré par sa présence. Pour cela nous travaillerons avec six obstacles cylindriques présentant des rapports de forme différents, mais suffisamment longs pour placer cette étude dans le cadre d'un écoulement « pseudo-2D » [1, 2].

II – Dispositif Expérimental

Les essais ont été réalisés dans le Tunnel Hydrodynamique (TH) du LUSAC (Cherbourg-en-Cotentin, UNICAEN). Les rugosités des fonds marins, ont été modélisées sous la forme simplifiée d'obstacles cylindriques de section rectangulaire. La technique de mesure utilisée est la Vélocimétrie par Images de Particules 2D2C.

II – 1 Tunnel Hydrodynamique

¹ Dans le cadre de ce travail il y a un rapport de l'ordre de 10^3 pour le Nombre de Reynolds par rapport au cas in situ.

² On considère qu'un cylindre est long lorsque le rapport d'aspect entre la longueur de l'obstacle et la longueur caractéristique de la section droite supérieur à 10.

Le Tunnel Hydrodynamique, représenté sur la figure 1a est un circuit d'eau en boucle fermé. L'écoulement en charge est généré par une pompe à axe hélicoïdal. Les mesures sont faites dans la veine d'essais transparente (Plexiglass) de section carrée de côté (W) 0,3 m de côté et de longueur (L) 1,4 m. La veine d'essais fait partie de la branche supérieure du TH (cf. Figure 1 b).

Le TH est équipé d'un débitmètre électromagnétique. Par ailleurs, l'outil de métrologie de prédilection, non intrusif, utilisé pour ces premiers travaux est la Vélocimétrie par Images de Particules dans sa version simple bidimensionnelle (PIV-2D2C); la méthode adoptée est la corrélation croisée³.

Nous utilisons le banc PIV commercialisé par LaVision (DAVIS 10). Il est composé d'une caméra (type CCD d'une résolution de $1376 \text{ pixels} \times 1040 \text{ pixels}$ et de fréquence 5 Hz), d'un laser Nd : YAG (SOLO-PIV), pour générer les nappes laser illuminant la section explorée, et d'une Unité Programmable qui assure la synchronisation entre la caméra et le laser. Pour l'ensemencement de l'écoulement nous utilisons des particules de verre borosilicatées sphériques et creuses de diamètre compris entre 9 et 13 μm , dont la masse volumique est proche de celle de l'eau.

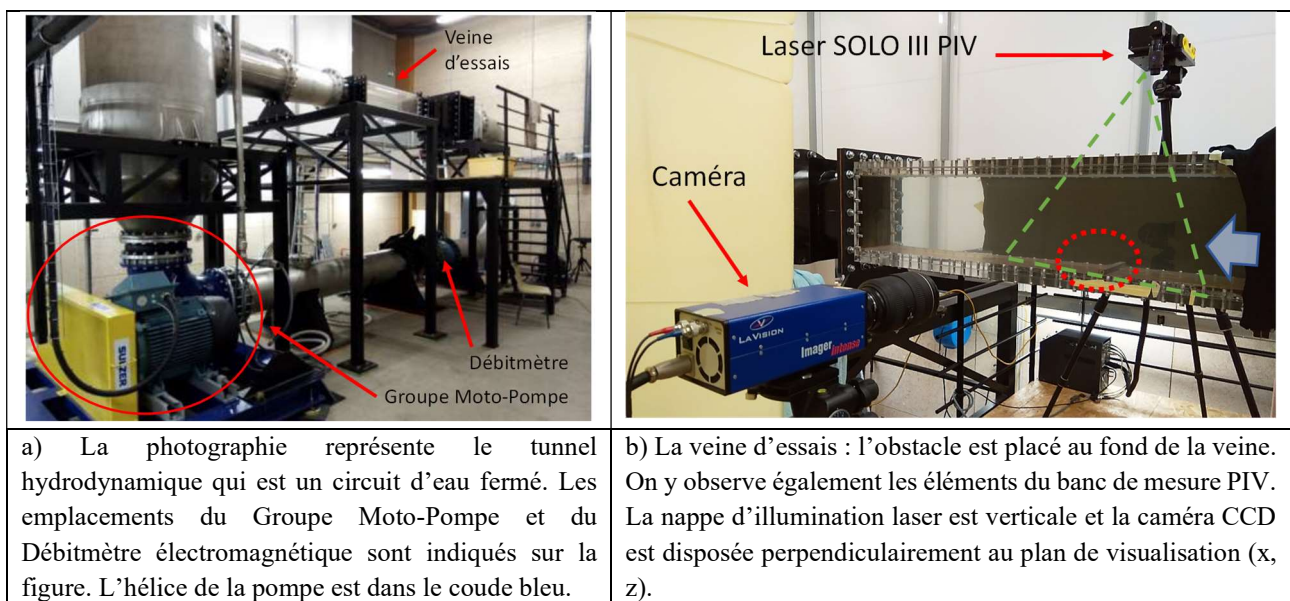


Figure 1. Représentation du tunnel Hydrodynamique du LUSAC

II – 2 Modélisation simplifiée des rugosités de fond

Cette étude expérimentale vise à modéliser l'impact de la variation de la bathymétrie des fonds sur la formation de structures tourbillonnaires ambiants. Une approche simplifiée consiste en assimiler lesdites variations à des cylindres « longs » de section rectangulaire, occupant toute la largeur « W » de la veine d'essais, de paroi verticale à paroi verticale. La figure 2 montre un zoom, de l'un des obstacles, placé sur le fond de la veine d'essais. Les axes du repère de référence, sont représentés également sur cette figure, considérant notamment l'axe des (x) dans les sens de l'écoulement. La section droite du cylindre qui est perpendiculaire à l'axe des (y), et ses dimensions sont respectivement, sa hauteur « H » (suivant (z)) et sa longueur « B » (suivant (x)).

