



12^{èmes} Journées de l'Hydrodynamique
Nantes , 17-19 novembre 2010

**VERS UNE CARACTERISATION REALISTE DES
CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DES
HYDROLIENNES**

***TOWARDS A REALISTIC CHARACTERISATION OF THE
OPERATIONAL CONDITIONS OF MARINE CURRENT
TURBINES***

**G. GERMAIN^{1,3}, F. MAGANÇÁ¹, B. GAURIER^{1,3}, J.V. FACQ¹, T. BACCHETTI¹,
G. PINON², E. RIVOALEN⁴, J.M. ETANCELIN⁴**

1 IFREMER, Hydrodynamic & Metocean Service, 150 Quai Gambetta, BP 699, 62321 Boulogne-sur-Mer

2 LOMC, FRE 3102 CNRS - Université du Havre, 53 rue Prony, 76058 Le Havre

3 Université Lille Nord de France, 59000 Lille

4 Laboratoire de Mécanique de Rouen, Avenue de l'Université, BP 08, 76801 St Etienne du Rouvray

gregory.germain@ifremer.fr

Résumé

Cet article présente les résultats d'une étude expérimentale visant à déterminer les effets du taux de turbulence de l'écoulement ambiant (de 5 à 25%) sur le fonctionnement d'une hydrolienne et sur le sillage généré. Le prototype utilisé est une turbine tri-pales à axe horizontal de 0,7 m de diamètre. Des cartes de vitesses moyennes et de taux de turbulence ont été obtenues à partir de mesures par vélocimétrie laser. L'analyse des sillages proche et lointain a été effectuée : le sillage proche est caractérisé par un fort gradient de cisaillement et une intensité de turbulence élevée, alors que le sillage lointain est caractérisé par son expansion. Une réduction du sillage d'un facteur 3 cumulée à d'importantes fluctuations d'efforts ont également pu être observées pour les taux de turbulence les plus élevés. Les effets combinés de la houle et du courant sont également étudiés et les avancées des développements numériques pour simuler le comportement de ce type de machine sont présentés.

Summary

This paper presents experimental results of tests carried out in order to investigate the hydrodynamics of marine current turbines and to build an experimental database used to validate the numerical developments conducted to characterize the flow perturbations induced by marine current turbines. For that purpose, we used a tri-bladed horizontal axis turbine. Particular attention is paid to the flow characteristic effects (velocity gradient, flow orientation, flow turbulence intensity level) on the performance of a 0.70 m diameter turbine. The main interest is to study how the far wake decays downstream, in order to estimate the effect produced in downstream turbines. Analyses are made from Laser Doppler Velocimeter measurements (velocity and turbulence intensity maps). Combined effects of waves and current are also studied and the developments of the numerical work carried out to simulate the behaviour of this kind of structure are presented.

L-INTRODUCTION

Un nombre croissant de pays cherchent à augmenter la part de leur production d'énergie issue des énergies renouvelables. L'exploitation des courants marins en est un des moyens, cette ressource d'énergie marine étant particulièrement élevée en Europe, et notamment en France et dans les DOM/ROM. Cependant, les technologies nécessaires pour valoriser ce potentiel ne sont pas matures. Elles ont besoin d'être accompagnées pour réellement émerger et leurs impacts environnementaux sont relativement peu connus malgré de récentes avancées. De nombreux concepts de système de récupération de l'énergie des courants marins sont actuellement en cours de développement et d'expérimentation [2]. Le comportement et le rendement de ce type de machines sont aujourd'hui encore déterminés pour des conditions bien spécifiques de fonctionnement, *i.e.* en présence d'un écoulement incident idéalisé (uniforme et stationnaire). Certains travaux visent à étendre ces études à des conditions de fonctionnement moins spécifiques : interaction avec la surface libre, profil de vitesse vertical [9], [10]. Malgré cela, de nombreuses questions restent aujourd'hui en suspens [11]. Nous proposons ici d'apporter des éléments de réponses pour deux d'entre elles :

a/ quel est l'effet du taux de turbulence ambiant sur le fonctionnement d'une hydrolienne et sur les caractéristiques de son sillage ?

b/ quel est l'effet de la houle sur le fonctionnement d'une hydrolienne ?

Les résultats présentés sont issus des essais expérimentaux réalisés dans la veine hydrodynamique à surface libre de l'Ifremer, dont on peut faire varier le taux de turbulence de l'écoulement (typiquement entre 5 et 25%). La maquette utilisée est une turbine tri-pales à axe horizontal de diamètre $D=0,7$ m (échelle 1/30), [3]. Des considérations sur le rendement sont effectuées, mais l'essentiel des résultats permet de quantifier l'influence du taux de turbulence de l'écoulement amont sur les caractéristiques du sillage généré par la turbine. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un système de vélocimétrie laser Doppler 2D en un nombre conséquent de profils. Ainsi, les effets du taux de turbulence de l'écoulement ambiant sur les caractéristiques du sillage sont analysés à partir des cartes de vitesses moyennes et de taux de turbulence.

