

## **Étude de la génération de turbulence par un fond complexe et effets potentiels sur une hydrolienne**

*Simulation des grandes structures de la turbulence avec la méthode de Boltzmann sur réseau*

**A. GOY<sup>(1)</sup>, P. MERCIER<sup>(1)</sup>, S. GUILLOU<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> Université de Caen Normandie, LUSAC, France

[arthur.goy@unicaen.fr](mailto:arthur.goy@unicaen.fr), [philippe.mercier@unicaen.fr](mailto:philippe.mercier@unicaen.fr), [sylvain.guillou@unicaen.fr](mailto:sylvain.guillou@unicaen.fr)

### **Résumé**

Les hydroliennes utilisent la puissance des courants de marée pour produire de l'énergie. Les forts courants de marée sont caractérisés par un taux de turbulence élevé. La caractérisation de cette turbulence, générée par l'interaction entre l'écoulement et le fond marin, est essentielle pour le dimensionnement des hydroliennes et des fermes hydroliennes. La méthode de Boltzmann sur réseau est utilisée dans cette étude pour simuler et analyser la turbulence générée par le fond marin. Le problème est étudié à l'échelle 1/20 pour pouvoir comparer les résultats obtenus avec des travaux expérimentaux. Le fond marin est modélisé par des obstacles canoniques représentant les macro-rugosités les plus importantes pouvant être observées dans le Raz Blanchard. Ces travaux se concentrent sur les différences entre l'écoulement autour d'un cylindre à base carré isolé et de la combinaison de ce même cylindre précédé d'un cube par l'étude des écoulements instantanés et moyens, une analyse spectrale et la visualisation en trois dimensions des tourbillons. L'analyse spectrale des écoulements montre une différence de fréquence, trajectoire et intensité des lâchers tourbillonnaires. Le sillage du cube absorbe une partie de la turbulence générée au centre du cylindre, menant à une turbulence moins concentrée dans les lâchers tourbillonnaires et donc plus homogène dans l'écoulement.

### **Summary**

Tidal turbines use the power of tidal streams to produce energy. Strong tidal streams are highly turbulent. The characterization of turbulence, due to interactions between the flow and the seabed, is essential for the tidal turbine design and tidal turbine farm installation. This study proposes to simulate and analyse the turbulence generated by the seabed using the Lattice Boltzmann Method. To allow for a comparison with experiments, the problem is addressed at a 1/20 scale. The seabed is modelled by canonical obstacles representative of the largest macro-roughnesses that can be observed on the real seabed of Alderney Race near La Hague Cape. This study focuses on the differences between the flow around an isolated squared base cylinder and the combination of the same cylinder with the addition of a cube upstream. The flow characteristics are studied

by instantaneous and average flows, signal treatment and 3D visualisation. The comparison of signal treatment between the cylinder only and the cube upstream reveals different large eddy release frequencies, trajectories and intensities. The cube's wake absorbs a part of the turbulence generated by the centre of the cylinder leading to a more homogeneous turbulence in the flow.

## 1. Introduction

Le plus puissant gisement hydrolien de France est le Raz Blanchard, situé proche du cap de la Hague. Le fond marin du Raz Blanchard est rocheux et est composé de nombreuses macro-rugosités ainsi que d'une multitude de failles. L'interaction entre les puissants courants de marée et les aspérités du fond marin génère un haut niveau de turbulence qui risque de détériorer la production et réduire la longévité des hydroliennes [1][2]. Étudier cette turbulence et comprendre où elle est générée est donc essentiel pour le dimensionnement des turbines et des fermes hydroliennes. L'utilisation d'outils numériques permet de compléter les mesures *in situ* et les expériences en laboratoire.

La modélisation complète du fond marin étant complexe, que ce soit expérimentalement ou numériquement, les macro-rugosités de fond sont souvent simplifiées en obstacles canoniques. Ces obstacles ont été étudiés séparément dans un premier temps [3][4][5] afin d'avoir une idée de la forme générant le plus de turbulence. Les résultats montrent qu'un cylindre horizontal à base carré avec un rapport d'aspect suffisamment grand (6 ou 7) génère de puissants tourbillons qui remontent jusqu'à la surface et peuvent endommager les hydroliennes. Puis des études expérimentales se sont intéressées à la combinaison de ces obstacles pour étudier l'impact de l'interaction entre les aspérités sur l'écoulement [3][6][7]. Le cas qui va nous intéresser dans cette étude est l'ajout d'un cube en amont du cylindre précédemment cité. Les expériences ont montré que l'ajout de ce cube perturbe la dynamique tourbillonnaire du cylindre. Cet article présente les travaux sur l'étude numérique de ce cas afin de bien visualiser les phénomènes en trois dimensions et ainsi essayer de comprendre d'où viennent les différences entre l'écoulement avec et sans cube.

Pour cela, la méthode de simulation utilisée dans l'intégralité de ces travaux est présentée en partie 2. La partie 3 compare les deux écoulements par analyse spectrale. Enfin, la configuration avec cube et cylindre est analysée en partie 4 pour comprendre l'origine des différences observées.