Dans cette étude nous mettrons l'accent sur l'influence que ces deux dimensions ont sur l'organisation de l'écoulement généré à l'aval de l'obstacle. Aussi, six modèles, dont les

³ La corrélation croisée se fait sur des séries de paires d'images. L'intervalle de temps Δt entre les deux images est fonction de la vitesse débitante de l'écoulement, la taille de la fenêtre de corrélation et le facteur d'agrandissement des images. En effet nous abordons, ici, une exploration large de l'écoulement.

caractéristiques sont répertoriées dans le tableau 1, ont été utilisés. Force est de constater que le rapport de forme H/B de la section droite, ainsi que le rapport d'allongement W/H varient d'un obstacle à un autre. Ce dernier rapport a, comme nous l'avons déjà mentionné, un impact sur la bidimensionnalité de l'écoulement généré à l'aval de l'obstacle notamment au voisinage du plan médian. Le seuil de 10, permet d'après la littérature de différencier les cylindres dits « longs » des cylindres « courts ». Il a été identifié par R. Martinuzzi and C. Tropea [9] pour les cylindres de section carrée. Notons que le modèle R6 présente un rapport W/H de 7,5, soit inférieur au seuil de 10. En vue, de conforter la pseudo-bidimensionnalité de l'écoulement, trois plans de visualisation ont été explorés : le plan médian ($y=0$) et deux plans décalés suivant (y) et symétriques ($y=\pm W/4$) (cf. Figure 2). Le blocage vertical de l'écoulement (suivant l'axe des (z)), est donné par H/W (soit l'inverse du rapport d'allongement, du fait que la veine d'essais a une section de passage du flux carrée). Il varie, en fonction des modèles entre 5% et 10%.

La vitesse débitante U_∞ en entrée de la veine d'essais est de l'ordre de 3,3 m/s. Le nombre de Reynolds caractérisant notre écoulement est basé sur H : $Re_H = \frac{U_\infty H}{\nu}$ avec ν la viscosité cinématique de l'eau.

Finalement notons que pour tous les obstacles, le front amont a été placés à 300 mm de l'entrée de l'entrée de la veine d'essais. L'adimensionnement de x et de y a été fait par rapport à H ; on a alors $x^*=x/H$ et $z^*=z/H$.

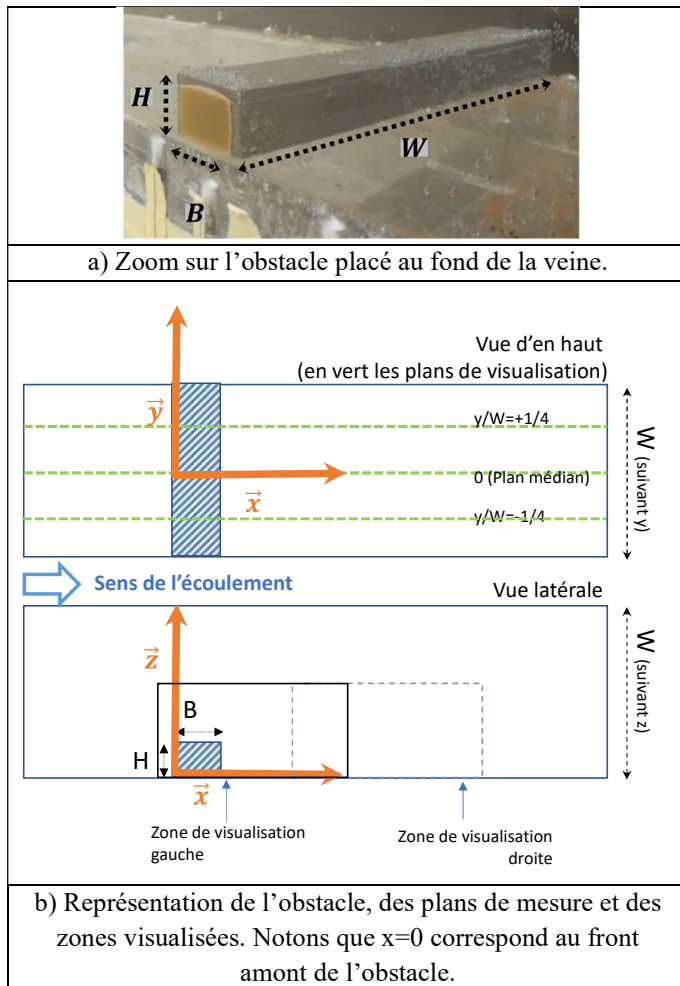


Figure 2. Modélisation simplifiée des rugosités de fond.