Les hydroliennes étant des systèmes devant être déployés dans des fonds relativement faibles, les conditions de mer rencontrées auront des effets non négligeables sur leur fonctionnement. Afin d'étudier les effets d'interaction combinés houle/courant/structure, nous présentons également dans ce papier les développements réalisés dans ce cadre (génération de houle et de courant) et les premiers résultats obtenus. L'état d'avancement des travaux numériques entrepris pour simuler le comportement de ce type de machine fait l'objet ici d'un point rapide.

II - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

La partie expérimentale de ce travail a été effectuée au bassin à houle et courant de l'Ifremer, Boulogne/Mer (Figure 1). Dans cette installation, le taux de turbulence de l'écoulement peut être adapté par l'introduction de grilles perforées en amont de la section d'essais. Les valeurs de taux de turbulence considérées pour cette étude sont : 5, 8 et 25%, ce qui correspond à des niveaux pouvant être rencontrés dans des zones à plus ou moins forts courants [4], [8]. Le taux de turbulence est déterminé de la manière suivante :

$$TI = 100 \times \frac{\sqrt{(u')^2 + (v')^2 + (w')^2}}{\sqrt{\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}}},$$

u , v et w correspondant aux composantes de vitesses selon les trois directions principales, avec : $u = \overline{u} + u'$.

La maquette utilisée est une turbine tri-pales à axe horizontal de 0,7 m de diamètre (échelle 1/30), [3]. La veine présentant une section d'essais de 4 m de large, 2 m de haut sur

une longueur utile de 18 m, le blocage de la section engendré par la structure est de 5%. La vitesse de l'écoulement incident est fixée pour cette étude à 0,8 m/s (sauf pour les cas houle/courant) et le TSR (Tip Speed Ratio, vitesse de rotation en bout de pale divisée par la vitesse de l'écoulement incident) à 6. Considérant le diamètre de la turbine comme longueur caractéristique du système, le nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement est donc relativement élevé : $Re=5,6 \times 10^6$.

Dans le but de quantifier l'influence du taux de turbulence sur les caractéristiques du sillage généré par la turbine, un nombre conséquent de profils de vitesses est effectué à l'aide d'un système de vélocimétrie laser Doppler 2D (l'écoulement étantensemencé à l'aide de micro-billes de verre argentées de 10 microns). Les profils ont été effectués tous les diamètres jusqu'à une distance de 10D, chacun d'entre eux étant constitué de 25 points de mesures.

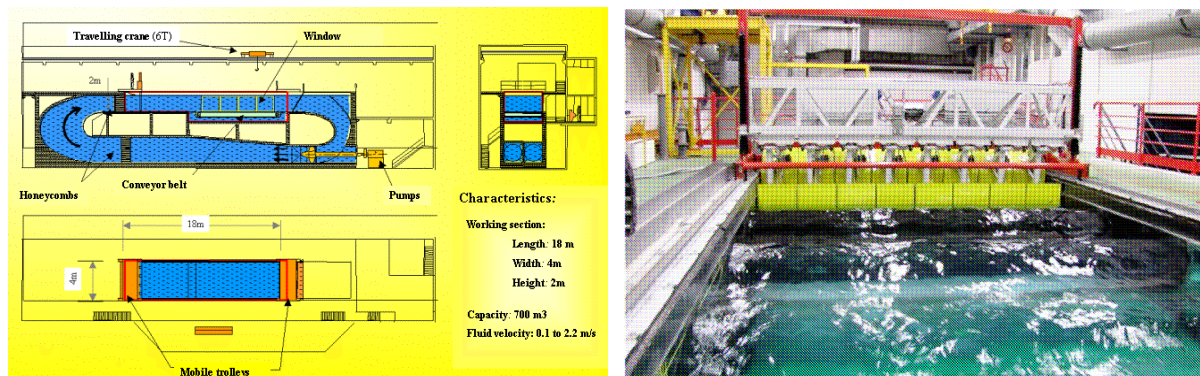


Figure 1. Caractéristiques du bassin à houle et courant de l'Ifremer

Les hydroliennes étant des systèmes devant être déployés dans des fonds relativement faibles (de 30 à 60 m), les conditions de mer rencontrées auront des effets non négligeables sur leur fonctionnement. Afin d'étudier les effets d'interaction combinés houle/courant/structure, les fonctionnalités du bassin d'essais de Boulogne/Mer ont été étendues par la mise en place d'un générateur de houle. Cet équipement permet de produire des houles régulières ou irrégulières avec une amplitude de vague maximale de 30 cm crête à creux et des périodes allant de 0,5 à 2 s. Les vagues peuvent être générées dans le sens du courant ou dans la direction opposée, la conception du matériel permettant un déploiement multidirectionnel.