## 2. Présentation de la simulation

Cette étude fait suite à des travaux numériques sur le cas du cylindre seul [8][9], sur lequel le modèle a été validé par rapport à des expériences en bassin [3]. Les simulations sont faites à l'échelle 1/20 pour correspondre aux expériences en laboratoire et sont basées sur la méthode de Boltzmann sur réseau (LBM) implémentée sur la librairie C++ Palabos [10]. La LBM est une méthode de résolution instationnaire [11] basée sur la résolution de l'équation de Boltzmann [12][13]. L'une de ses particularités est sa résolution locale des équations et elle est donc parfaitement adaptée aux calculs massivement parallèles. Le schéma utilisé est le schéma classique D3Q19 avec le modèle de collision BGK [12]. La LBM est couplée à la simulation des grandes structures de la turbulence (LES) afin de modéliser l'effet des plus petites échelles de turbulence [14]. Le modèle utilisé est celui de Smagorinsky statique avec une valeur de constante de 0.14 [15]. Concernant les conditions aux limites du domaine, l'entrée est une vitesse uniforme  $U_\infty = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , la sortie est une condition de Dirichlet en pression. Les obstacles et le fond marin sont modélisés par une condition d'adhérence imposé avec la méthode de Bouzidi [16]. La surface est modélisée par une condition de glissement. Enfin, les parois latérales sont des conditions de Dirichlet auxquelles sont ajoutées une viscosité artificiellement augmentée en proche paroi pour éviter les divergences numériques.

Le domaine de simulation est un parallélépipède rectangle de dimension  $16 \times 2 \times 4,5 \text{ m}$ . Deux obstacles fixes sont posés sur le fond, un cylindre à base carrée de côté  $H = 0,25 \text{ m}$  et de rapport d'aspect égal à 6 placé perpendiculairement à l'écoulement ainsi qu'un cube de côté  $H$  placé à une distance de  $3H$  en amont du cylindre. Les positions du cube et du cylindre peuvent être retrouvées sur la figure 1. L'origine du repère est définie par le centre de la face inférieure du cylindre. Les obstacles sont légèrement décentrés latéralement afin d'éviter d'avoir un écoulement symétrique. L'écoulement se fait selon la direction  $X$  positive avec une vitesse initiale  $U_\infty = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Le domaine est divisé par blocs, cela permet de paralléliser les calculs et d'avoir des zones de raffinement de maillage. Chaque bloc contient  $18^3$  mailles donnant un pas d'espace compris entre  $\Delta x = 0,69$  et  $2,78 \text{ cm}$  et un pas de temps de  $\Delta t = 5,2 \cdot 10^{-4} \text{ s}$  dans la zone la plus raffinée et  $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ s}$  dans la zone la plus grossière. La division par blocs est représentée sur la figure 2.

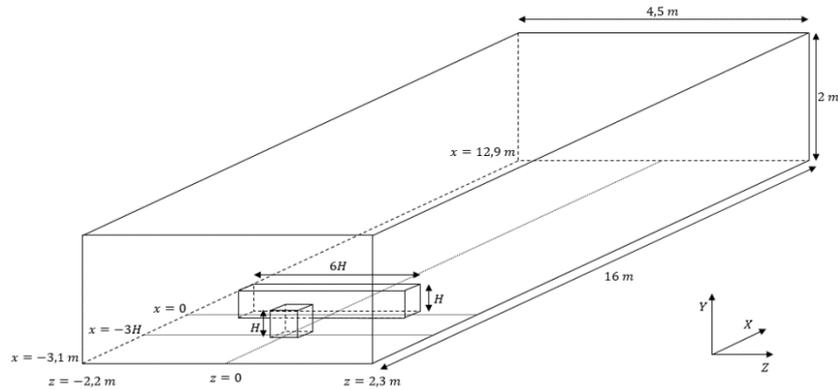


Figure 1 – Domaine de simulation.

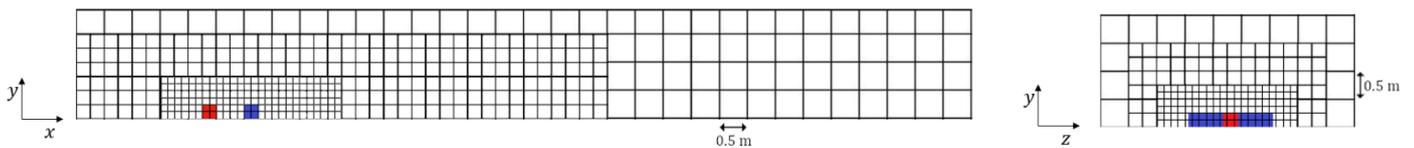


Figure 2 – Division par blocs, plan XY (gauche) et plan XZ (droite), rouge : cube, indigo : cylindre.

### 3. Comparaison des écoulements avec et sans cube

La comparaison entre les deux écoulements a été réalisée par étude spectrale. L'analyse spectrale a plusieurs objectifs : le premier est d'obtenir la fréquence des lâchers tourbillonnaires des deux écoulements, le deuxième est de comparer l'intensité de ces tourbillons et le troisième est de cartographier la turbulence derrière le cylindre dans les deux écoulements afin de connaître les zones optimales pour placer une hydrolienne. Cette étude spectrale a été réalisée à l'aide des densités spectrales de puissance (PSD) des trois composantes des vitesses fluctuantes de l'écoulement (notées  $u'_i$  pour la direction  $i$ , avec  $u'_i = u_i - \bar{u}_i$ , avec  $u_i$  la vitesse instantanée et  $\bar{u}_i$  la moyenne temporelle de la vitesse). Les courbes de PSD représentent l'intensité des fluctuations en fonction de leur fréquence et sont tracées en fonction du nombre de Strouhal :  $S_t = \frac{fH}{U_\infty}$  avec  $f$  la fréquence,  $H$  la hauteur des obstacles et  $U_\infty$  la vitesse initiale. La fréquence d'échantillonnage est de  $48 \text{ Hz}$ . Pour pallier à la nature extrêmement turbulente et chaotique de l'écoulement, chaque courbe est la résultante de cinq PSD de 2 048 échantillons chacune. Cela permet de bien visualiser les fréquences les plus intenses sans pour autant trop linéariser les résultats.

Les points de mesure sont compris entre  $X \in [8H, 28H]$ ,  $Y \in [H, 6H]$  et  $Z \in [-3H, 3H]$ , cette zone a été choisie en fonction de la trajectoire des tourbillons avec et sans cube. Le sillage proche du cylindre n'est pas étudié ici car nous nous intéressons aux lâchers tourbillonnaires et pas à la zone de recirculation.