Obstacle	B [mm]	H [mm]	W [mm]	H/B Rapport de Forme	W/H Allongement	Re _H	Re _B	L _R /H	L _R /B
C1	40	20	300	0,5	15	65500	131000	7,0	3,5
C2	30	20	300	0,67	15	65500	97762	6.5	4,3
C3	20	15	300	0,75	20	49200	65600	9.3	7
C4	20	20	300	1	15	65500	65600	10	10
C5	20	30	300	1,5	10	99200	66133	>8,8	>13,2
C6	20	40	300	2	7,5	131000	65600	>7,1	>14,2

Tableau 1. Caractéristiques des obstacles utilisés dans le cadre de ce travail. La section de la veine d'essais est carrée, le rapport W/H est le rapport d'allongement de l'obstacle. Nous avons classé les obstacles en ordre croissant de rapport de forme et considérerons C4, dont la section est carrée, comme la géométrie de référence. Longueur de la zone de recirculation L_R adimensionnée par H et par B. dans le plan médian.

III – Résultats

Nous présenterons dans la suite des résultats relatifs à l'exploration de la zone de formation tourbillonnaire, zone définie sur la base d'une analyse de champs de vitesses moyennes, dont les caractéristiques seront définies dans la suite de cette étude. Aussi, l'étendue explorée différera d'un cas à un autre, deux zones, voire plus, devront donc être visualisées et concaténées par la suite (cf. Figure 2) en vue de couvrir toute la zone de formation tourbillonnaire moyenne en incluant le point de rattachement de l'écoulement.

Dans la suite nous nous centrerons, en un premier temps sur l'obstacle qui présente H=B, que nous considérerons dans la suite comme la configuration de référence. De fait, la configuration carrée est celle que l'on rencontre usuellement dans la littérature. Les résultats obtenus pour les autres obstacles seront présentés en un deuxième temps.

III – 1 Résultats pour les cas de référence

Dans cette partie, nous présenterons les résultats obtenus pour le cas de référence avec un rapport d'aspect H/B=1. La caractérisation de l'écoulement se fera, dans la suite sur la base des champs de vitesses moyennes. Les calculs statistiques ont été menés sur 1500 champs de vitesses instantanées pour chaque cas d'étude.

La Figure 3 présente, des champs de vitesses instantanés pour l'obstacle C4 (plan médian - instants proches), on y observe, en partie, le décollement de l'écoulement. On observe, la formation de tourbillons à l'aval de l'obstacle, notamment, la formation au niveau du sommet de l'obstacle, ainsi que leur évolution vers l'aval. Au niveau du fond, des écoulements de retour, génèrent également des tourbillons. La distance entre tourbillons s'échappant au niveau du sommet et ceux se déplaçant sur le fond est faible. Aussi, l'interaction entre ces deux lignes entraîne rapidement des étirements, mais aussi des fusions de tourbillons. Notons, que l'écoulement amont semble également impacté par la présence de l'obstacle. Occasionnellement on peut deviner des petites zones de recirculation au pied du front amont.