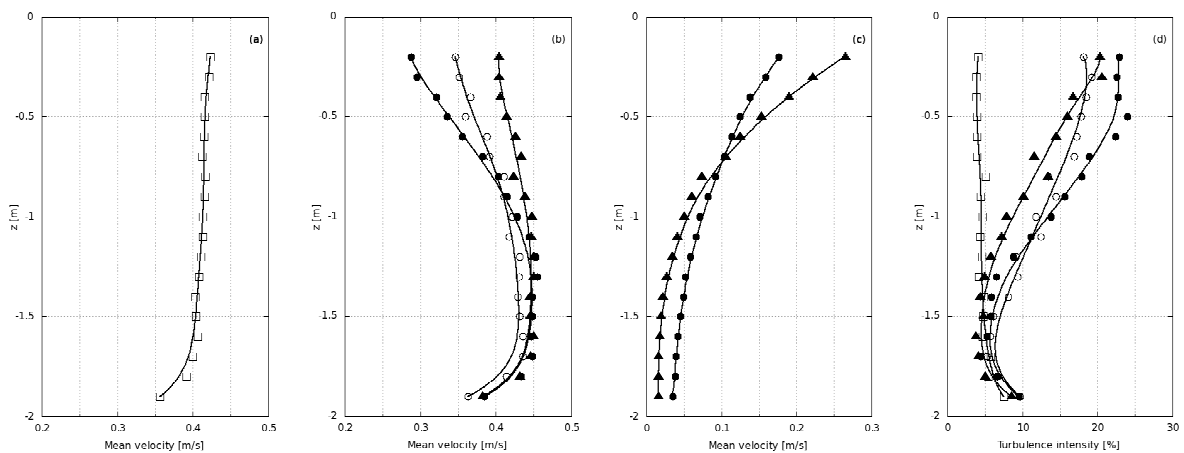


Figure 2. Profils de vitesses moyennes pour un écoulement de 0,4 m/s : a/ écoulement non perturbé, b/ en présence d'une houle de 150 mm de hauteur à une fréquence de 0,6 Hz dans la direction du courant (●) et contre le courant (○), les variations des vitesses orbitales de houle correspondantes étant représentées en ▲. d/ : évolution du taux de turbulence en présence ou non de houle.

Dans cette étude, nous considèrerons uniquement une houle de 150 mm de hauteur, avec une fréquence de 0,6 Hz, en présence ou non d'un courant de 0,4 m/s dans la direction de la houle ou en opposition. Nous avons représenté sur la Figure 2 le profil moyen de vitesses pour un écoulement non perturbé (a/) et en présence d'une houle contre le courant ou dans le sens de propagation du courant (b/). Les variations de vitesses orbitales correspondantes sont données en c/. A noter l'augmentation des vitesses moyennes et orbitales pour les houles opposées au courant. Les évolutions du taux de turbulence sur la colonne d'eau sont données en d/. Le taux de turbulence moyen de l'écoulement de référence (\square) est de l'ordre de 5% sur l'ensemble du profil, alors qu'il évolue sensiblement (sauf sur le dernier quart de la colonne d'eau) en présence du générateur de houle et de la plage d'amortissement (jusqu'à 20% près de la surface). Un écart du taux de turbulence de l'ordre de 5 à 10% est perceptible suivant que l'on génère la houle dans le sens de propagation du courant ou à l'opposé.

III - MODELE NUMERIQUE

Les études expérimentales sont aujourd'hui encore nécessaires de manière à comprendre les phénomènes physiques mis en jeu dans un milieu maîtrisé, mais également pour constituer une base de données permettant de valider les outils de simulations numériques. Ces outils sont développés de manière à simuler le comportement des hydroliennes dans des configurations impossible à reproduire expérimentalement (champ d'hydroliennes) mais également pour évaluer leur impact (interaction avec le sédiment, modification de la courantologie locale) à grande échelle [16], [19] [21].

Pour ce faire, nous développons un code numérique tridimensionnel, basé sur les méthodes particulières et les méthodes intégrales pour simuler le comportement d'hydroliennes à axe horizontal, en prenant en compte l'évolution instationnaire du sillage. Ainsi, l'écoulement tourbillonnaire est discrétisé à l'aide de particules porteuse de vorticités, suivies dans leur déplacement dans le temps de façon Lagrangienne. Les particules sont émises au bord de fuite des pales de la turbine à l'aide d'une méthode de calcul de doublets satisfaisant la condition de Kutta-Jukovski pour l'émission. Le principal avantage de cette méthode est que seules les parois solides sont maillées et que l'on calcule uniquement les parties du domaine où la vorticités est non nulle. Les détails des outils numériques utilisés ont été présentés dans [5] et [7]. La nacelle composant l'hydrolienne n'est pas prise en compte ici. Seuls les pales et le hub sont maillés, les pales étant considérés comme des profils minces (Figure 3).

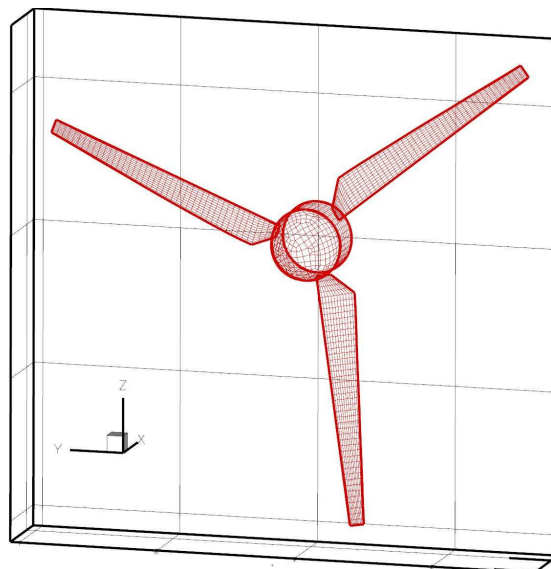


Figure 3. Maillage des pales et du hub, la géométrie du hub étant volontairement simplifiée.