Dans cette étude, nous nommerons lâchers tourbillonnaires les puissants tourbillons de basses fréquences générés par l'accumulation de la turbulence derrière le cylindre. Les lâchers tourbillonnaires correspondent donc aux basses fréquences ayant les intensités les plus élevées.

La figure 3 représente la PSD des vitesses fluctuantes  $u'_x$  et  $u'_y$  au point centré  $(x, y, z) = (24H, 3H, 0)$  pour les cas avec et sans cube, les lâchers tourbillonnaires n'étant pas visibles pour la vitesse fluctuante  $u'_z$  au centre de l'écoulement. La figure 4 représente la PSD du point excentré  $(x, y, z) = (16H, 3H, 3H)$  pour les vitesses fluctuantes  $u'_x$  et  $u'_z$ . A cette position, les lâchers tourbillonnaires ne sont pas détectés sur la composante  $u'_y$ . Les lâchers tourbillonnaires sont donc visibles sur la totalité de la largeur du cylindre mais selon différentes composantes. Ceci peut s'expliquer par le fait que les tourbillons sont allongés dans la direction latérale au moment de leur formation, puis s'inclinent progressivement au cours du temps sur les côtés pour former des arcs de cercle.

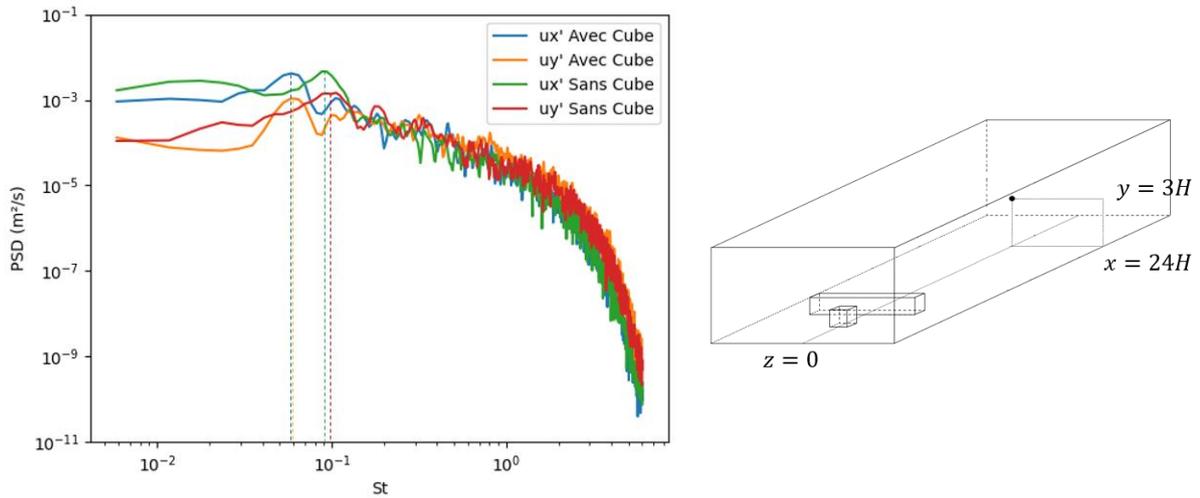


Figure 3 – PSD des vitesses fluctuantes  $u'_x$  et  $u'_y$  au point  $(x, y, z) = (24H, 3H, 0)$ , centre de l'écoulement.

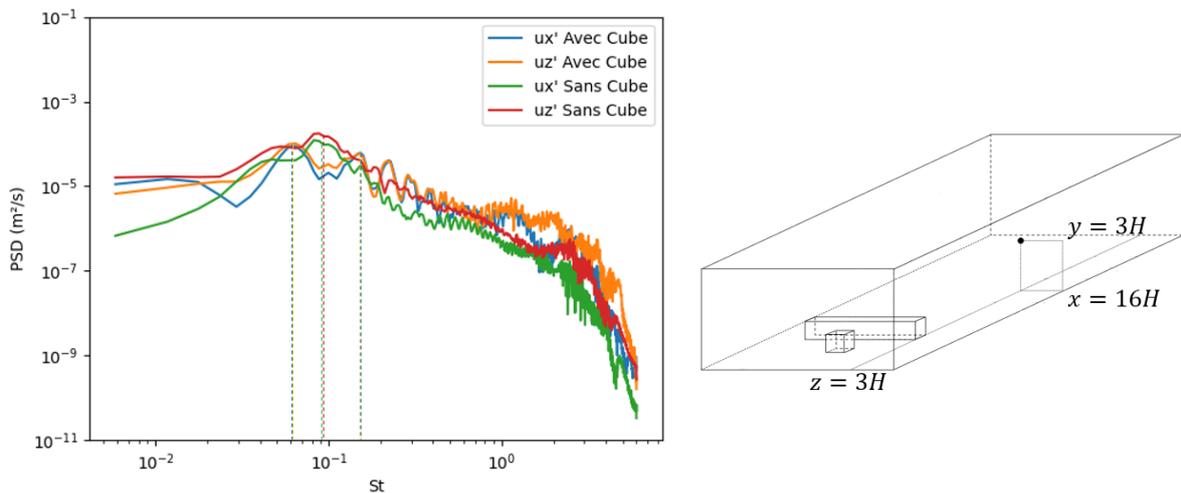


Figure 4 – PSD des vitesses fluctuantes  $u'_x$  et  $u'_z$  au point  $(x, y, z) = (16H, 3H, 3H)$ , bord de l'écoulement.