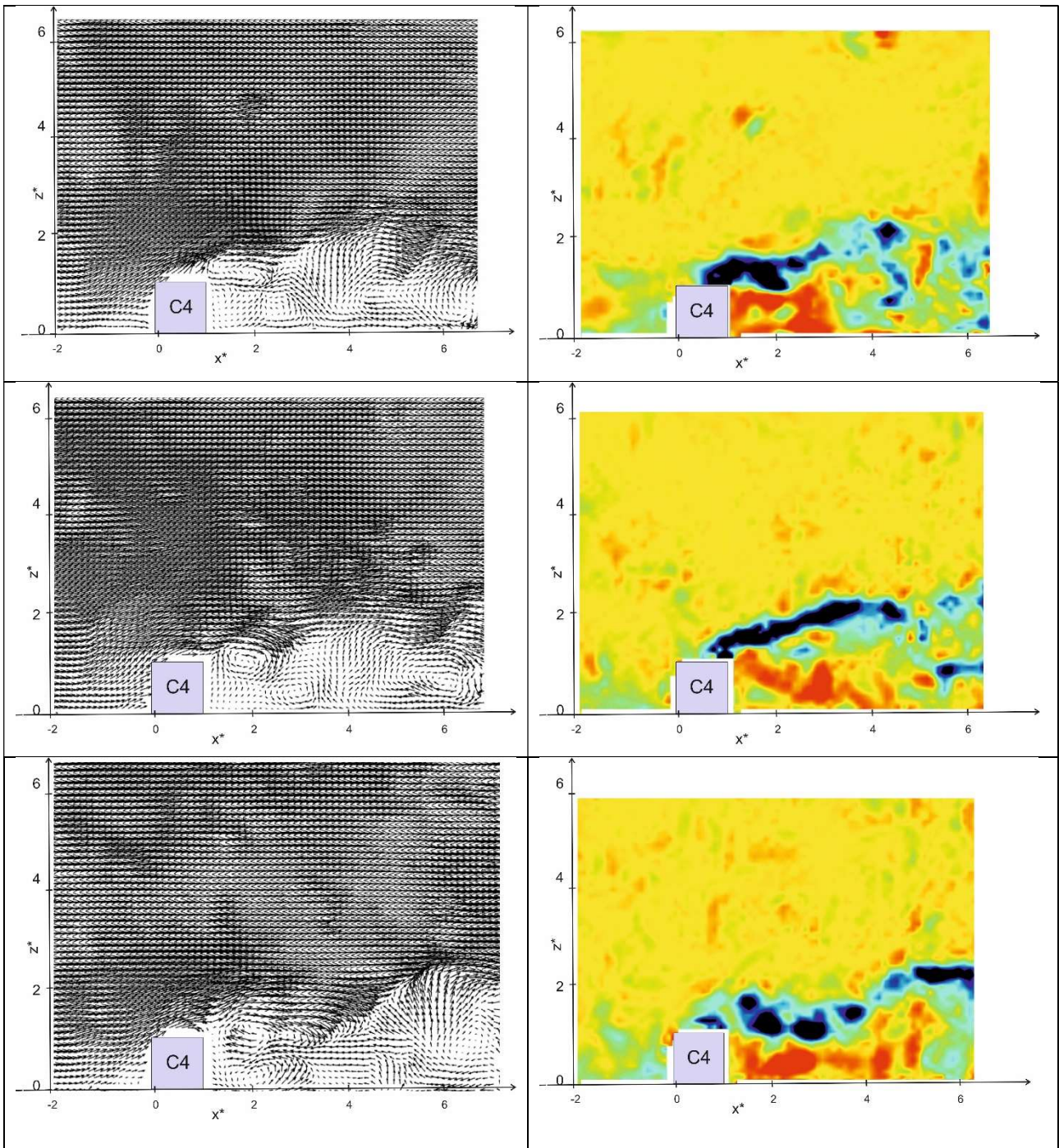


Figure 3. Champs de vitesses instantanées et champs de rotationnel (suivant l'axe transversal au plan de visualisation) à des instants différents, obstacle C4

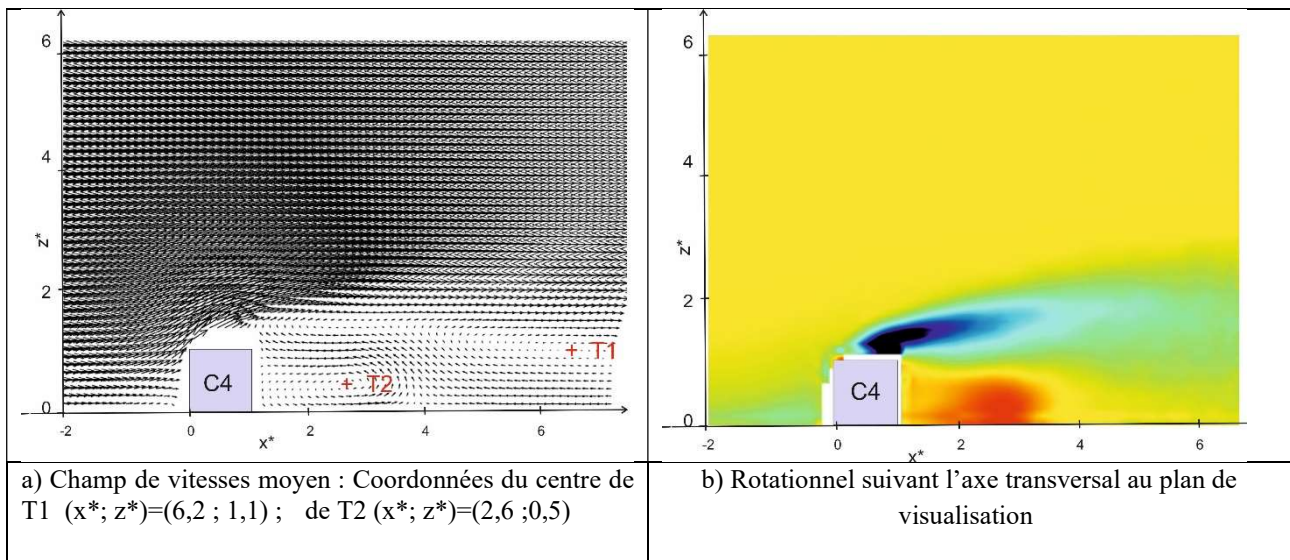


Figure 4. Ecoulement moyen pour le cas de référence C4 (plan médian).