L'étude de l'influence des paramètres de la simulation (pas de temps, distance interparticulaire, paramètre de régularisation...) et des constantes du modèle de turbulence utilisé (diffusion turbulente par la simulation des grandes échelles) est en cours. Néanmoins, sur la Figure 4 sont présentés des premiers résultats où l'on observe les caractéristiques générales de l'écoulement. Les profils de vitesse axiale et azimutale pour $TSR = 6$ montrent que le déficit de vitesse évolue fortement en fonction de la position dans le sillage. Les travaux futurs se focaliseront sur la détermination des paramètres optimaux en vue d'une meilleure simulation du sillage réel, notamment sur la prise en compte du taux de turbulence initial (5, 8 et 25%) et à terme d'un champ de houle.

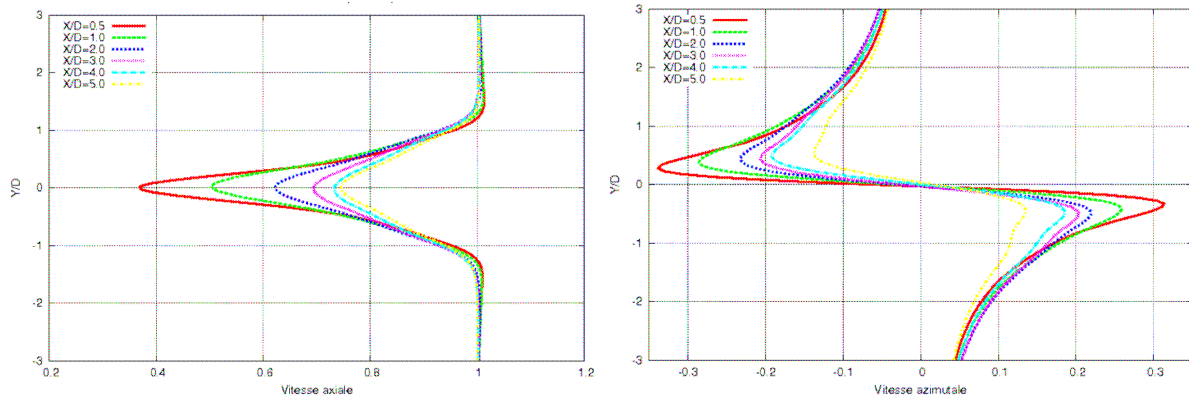


Figure 4. Profils de vitesses axiales (à droite) et azimutales (à gauche) en fonction de X/D pour $TSR = 6$

IV - RESULTATS

Le sillage d'une turbine comporte deux parties aux caractéristiques et effets distincts : le sillage proche et le sillage lointain. Le premier est caractéristique des performances de la machine et du processus de captage d'énergie, alors que la quantification du sillage lointain est primordiale pour optimiser le positionnement d'hydroliennes placées à proximité les unes des autres, les turbines positionnées en aval étant soumises à un écoulement plus perturbé (plus faible et plus turbulent, [12]).

De manière à quantifier l'influence du taux de turbulence de l'écoulement incident sur le comportement d'une hydrolienne, nous avons effectué des mesures de sillage pour trois taux de turbulence : 5, 8 et 25%. Les champs de vitesses correspondant sont présentés sur la Figure 5 (issus de mesures LDV dans le plan horizontal suivant l'axe principal de la turbine). Ces champs permettent de caractériser l'expansion et le déficit de vitesse dans le sillage de la turbine pour chaque taux de turbulence de l'écoulement amont. Le retour à une vitesse correspondant à 80% de la vitesse incidente s'effectue trois fois plus rapidement pour un taux de turbulence de 25% que pour un taux de turbulence de 8% (alors que cette valeur n'est toujours pas retrouvée à une distance de 10 D pour un taux de turbulence de 5%). Les effets de sillage sont négligeables après seulement 5 D dans le cas où $TI=25\%$ alors qu'ils restent conséquents dans les deux autres cas. L'extension transverse du sillage est quant à elle d'autant plus large que le taux de turbulence de l'écoulement incident est élevé. Ces résultats sont en accord avec les considérations généralement effectuées dans le cas d'une sphère, d'un cylindre [1] ou d'une éolienne [14]. Ces résultats montrent la similarité entre le sillage issu d'une hydrolienne et celui issu d'une éolienne [15].