Les fréquences de lâchers tourbillonnaires des écoulements avec et sans cube ne sont pas les mêmes, pour l'écoulement sans cube, la fréquence correspond à un nombre de Strouhal de 0,09, résultat aussi obtenu en étude expérimentale [3]. En ajoutant le cube en amont du cylindre, la fréquence de lâchers tourbillonnaires diminue avec un nombre de Strouhal de 0,06. Ces intensités sont visibles sur la figure 3 pour les vitesses fluctuantes  $u'_x$  et  $u'_y$  avec et sans cube au point  $(x, y, z) = (24H, 3H, 0)$ . Ce résultat est assez surprenant compte tenu de l'intensité légèrement supérieure des lâchers tourbillonnaires sans le cube. En effet, puisque les tourbillons sont moins puissants avec cube, il était attendu d'avoir une fréquence plus élevée, or ici, les tourbillons sont moins puissants mais aussi moins fréquents.

Cependant, la turbulence n'est pas uniquement comprise dans ces puissants tourbillons. Par exemple, dans l'écoulement avec le cube, des tourbillons avec une intensité non négligeable d'une autre fréquence que les lâchers tourbillonnaires apparaissent sur les côtés. La fréquence de ces tourbillons correspond à un nombre de Strouhal de 0,14 pour les vitesses fluctuantes  $u'_x$  et  $u'_z$ , visible sur la figure 4 au point  $(x, y, z) = (16H, 3H, 3H)$ . Il s'agit donc de tourbillons verticaux qui n'apparaissent qu'avec la présence du cube. L'intensité totale des deux écoulements est assez similaire mais il y a une grande différence sur la distribution de la turbulence : l'écoulement sans cube concentre la quasi-totalité de la turbulence au centre alors qu'avec le cube, la turbulence est beaucoup plus homogène, notamment du fait de la présence de ces tourbillons verticaux. Le tableau 1 présente la différence relative d'intensité par colonne après l'ajout du cube dans l'écoulement. On observe bien de grandes différences d'intensités proche du cylindre au centre et surtout sur les côtés. Cette différence s'atténue en s'éloignant du cylindre.

$z =$ $x =$	$-3H$	$-1.5H$	$0$	$1.5H$	$3H$
$8H$	+ 285.17 %	+ 12.37 %	- 29.11 %	- 6.71 %	+ 147.87 %
$12H$	+ 238.83 %	+ 13.07 %	- 27.60 %	- 6.26 %	+ 137.50 %
$16H$	+ 153.80 %	+ 3.61 %	- 25.09 %	- 11.90 %	+ 80.16 %
$20H$	+ 96.08 %	- 0.65 %	- 17.36 %	- 13.12 %	+ 41.93 %
$24H$	+ 55.47 %	- 6.76 %	- 15.25 %	- 8.75 %	+ 17.78 %
$28H$	+ 33.17 %	- 8.49 %	- 8.35 %	- 4.58 %	+ 8.92 %

Tableau 1 – Écart relatif d'intensité de turbulence par colonne par l'ajout du cube dans l'écoulement

#### 4. Étude des phénomènes générés par le cube

Afin de comprendre l'origine des différences observées dans le sillage du cylindre avec ou sans cube, le sillage est étudié au travers du tenseur de Reynolds ainsi que par visualisation en trois dimensions des tourbillons.

La figure 5 représente la norme du tenseur de Reynolds sur un plan de coupe  $XZ$  à une altitude  $y = 1,5H$ . A cette hauteur, la turbulence générée par le cylindre semble être coupée par le sillage du cube, menant ainsi à une turbulence moyenne au centre du cylindre mais à une turbulence importante sur les côtés. Sans le cube, le phénomène de concentration de turbulence déduit de l'analyse spectrale est clairement visible avec presque aucune turbulence sur les côtés du cylindre. Ceci pourrait expliquer la différence d'intensité et de puissance des lâchers tourbillonnaires des deux écoulements. Le sillage du cube absorberait une partie de la turbulence du cylindre, les tourbillons s'accumuleraient donc plus lentement et une fois le lâcher enclenché, le sillage du cube pourrait de nouveau absorber une partie de la turbulence, expliquant la légère différence d'intensité entre les deux écoulements. Nous pouvons aussi observer cette interaction sur la figure 6 avec une coupe  $XY$  de la norme du tenseur de Reynolds en  $z = 0$ . En effet, une zone assez turbulente, entourée en noir, est visible entre le sillage du cube et du cylindre, il s'agirait de la zone d'interaction où le sillage du cube absorberait une partie de la turbulence du cylindre.

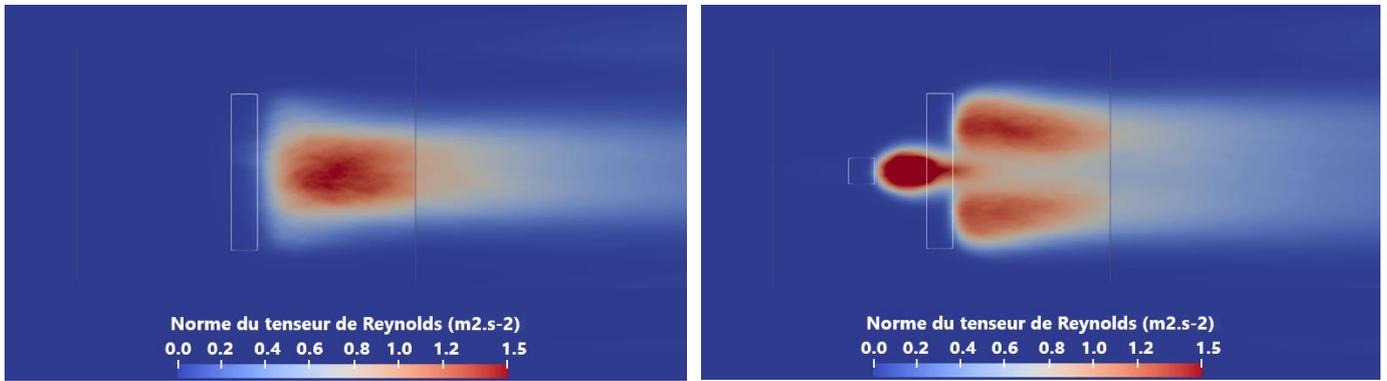


Figure 5 – Norme du tenseur de Reynolds, plan  $XZ$ ,  $y = 1.5H$ , sans (gauche) et avec (droite) cube.