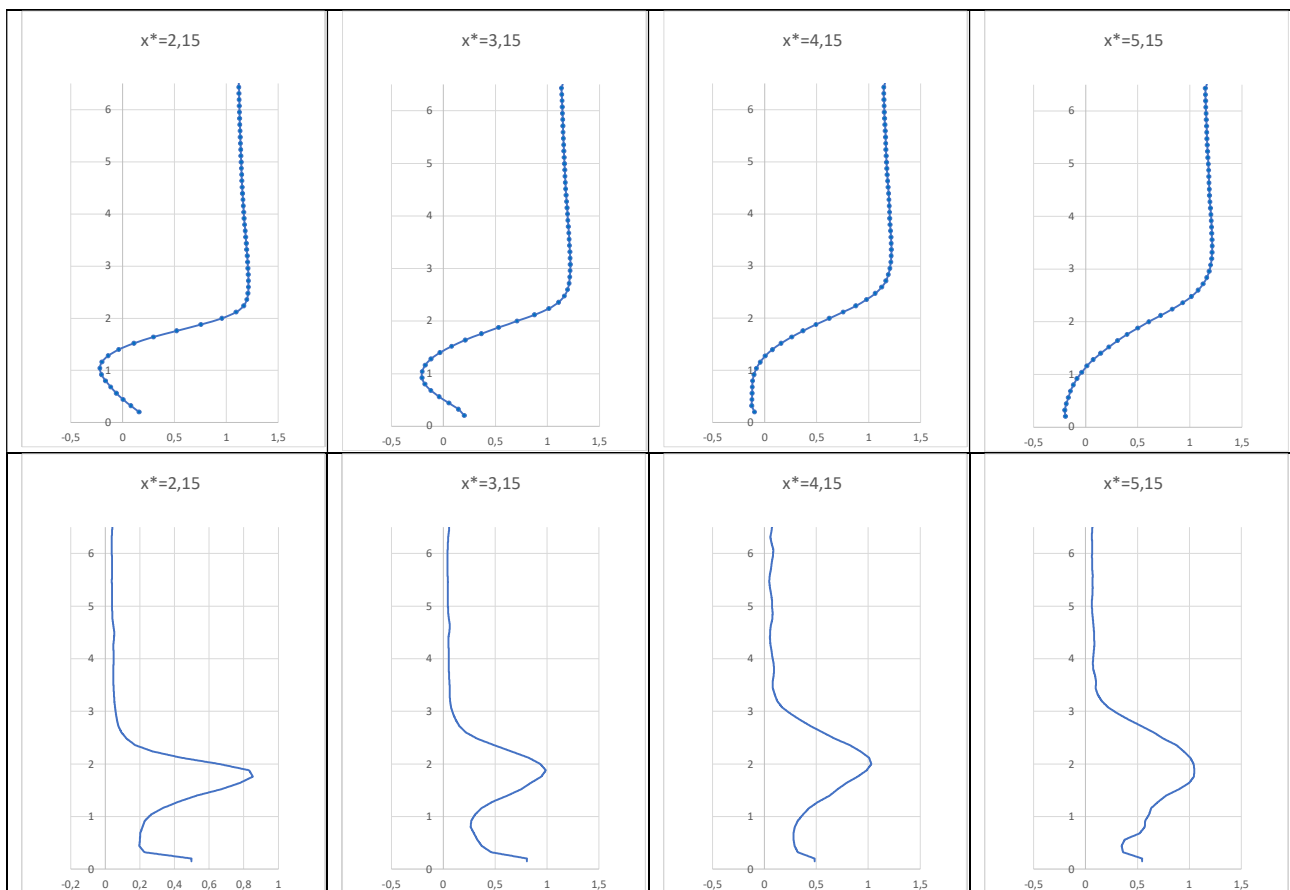


Figure 5. Profils de vitesses longitudinales adimensionnées u/U_∞ (en haut) et profils d'énergie cinétique turbulente k en fonction de z^* (en bas).

La figure 4a représente le champ de vitesses, pour l'obstacle C4, le cas de référence, au plan médian. Sa topologie confirme les observations précédemment faites pour les champs instantanés. On observe nettement une ligne de séparation entre l'écoulement libre et le flux qui subit la présence de l'obstacle. La ligne de séparation prend naissance une fois le bord d'attaque de la rugosité dépassé. L'angle du décollement est de l'ordre de 45° . Le rotationnel suivant l'axe des y représenté sur la figure 4b, met

en évidence deux zones contrarotatives : un panache rouge prenant naissance au sommet de l'obstacle indique la génération des tourbillons issus du cisaillement provoqué par le contact du flux incident avec l'obstacle. Par ailleurs, à l'aval immédiat de l'obstacle, on observe une deuxième zone pour laquelle le rotationnel a un signe opposé.

Soit la longueur de la zone de formation tourbillonnaire, $L_R = x_R - B/2$, est définie comme la distance entre la paroi aval de l'obstacle et le point de rattachement (d'abscisse x_R)⁴ et $L_R/B=10$ (cf. Tableau 1).

Comme on peut voir sur la figure 4a entre le plan aval de l'obstacle et le point de rattachement on a deux zones de recirculation moyennes que nous nommerons (T1) et (T2). Etant issu du décollement du flux amont, (T1) est de grande taille et prend naissance au sommet de l'obstacle et s'étire pour s'élargir et prendre assise sur le fond. Sa recirculation génère un flux à contre-courant au contact du fond, donnant naissance à (T2) la deuxième zone de recirculation moyenne, contre-rotative. De forme allongée, (T2) est de plus petite taille que le (T1) et est à proximité de C4 et surmontée par (T1). Bien évidemment, la zone perturbée présente un déficit de vitesse par rapport à la zone couverte par l'écoulement libre. L'allure des profils de vitesses longitudinales adimensionnées (suivant z^*) représentés sur la figure 5 reflète : la présence des deux zones de recirculation moyennes superposées (cf. Figure 5a) avec un double changement de signe de u/U_∞ pour $x^*=2,15$, la seule présence de T1 à $x^*=5,15$ et l'entre deux pour $x^*=4,15$. Les profils d'Energie Cinétique Turbulente⁵ (ECT), sont également représentés sur la figure 5 avec $k = 3/4(R_{xx} + R_{zz})$. A leur tour, ces profils montrent que la perturbation de l'écoulement est accompagnée par l'augmentation de l'ECT, le maximum étant à proximité de la ligne de séparation de l'écoulement moyen, zone de fort le cisaillement.