Une comparaison directe n'est cependant pas réaliste à cause de la forte dépendance du développement du sillage avec le coefficient de poussée de la turbine et le taux de turbulence de l'écoulement incident. Cette dépendance est clairement mise en évidence Figure 5, où l'évolution du taux de turbulence dans le sillage de la turbine est donnée pour des taux de turbulence de l'écoulement amont de 5, 8 et 25% à un $TSR = 6$. Dans le sillage proche, un taux de turbulence de plus de 35% est observé dans la zone d'émission tourbillonnaire en bout de pales. Cette zone est perceptible à plus de 4, 3 et 2D pour des taux de turbulence de l'écoulement amont de 25, 8 et 5 %, alors qu'un taux de turbulence de l'ordre de 20 % est rencontré jusqu'à plus de 9 D, sur une largeur d'environ 1,5 D pour un taux de turbulence de

l'écoulement amont de 5 et 8 %. Quelque soit le taux de turbulence ambiant considéré, l'intensité de turbulence dans le sillage recouvre moins vite l'écoulement initial que la vitesse dans le sillage. L'analyse des performances de la machine [6] montre que ce type de perturbations peut avoir des conséquences non négligeables sur le fonctionnement d'hydroliennes pouvant se trouver dans le sillage d'une machine positionnée en amont, essentiellement au niveau des fluctuations d'efforts et de rendements, qui est de l'ordre de 20 % pour un taux de turbulence de l'écoulement amont de 25 %.

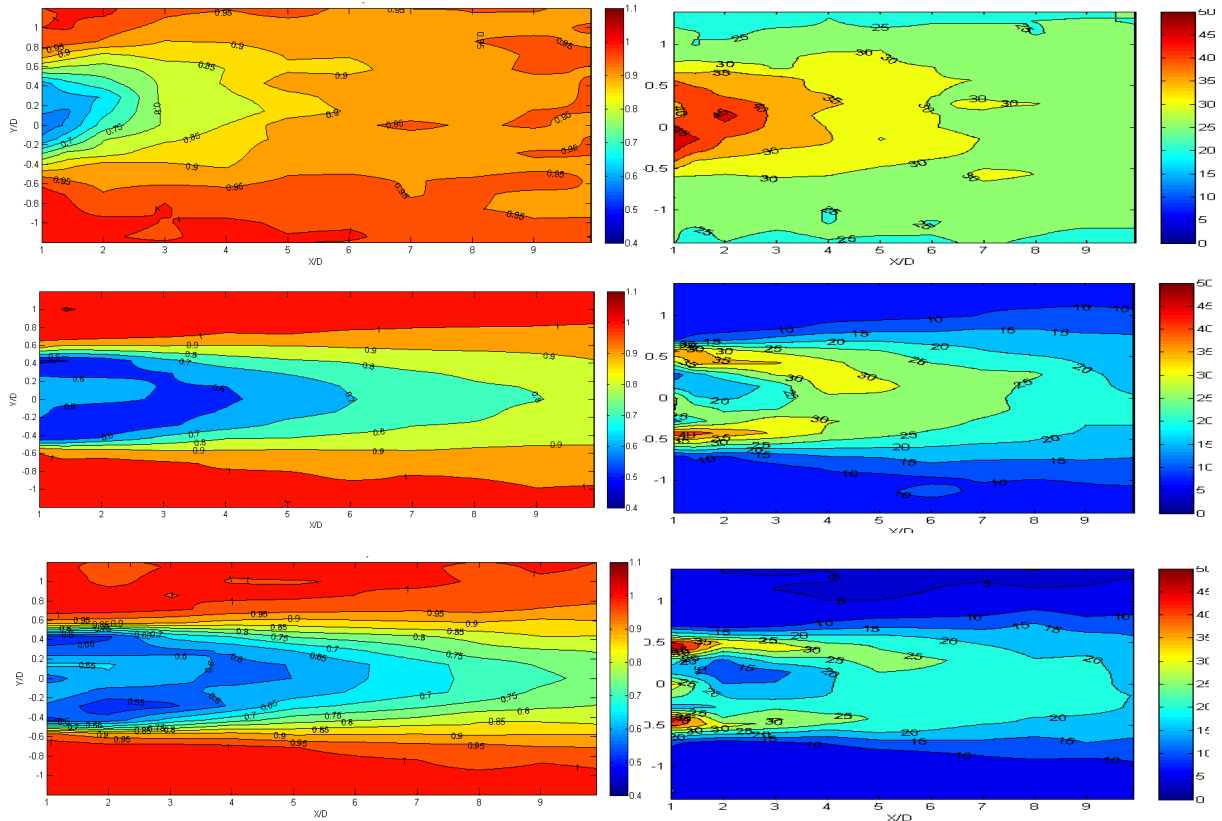


Figure 5. Evolution du déficit de vitesses moyennes (à droite) et du taux de turbulence (à gauche) dans le sillage de la turbine pour trois taux de turbulence : respectivement 25, 8 et 5 % de haut en bas, à TSR=6.

Compte-tenu des contraintes d'encombrement, les effets d'interaction entre 2 (voir 3) turbines pourront être étudiés expérimentalement uniquement pour quelques configurations particulières. Une étude globale ne pourra donc être réalisée que numériquement. Pour cela, nous devons disposer d'un code numérique validé sur des configurations simples.

La comparaison des sillages obtenus numériquement et expérimentalement peut être effectuée à partir de la Figure 6, où les profils numériques à $X/D = 1, 2, 3, 4, 5$ et 9 sont comparés à l'ensemble des profils expérimentaux, pour $TI = 5, 8$ et 25 %. Le sillage proche ($0 < X/D < 3$) obtenu numériquement est en bon accord avec les résultats expérimentaux, qui sont relativement peu dépendant du taux de turbulence ambiant. Pour $X/D > 3$, les écarts entre résultats numériques et résultats expérimentaux s'accroissent du fait d'une mauvaise prise en compte du taux de turbulence dans le modèle numérique.