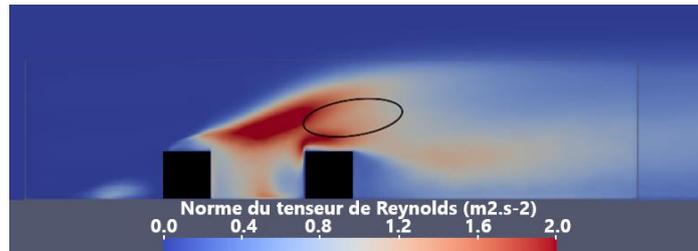


Figure 6 – Norme du tenseur de Reynolds, plan  $XY$ ,  $z = 0$ , avec cube, zone d'interaction entourée en noir.

Les turbulences générées par le cylindre ont généralement tendance à s'accumuler derrière celui-ci pour former les puissants tourbillons des lâchers tourbillonnaires. Ce phénomène a été étudié pour le cas du cylindre seul [9] mais est aussi observable avec le cube. La figure 7 représente l'écoulement instantané avec visualisation des tourbillons en trois dimensions. On observe que le cube lâche lui aussi des structures turbulentes importantes régulièrement, l'une d'entre elles est entourée en blanc sur la figure 7, mais qui se dissipent assez rapidement après avoir dépassé le cylindre. Si le cube absorbe une partie de la turbulence du cylindre, alors ce phénomène doit être d'autant plus visible avec ces structures plus importantes. Le passage de cette puissante structure tourbillonnaire a pour effet d'entraîner la turbulence générée par le cylindre, entourée en noir sur la figure 7, qui se serait normalement accumulée pour former un lâcher tourbillonnaire. Ce phénomène est visible à plusieurs reprises, pratiquement à chaque passage de structures importantes du cube. Nous pouvons en conclure que le sillage du cube n'absorbe pas à proprement parler la turbulence du cylindre mais contribue tout de même au ralentissement de l'accumulation derrière le cylindre par entraînement, comme schématisé figure 8. Le fait que cette turbulence reste dans le sillage du cylindre explique pourquoi la turbulence globale des deux écoulements reste semblable.

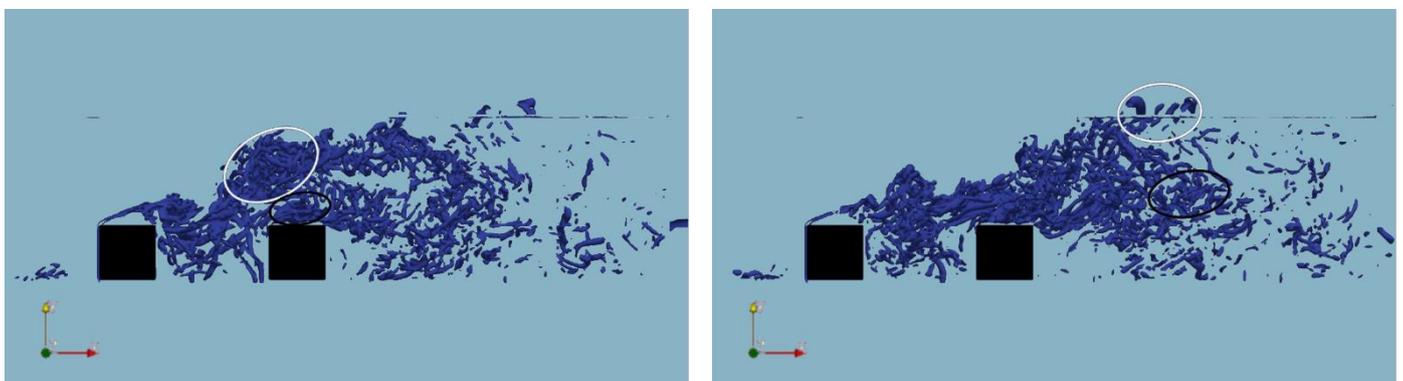


Figure 7 – Écoulement dans le sillage du cube, visualisation  $\lambda_2$ .  
Structure venant du cube entourée en blanc et venant du cylindre entourée en noir.

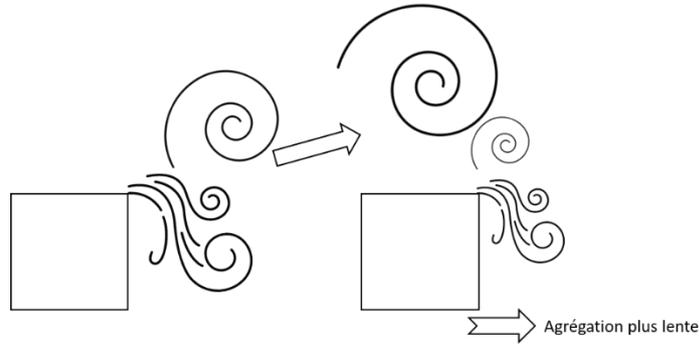


Figure 8 – Schéma représentatif du ralentissement de l'accumulation de turbulence

Ce phénomène pourrait aussi expliquer la différence de répartition de turbulence dans l'écoulement, comme visible sur la figure 5, la turbulence du cylindre est coupée et il semblerait que le cylindre agisse comme deux « demi-cylindres » générant leur propre turbulence indépendamment. Puisque les deux sillages ne fusionnent pas au centre, la turbulence est naturellement plus importante sur les côtés de l'écoulements avec cube que sans cube. Cependant, cela ne justifierait pas l'apparition des tourbillons verticaux à plus hautes fréquences. Pour comprendre ce phénomène, l'écoulement est étudié à des altitudes plus faibles. Les tourbillons en « fer à cheval » du cube arrivent au niveau des bords verticaux du cylindre concentrant ainsi l'écoulement à ce niveau, comme le montre la figure 9. L'interaction entre cet écoulement plus concentré et les parois verticales pourrait générer les tourbillons verticaux, comme schématisé figure 10, renforçant la différence de répartition de turbulence entre les deux écoulements.