En comparant le champ de vitesse moyennes obtenus au plan médian à ceux obtenus sur les plans $y/W=+/-1/4$, on constate que la topologie de l'écoulement reste la même ; on en déduit que l'écoulement est bien « pseudo-2D » sur une bonne partie de la longueur de l'obstacle, incluant ces trois plans.

III – 2 Résultats pour les autres obstacles

Dans ce paragraphe, nous présenterons uniquement des résultats relevés sur le plan médian

La topologie du champ moyen ne reste pas la même pour tous les modèles que nous avons étudiés. Ceci peut être la confluence de plusieurs facteurs, les uns liés directement à la géométrie des cylindres (l'allongement et le rapport de forme de la section droite peuvent avoir leur part d'influence) et d'autres liés à l'interaction entre la géométrie et l'écoulement amont arrivant sur l'obstacle. Le rapport entre H et l'épaisseur de la couche limite amont est un facteur qui devra être exploré.

Pour les cas C4, C3 et C2, dont les rapports de forme sont de 1 ; 0,75 et 0,67 respectivement, les écoulements moyens présentent des caractéristiques topologiques similaires. Les observations faites pour le cas de référence restent donc valables pour C2 et C3, soit, la présence de deux recirculations tourbillonnaires contrarotatives à l'aval de l'obstacle. L_R / B augmente avec le rapport de forme H/B pour passer de 4,3 à 7 et finalement à 10.

Un deuxième cas de figure, est celui observé pour C1 qui présente un rapport H/B inférieur à 1

⁴ Lorsque l'étendue de la zone de formation tourbillonnaire est trop grande, il faut multiplier le nombre de fenêtres de visualisation et de mesure à explorer à l'aval de l'obstacle.

⁵ Dans l'absolu $k = 1/2(R_{xx} + R_{yy} + R_{zz})$. Cependant, dans le cas présent se fait via une PIV-2D2C, la composante en (y) n'est pas ici mesurée. Le logiciel Davis de LaVision propose donc une estimation de l'ECT, compte-tenu de ce manque.

et égal à 0,5. En effet, la topologie a subi des modifications. La longueur de la zone de recirculations rapportée à la longueur de l'obstacle est de $L_R/B = 3,5$. On maintient la tendance préalablement observée pour l'évolution de L_R/B en fonction de H/B . Notons cependant que dans ce cas $B=40$ mm et la zone de formation est très grande. Une différence notable dans l'organisation de l'écoulement par rapport aux cas précédents est l'apparition d'une troisième zone de recirculation moyenne T3 au-dessus de T2. Quelle peut-être la genèse de T3 ? Pour le cas de référence (C4) on avait observé que la structure principale T1, a une forme allongée. On peut supposer que l'étirement poussé de cette structure mène vers la scission de ladite zone de recirculation moyenne en deux zones de recirculation (ici T1 et T2).

On observe un troisième cas de figure pour les obstacles C5 et C6, qui sont des géométries élancées, avec des rapports de forme (H/B) de 1,5 et 2 respectivement. Aussi, la largeur du sillage est, dans l'absolu, forcément plus grande. Nous avons mené notre exploration sur une étendue importante à l'aval de l'obstacle, dépassant une longueur de 13 fois B suivant l'axe des (x). En vue de nos résultats, et malgré le fait de ne pas avoir relevé la longueur exacte⁶ de la zone de recirculation moyenne pour ces deux cas, nous constatons que la valeur de L_R/B continue d'augmenter. La topologie de la zone de formation tourbillonnaire formée à l'aval de l'obstacle (observée dans le champ de vitesses moyennes) est dans ce cas beaucoup plus ample.

La figure 6d représente un champ instantané pour C6. Compte-tenu du grand rapport de forme de l'obstacle, on observe distinctement la formation des tourbillons au sommet de celui-ci. Leur déplacement vers l'aval est accompagné par un étalement progressif. On n'observe pas les fusions et scissions préalablement signalés pour le cas C4. Il y a une nette séparation entre leur trajectoire et l'écoulement de retour au niveau du fond. Ceci se traduit, lorsqu'on observe la topologie du champ de vitesse moyennes par une zone de recirculation principale (T1) très évasée. La zone de recirculation (T2) observée pour le cas de référence, semble s'être renforcée et se situe donc contre l'obstacle. La Figure 6c montre la ligne de séparation entre (T1 et T2), qui met en évidence que, pour les obstacles élancés, (T2) n'occupe pas toute la hauteur de l'obstacle. Finalement, on observe l'apparition d'une zone de recirculation accolée à la paroi amont de l'obstacle (T4) dont la taille augmente avec (H/B). Les recirculations (T2) et (T3) traduisent la présence permanente de tourbillons de taille conséquente accolées au pied de l'obstacle, en amont et en aval, comme on peut le voir sur le champ de vitesses instantanées (cf. Figure 6).