Ces différences sont très nettement marquées sur la Figure 7, où les évolutions du déficit de vitesse à $TSR = 6$ sont présentées. Les paramètres actuellement employés pour la modélisation numérique conduisent à la génération d'un sillage similaire à celui rencontrée dans le cas d'un écoulement possédant un fort taux de turbulence (25 %). La forte dissipation du sillage (déficit de vitesse négligeable à partir de $4,5 D$) n'est pas tout à fait reproduite, mais l'écart avec les valeurs cibles (déficits de vitesse obtenus avec un écoulement présentant un faible taux de turbulence) est conséquent. La conservation d'un sillage marqué jusqu'à $10 D$ en aval de la turbine n'est, à ce stade, pas obtenue.

Les efforts s'appliquant sur la structure et les déformations des pales ont été également mesurés pour plusieurs vitesses de rotations de la turbine et plusieurs cas de chargement

(houles régulières). Seuls les résultats obtenus pour une houle de 75 mm d'amplitude et 0,6 Hz de fréquence en présence d'un courant de 0,4 m/s se propageant dans le même sens et dans le sens opposé sont présentés ici. La moyenne et les fluctuations des efforts de traînée sont données Figure 8, pour des TSR variant entre 0 et 7,5.

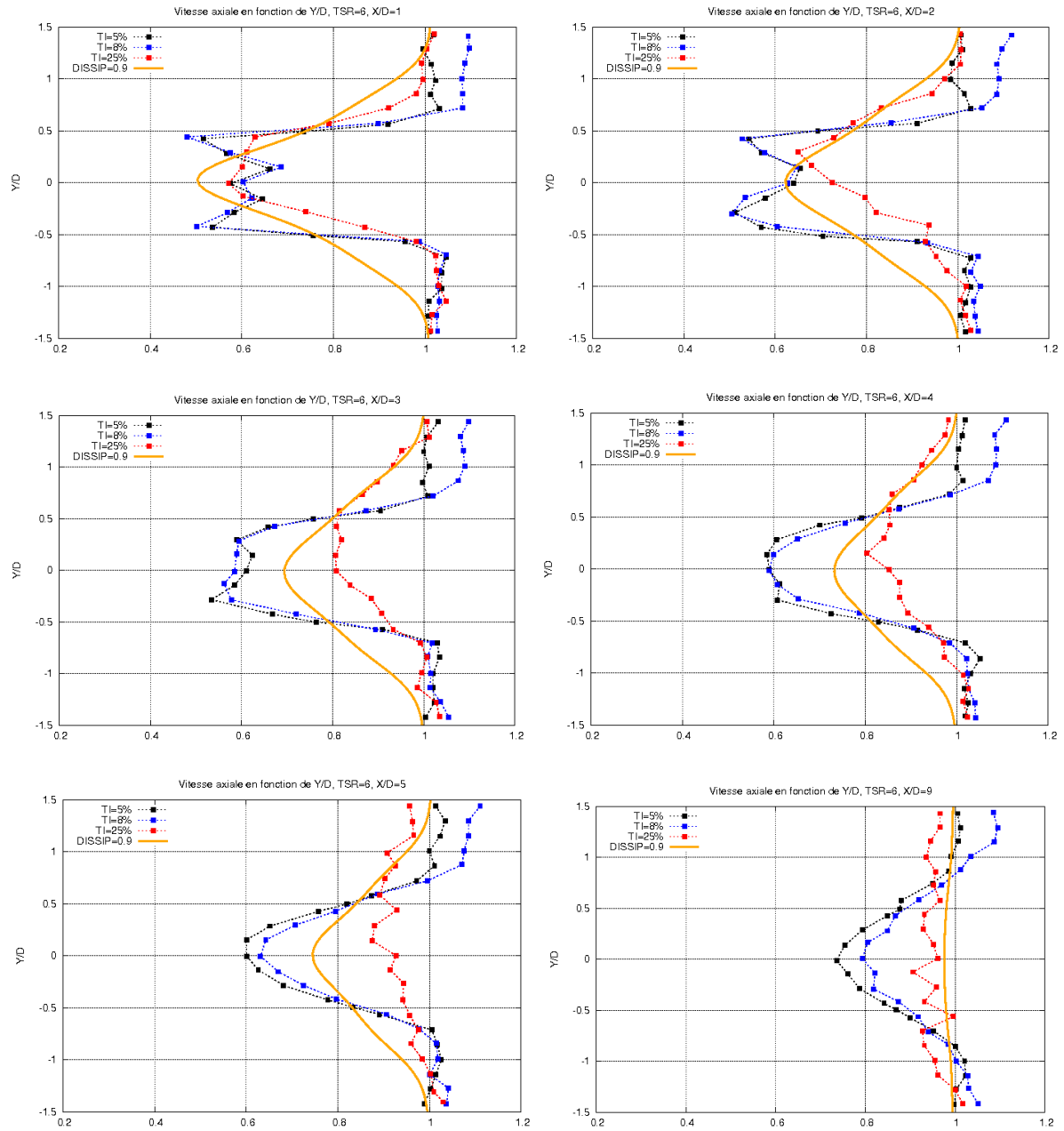


Figure 6. Comparaison des profils de vitesses numériques et expérimentales à TSR 6 entre X=1D et X=9D.