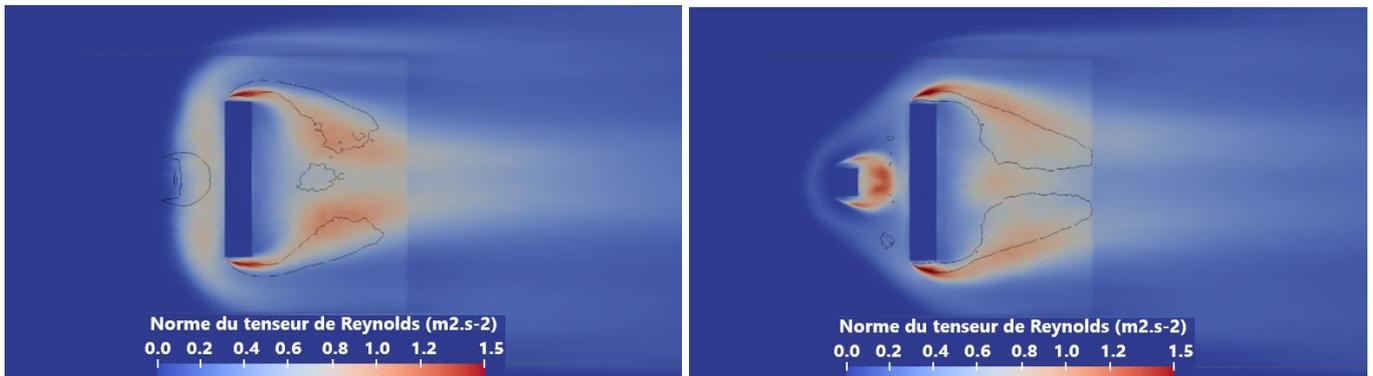


Figure 9 – Norme du tenseur de Reynolds, plan  $XZ$ ,  $y = 0.2H$ , sans (gauche) et avec (droite) cube.

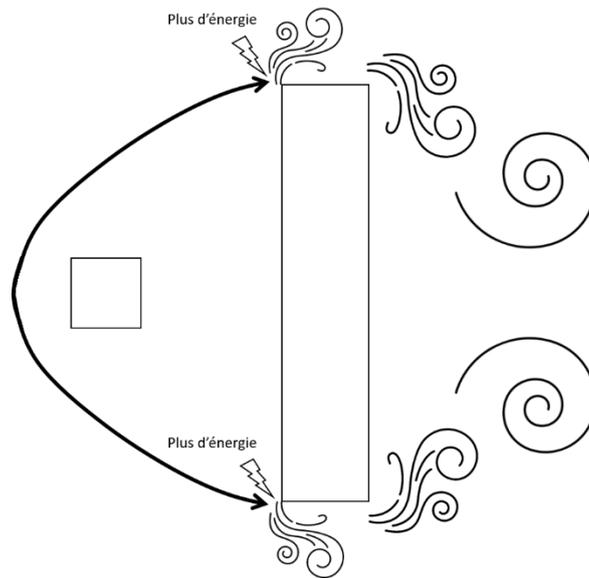


Figure 10 – Schéma représentatif de la génération des tourbillons verticaux

Pour vérifier où et comment sont générés les tourbillons verticaux, on repère l'un de ces tourbillons, suffisamment puissant, puis on remonte le temps jusqu'à son origine. Ainsi, à l'aide du puissant tourbillon entouré en noir sur la figure 11, en remontant petit à petit à son origine sur la figure 12, on remarque qu'il s'agissait d'un tourbillon horizontal qui s'est incliné au cours du temps. Dans les premiers instants, on remarque aussi la présence de turbulence quasiment symétrique par rapport au plan médian. Pour rappel, nous avons observé que les lâchers tourbillonnaires sont à l'origine de forme allongée dans la direction latérale et s'inclinent ensuite sur les côtés. Ce tourbillon vertical ne serait donc qu'un « demi » lâché tourbillonnaire. Il y a donc deux possibilités, la première est que ce tourbillon ne soit pas un tourbillon lâché à une fréquence correspondant à  $S_t = 0,14$  sur les côtés mais simplement à un lâcher tourbillonnaire qui se serait divisé. La deuxième possibilité est qu'il s'agisse bien d'un des tourbillons recherchés, la différence de fréquence avec les lâchers tourbillonnaires viendrait du fait que ce ne sont que des « demi » lâchers, cette hypothèse est schématisée figure 13. Comme vu précédemment, le sillage du cube a une influence sur la turbulence au centre du cylindre, mais pas sur les côtés, ainsi la turbulence s'accumule plus vite sur les côtés et les côtés auraient donc besoin d'évacuer la turbulence plus régulièrement, comme s'il n'y avait pas du cube. La fréquence des « demi » lâchers n'est pas la même que le cylindre isolé car la longueur des « demi » cylindres est plus faible que celle du cylindre isolé et ne peuvent donc pas accumuler autant de turbulence. Cette hypothèse semble cohérente mais elle ne prend pas en compte la différence de comportement des écoulements au niveau des bords verticaux du cylindre. L'observation pourrait très bien être une combinaison des deux phénomènes, ou bien la turbulence générée par les bords verticaux n'ont aucun rapport avec les tourbillons verticaux mais ne participent qu'à la distribution plus homogène de turbulence. Le sillage proche du cylindre étant extrêmement turbulent avec beaucoup de recirculation, il est difficile de trancher entre les deux possibilités car même avec la visualisation  $\lambda_2$ , cette zone n'est pas très lisible.