Zhao et Al. [8] ont abordé cette problématique par simulation numérique bidimensionnelle en considérant des obstacles rectangulaires avec un rapport de forme variant entre 0,25 à 1, pour des nombres de Reynolds Re_B compris entre $5 \cdot 10^4$ et $5 \cdot 10^5$ et des conditions de surface libre. A l'instar de ces auteurs, on constate que L_R/B diminue avec H/B ⁷. Cependant dans notre cas, L_R/B reste globalement moins important que dans l'étude de ces auteurs. Par ailleurs, le rapport de taille entre les zones de recirculation secondaires (T2 et T4) et T1, est beaucoup plus grand. Notons que dans le cadre de cette étude expérimentale les blocages vertical et latéral sont toujours à considérer.

⁶ Pour C5 et C6, des expériences faites sur des zones visualisées successives (suivant l'axe des (x)) ont permis d'explorer une longueur étendue à l'aval de l'obstacle. Il faudra cependant mener des expériences complémentaires pour caractériser la partie de la zone de recirculation moyenne la plus éloignée de l'obstacle.

⁷ Ces auteurs ont souligné que Re_B ainsi que l'épaisseur de la couche limite de l'écoulement amont ont un impact léger sur L_R/B .

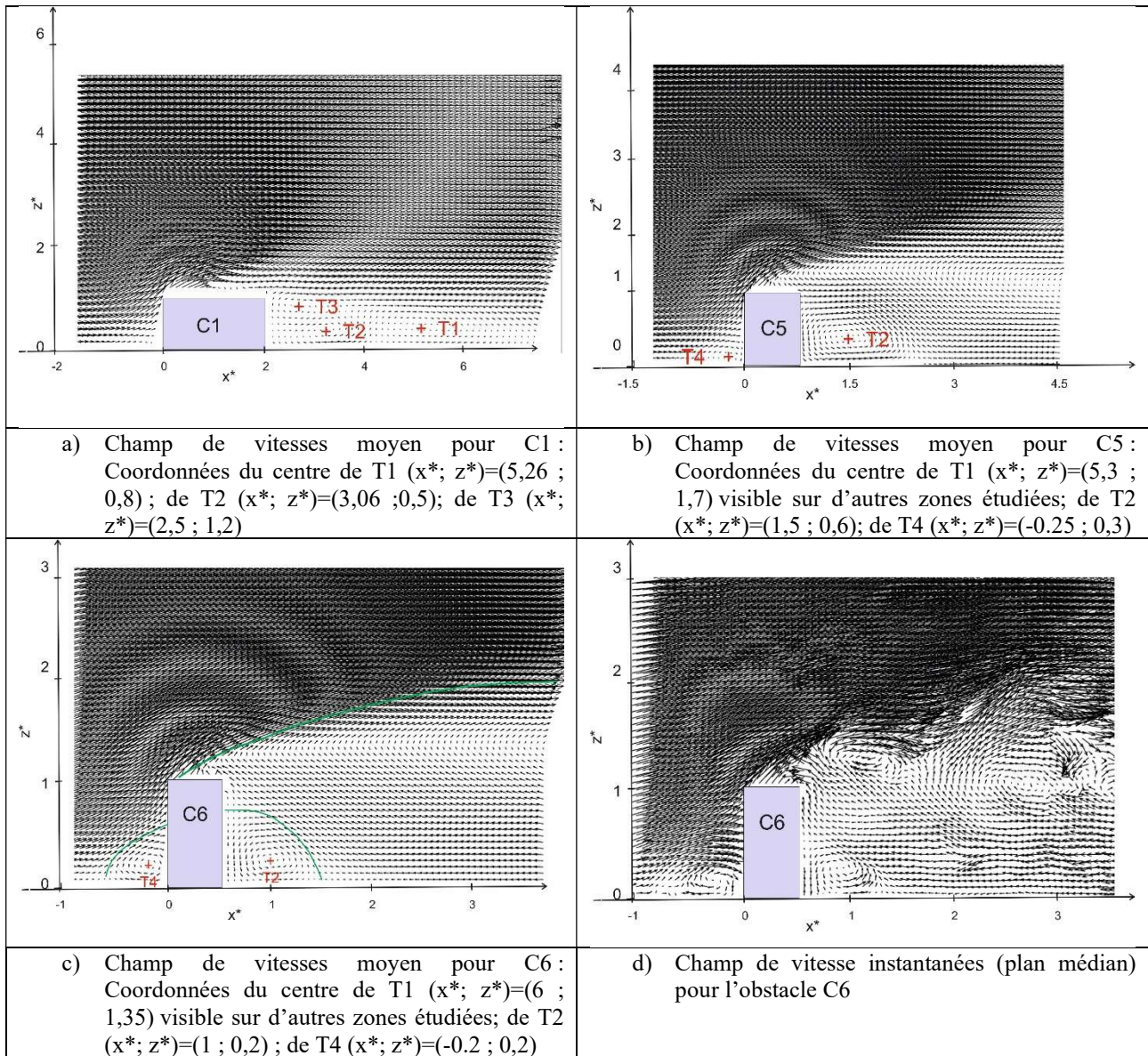


Figure 6. Champ de vitesses moyen pour C1 (a), C5 (b) et C6 (c) et champ de vitesse instantanées pour l'obstacle C6 (d).