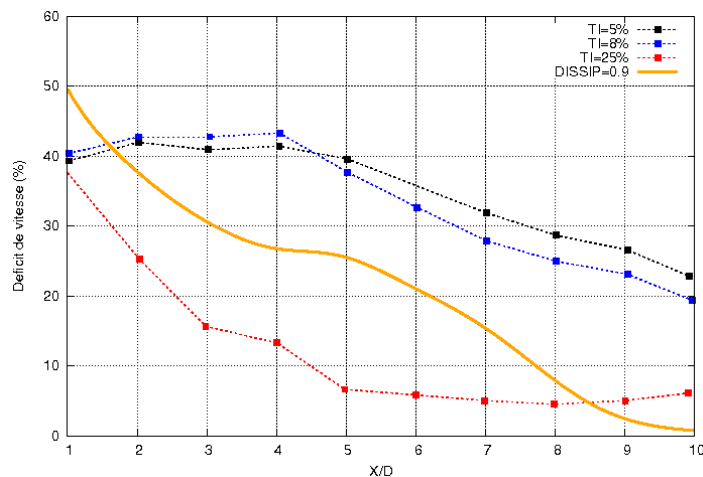


Figure 7. Evolution du déficit de vitesse à TSR 6 (calculé sur le diamètre de la turbine).

Ces résultats montrent que la turbine répond de manière identique (efforts moyens de traînée équivalents) dans le cas d'une houle avec courant et dans le cas d'une houle contre le courant, sur l'ensemble des TSR testés, pour atteindre un maximum à $TSR = 7,5$ (point de fonctionnement de la machine à 0,4 m/s). Cependant, l'amplitude des fluctuations des efforts de traînée n'augmente pas dans les mêmes proportions avec la vitesse de rotation de la turbine dans les deux cas. Les fluctuations d'efforts sont de l'ordre de 50 % pour la houle dans le sens opposée au courant, alors qu'elles atteignent 80 % pour une houle dans le sens du courant. Ces fluctuations d'efforts induites par la houle sont d'un ordre beaucoup plus élevé que celles relevées sans présence de houle (de l'ordre de 10 à 20 % suivant le taux de turbulence considéré) [6]. Cette différence provient à la fois de la différence entre les profils de vitesse orbitale sur la hauteur d'eau concernée (entre 0,65 et 1,35 m) entre une houle se propageant dans le sens du courant ou contre le courant, mais plus probablement de la différence entre les taux de turbulence subis par la machine (Figure 2-c).

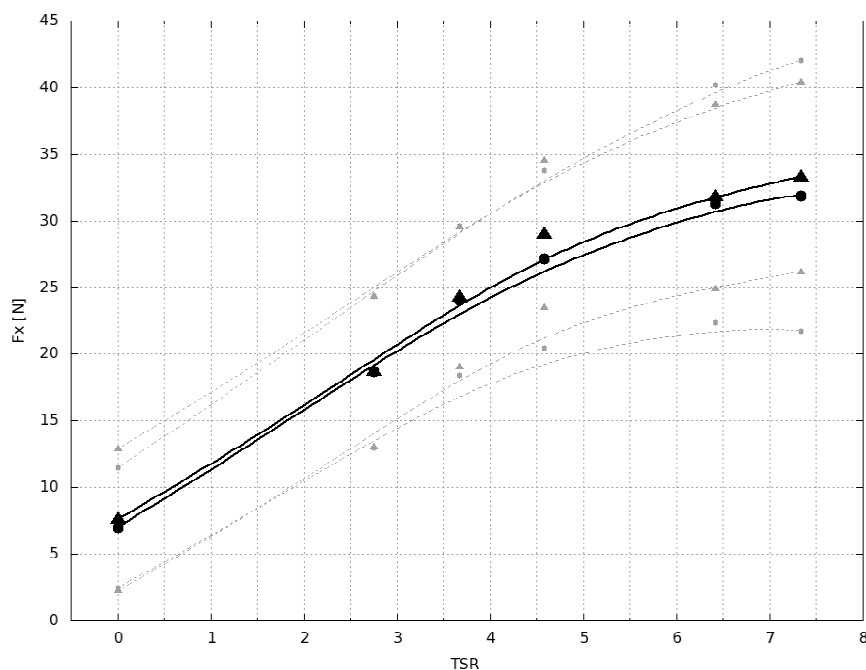


Figure 8. Evolution des efforts de traînée moyens et fluctuants pour une hydrolienne soumise à l'action combinée d'un courant de 0,4 m/s et d'une houle se propageant dans le même sens (●) et dans le sens opposé (▲), de 150 mm de hauteur à une fréquence de 0,6 Hz.