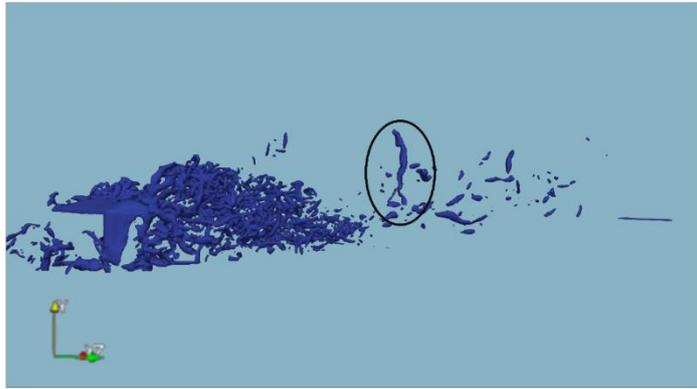


Figure 11 – Tourbillon vertical puissant, visualisation  $\lambda_2$ .

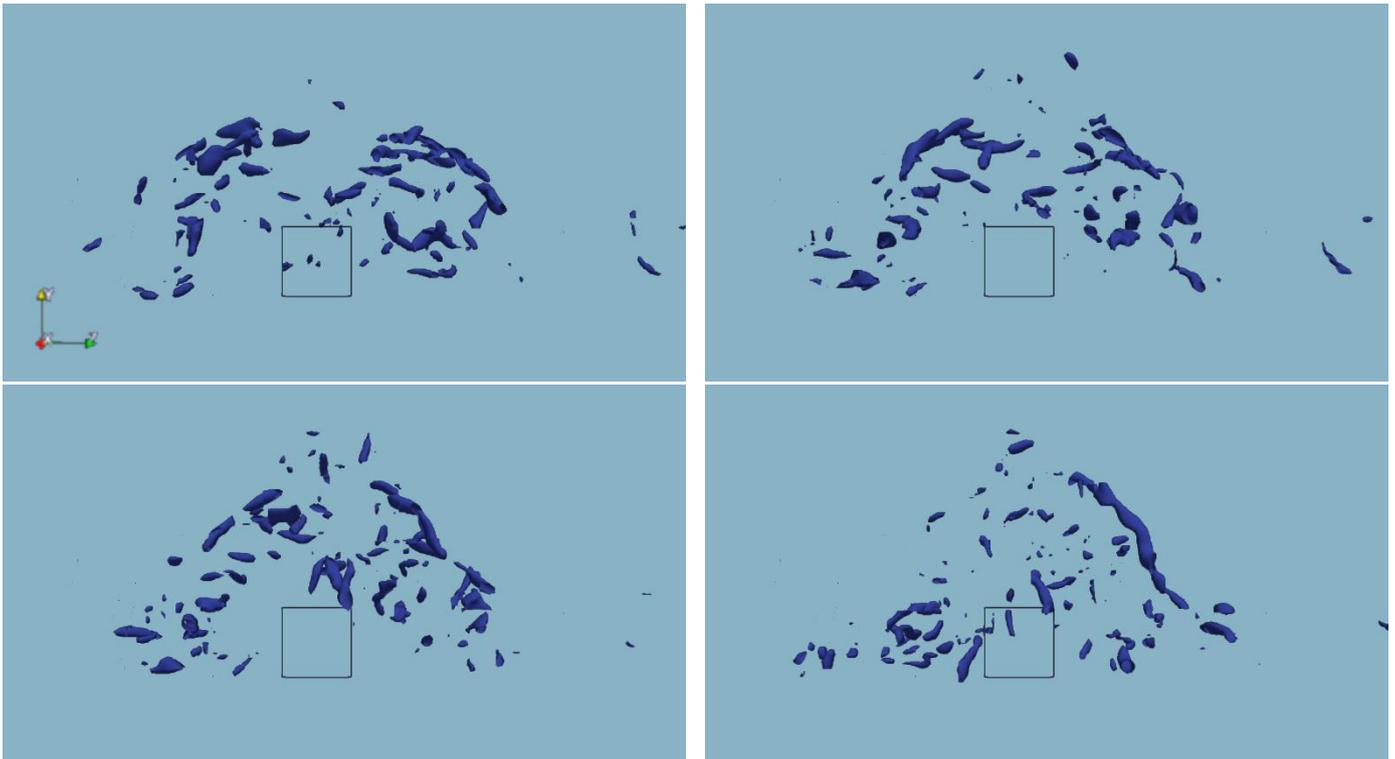


Figure 12 – Génération d'un tourbillon vertical, visualisation  $\lambda_2$ , 100 itérations entre chaque image, lecture de gauche à droite, de haut en bas. (Vue de face, plan YZ)

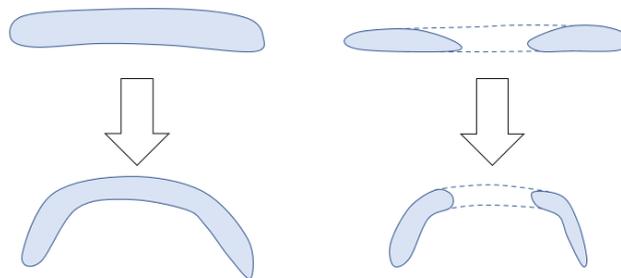


Figure 13 – Évolution au cours du temps des lâchers tourbillonnaires (gauche) et des « demi » lâchers tourbillonnaires

## 5. Conclusion

Le but de cette étude numérique était de mieux comprendre l'écoulement généré par des macro-rugosités du fond marin afin de prévoir l'impact qu'il pourrait avoir sur des hydroliennes, plus particulièrement, d'étudier l'écoulement autour d'un cylindre à base carré précédé par un cube et de le comparer à celui autour d'un cylindre seul. Cette étude a été choisie suite aux études expérimentales qui ont montré une grande différence de comportement entre les deux écoulements.