IV – Conclusions et perspectives

Dans ce travail nous avons abordé expérimentalement la thématique de la génération de la turbulence issue de la présence de fonds complexes. Les mesures ont été faites par PIV-2D2C. Les macro rugosités ont été modélisées par des cylindres longs occupant toute la largeur du canal.

Le cas de l'obstacle de référence (C4 de rapport $H/B=1$) a été traité en un premier temps, mettant en avant la naissance des tourbillons au sommet de l'obstacle ainsi que leur déplacement vers l'aval et un écoulement de retour au niveau du fond, générant l'apparition d'une autre série de tourbillons contrarotatifs à l'aval de l'obstacle. L'empreinte du sillage sur les champs de vitesses moyen est la présence (pour C4) d'une zone de recirculation collée au front aval de l'obstacle et d'une plus grande zone de recirculation prenant naissance au sommet de l'obstacle et occupant la plus grande partie de la zone de formation tourbillonnaire. Finalement, l'impact sur la distribution de l'énergie cinétique turbulente est mis en évidence.

En vue d'approfondir l'étude hydrodynamique, nous avons étudié une gamme d'obstacles dont le rapport de forme H/B va de 0,5 à 2. Nous avons mis en évidence une progression de la topologie de l'écoulement, généré à l'aval de l'obstacle, en fonction du rapport de forme : en effet la longueur

de recirculation L_R/B diminue en même temps que H/B . Le nombre et la taille des zones de recirculation moyennes à l'aval de l'obstacle, ainsi que la position de leurs cœurs varient. Finalement pour des obstacles élancés on voit apparaître une zone de recirculation moyenne au pied de l'obstacle en amont de celui-ci.

En perspective nous travaillerons sur le caractère bidimensionnel du sillage le long du cylindre, notamment pour les obstacles présentant des rapports d'aspect inférieurs à 10. Par ailleurs travailler avec une résolution spatiale et temporelle plus fines permettront une caractérisation plus précise de la zone de formation et d'échappement tourbillonnaires. Enfin, l'identification des tourbillons et leur suivi est une voie à développer.

Références

- [1] A. Santa Cruz, F. Hadri, C. Mignonnet and S. Guillou. Impact d'un fond complexe sur la génération de structures tourbillonnaires en zone à haute vitesse. *Actes du 25^{ème} Congrès Français de Mécanique*, Nantes, 2022.
- [2] R. Martinuzzi, C. Tropea. The flow around surface-mounted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow, *ASME*, 115(1): 85–92, 1993.
- [3] A. Bourgoïn, S. Guillou, J. Thiébot, R. Ata. Turbulence characterization at a tidal energy site using large eddy simulations: case of the Aldernery Race, *Philosophical transactions A*, 378: 20190499, 2020
- [4] P. Mercier, M.Grondeau, S.Guillou, J.Thiebot, E.Poizot. Numerical study of the turbulent eddies generated by the seabed roughness at a tidal power site, *Applied Ocean Research*, 97, 102082, 2020.
- [5] M. Ikhennicheu, G.Germain, P.Druault, B.Gaurier. Experimental study of coherent flow structures past a wall-mounted square cylinder. *Ocean Engineering*, 182:137-14, 2019.
- [6] P. Mercier, M. Ikhennicheu, S.S. Guillou, G. Germain, E. Poizot, M. Grondeau, J. Thiébot, P. Druault. The merging of Kelvin–Helmholtz vortices into large coherent flow structures in a high Reynolds number flow past a wallmounted square cylinder. *Ocean Engineering*, 204, 107274, 2020
- [7] P. Mercier, S.S. Guillou. The impact of the seabed morphology on turbulence generation in a strong tidal stream. *Physics of Fluids*, 33, 055125, 2021.
- [8] Y.Z. Liu, F. Ke, H.J Sung. Unsteady separated and reattaching turbulent flow over a two-dimensional square rib, *Journal of fluids and structures*, 24: 366 – 381, 2008.
- [9] H. Gu, J. Yang, M. Liu. Study on the instability in separating-reattaching flow over a surface mounted rib, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 1029-0257, 2017
- [10] F. Zhao, G. Yin, M.C. Ong. Numerical study on flow around a partially buried two-dimensional ribs at high Reynolds number. *Ocean engineering*, 198, 106988, 2020.
- [11] G. Yin, M. C. Ong. Numerical analysis on flow around a wall-mounted square structure using dynamic mode decomposition, *Ocean engineering*, 223, 108647, 2021.
- [12] M. Régniez, M.A.J. Alawieh, J.M. Sanchez, A. Santa Cruz, V. Millet, S. Guillou, F. Chevalier. Caractérisation Vibro-Acoustique D'une Veine Hydrodynamique. *Actes du 17^{èmes} Journées de l'Hydrodynamique (JH2020)*, Caen, 2020.