Cette étude a été réalisée par simulation en utilisant la méthode de Boltzmann sur réseau. La majeure partie de cette étude réside dans l'analyse spectrale de l'écoulement avec et sans cube. Cette étude spectrale a permis de mettre en lumière certaines différences entre les écoulements comme la différence de fréquence des lâchers tourbillonnaires ou encore les tourbillons verticaux décentrés. Une fois ces phénomènes observés, l'écoulement avec cube a pu être étudié plus en détails pour essayer de comprendre comment le cube perturbe l'accumulation de turbulence derrière le cylindre. L'hypothèse la plus poussée pour expliquer la différence entre les écoulements est que le sillage du cube entraîne une partie de la turbulence générée par le centre du cylindre au lieu de la laisser s'accumuler. Ceci explique la différence d'intensité et de fréquence entre les lâchers tourbillonnaires. De plus, les bords du cylindre n'étant pas impactés par le sillage du cube émettent des tourbillons plus régulièrement qui ont tendance à s'incliner au cours du temps jusqu'à devenir quasiment verticaux. Pour s'assurer de la validité de cette hypothèse, l'écoulement autour d'un cylindre de rapport d'aspect de 2 ou 2,5 pourrait être étudié pour vérifier si la fréquence de lâchers tourbillonnaires correspond à la fréquence des tourbillons verticaux, si ce n'est pas le cas, alors il faudrait reconsidérer la différence entre la turbulence générée par les bords verticaux du cylindre entre les deux écoulements.

### Remerciements :

Ces travaux ont été financés par le projet Tidal Stream Industry Energiser (TIGER), co-financé par les Fonds européens de développement régional via le programme Interreg France (Manche) Angleterre.

### Références

- [1] A. Sentchev, M. Thiébaud, and F. Schmitt, "Impact of turbulence on power production by a free-stream tidal turbine in real sea conditions." *Renewable Energy*, vol. 147, pp. 1932–1940, 2020.
- [2] B. Gaurier, P. Druault, M. Ikhennicheu, and G. Germain, "Experimental analysis of the shear flow effect on tidal turbine blade root force from three-dimensional mean flow reconstruction." *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 378, no. 20200001, 2020.
- [3] M. Ikhennicheu. "Étude expérimentale de la turbulence dans les zones à forts courants et de son impact sur les hydroliennes." *Université de Lille*, 194, 2019.
- [4] M. Ikhennicheu, G. Germain, P. Druault, B. Gaurier. "Experimental study of coherent flow structures past a wall-mounted square cylinder." *Ocean Engineering*, vol. 182, 137-146, 2019.
- [5] M. Ikhennicheu, P. Druault, B. Gaurier, G. Germain. "Turbulent kinetic energy budget in a wall-mounted cylinder wake using PIV measurements." *Ocean Engineering*, vol. 210, 107582, 2020.
- [6] M. Ikhennicheu, G. Germain, P. Druault, B. Gaurier. "Experimental investigation of the turbulent wake past real seabed elements for velocity variations characterization in the water column." *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 78, 108426, 2019.
- [7] M. Magnier, P. Druault, G. Germain. "Experimental investigation of upstream cube effects on the wake of a wall-mounted cylinder : Wake rising reduction, TKE budget and flow organization." *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, vol. 87, 92-102, 2021.
- [8] P. Mercier. "Modélisation de la turbulence engendrée par la morphologie du fond dans le Raz Blanchard : approche locale avec LBM-LES." *Université de Caen*, 173, 2019.

- [9] P. Mercier, M. Ikhennicheu, S. Guillou, G. Germain, E. Poizot, M. Grondeau, J. Thiébot and P. Druault. “The merging of Kelvin-Helmholtz vortices into large coherent flow structures in a high Reynolds number flow past a wall-mounted square cylinder.” *Ocean Engineering*, 204, 107-274, 2020b.
- [10] J. Latt, O. Malaspinas, D. Kontaxakis, A. Parmigiani, D. Lagrava, F. Brogi, M. B. Belgacem, Y. Thorimbert, S. Leclaire, S. Li, F. Marson, J. Lemus, C. Kotsalos, R. Conradin, C. Coreixas, R. Petkantchin, F. Raynaud, J. Beny, B. Chopard. “Palabos : Parallel Lattice Boltzmann Solver.” *Computers & Mathematics with Application*, 81 334-350, 2021.
- [11] P. Sagaut. “Large eddy simulation for incompressible flows. Scientific Computation” *Springer, Berlin*, 574, 2006.
- [12] P. Bhatnagar, E. Gross, and M. Krook, “A model for collision processes in gases.” *Physical Review*, vol. 94, no. 3, 1954.
- [13] Y. Qian, D. D’Humières, and P. Lallemand, “Lattice bgk models for navier-stokes equation.” *Europhysics Letters*, vol. 17, pp. 479–484, 1992.
- [14] J. Smagorinsky, “General circulation experiments with the primitive equations.” *Monthly Weather Review*, vol. 91, no. 3, pp. 99–164, 1963.
- [15] O. Malaspinas and P. Sagaut, “Consistent subgrid scale modelling for lattice boltzmann methods.” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 700, pp. 514–542, 2012.
- [16] M. Bouzidi, M. Firdaouss, and P. Lallemand, “Momentum transfer of a boltzmann-lattice fluid with boundaries,” *Physics of Fluids*, vol. 13, no. 3452, 2001.