La transformée de Fourier des signaux des efforts, représentée Figure 9, montre que la structure répond principalement à la fréquence de houle (0,6 Hz). Ceci confirme bien que les fluctuations d'efforts sont directement liés aux fluctuations de l'écoulement, provenant en grande partie de la houle. De plus, il est intéressant de relever que, contrairement aux déformations de pales, on n'observe pas directement la fréquence de rotation dans le signal des efforts. Seul la fréquence de houle apparaît clairement ainsi que l'harmonique 3 de la fréquence de rotation à 4,2 Hz de manière plus dispersée et avec des amplitudes très faibles. Sur la transformée du signal de déformation de pales, on note un pic assez large et de faible amplitude pour 1,4 Hz, correspondant à la fréquence de rotation de la turbine, ainsi que ses harmoniques 2 et 3 (2,8 et 4,2 Hz). La provenance des nombreuses raies contenues dans le spectre des déformations n'est cependant pas si évidente que cela à identifier en raison des nombreux facteurs pouvant en être à l'origine : houle, turbulence de l'écoulement, vitesse de rotation de la turbine...

L'ensemble de ces résultats fera l'objet d'un travail spécifique et d'une communication dans un futur proche, notamment pour analyser la déformation des pales pour différentes raideurs.

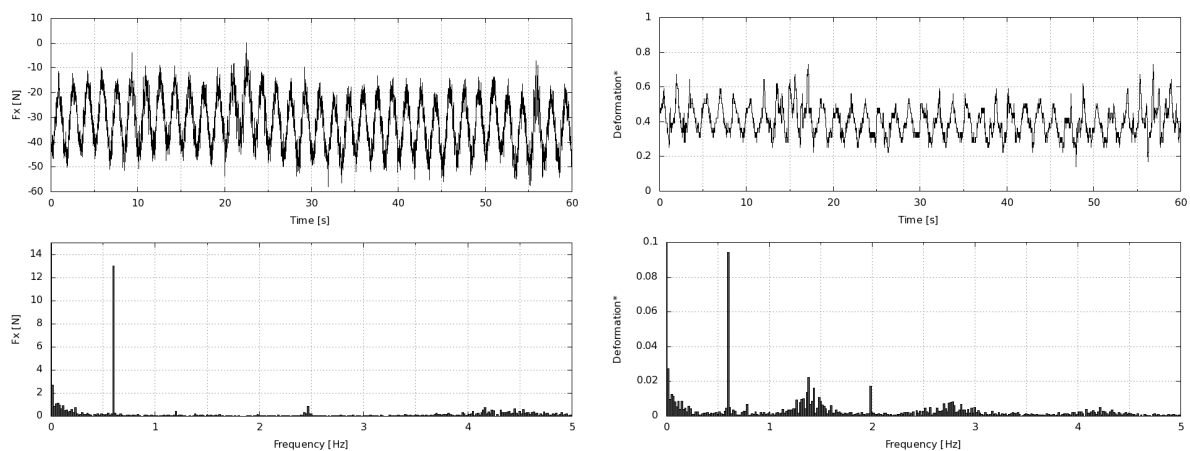


Figure 9. Evolution temporelle et fft des efforts de trainée (à gauche) et de déformation de pales (à droite) pour un courant de 0,4 m/s et une houle se propageant dans le même sens de 150 mm de hauteur à une fréquence de 0,6 Hz.

V - CONCLUSION

Les résultats présentés ont permis de caractériser l'influence du taux de turbulence de l'écoulement amont sur le comportement et l'évolution du sillage généré par une hydrolienne tri-pales à axe horizontal. Le sillage proche est caractérisé par un fort gradient de cisaillement et une intensité de turbulence élevée, alors que le sillage lointain est caractérisé par son expansion. Une réduction du sillage d'un facteur 3 et d'importantes fluctuations d'efforts (pouvant atteindre 20 %) ont pu être observées pour les taux de turbulence les plus élevés. La présence de houle génère également des sollicitations mécaniques fortes au niveau de la structure et des pales, ce qui constitue un facteur déterminant en terme de fatigue des matériaux.

L'ensemble de ces résultats constituent une base de données idéale pour la validation des outils numériques développés pour simuler le comportement d'hydrolienne. Les résultats numériques présentés dans cet article sont globalement en bon accord avec les résultats expérimentaux, même s'ils nécessitent d'être améliorés, notamment pour reproduire correctement l'évolution du sillage lointain. La prise en compte de conditions plus réalistes, notamment des effets combinés de la houle et du courant, doit être poursuivie et étendue afin d'améliorer le comportement des hydroliennes sous des chargements particulièrement complexes.

Une attention particulière devra être portée sur les effets tridimensionnels des sillages émis par les hydroliennes sur l'environnement physique immédiat et plus particulièrement sur leur impact sédimentaire et les phénomènes d'interaction entre hydroliennes placées en espace proche.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier la Région Haute-Normandie pour le soutien financier accordé aux co-financements de thèse et le CRIHAN (Centre des Ressources Informatique de Haute Normandie) pour la mise à disposition des moyens informatiques pour les calculs numériques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ADRARAMOLA M.S., AKINLADE O.G., SUMNER D., BERGSTROM D.J., SCHENSTEAD A.J. (2006). *Turbulence wake of a finite circular cylinder of small aspect ratio*. Journal of Fluids and Structure, Vol.22, Issue 6-7, pp 919-928.
- [2] GERMAIN G. (2008). *Marine current energy converter tank testing practices*. ICOE 2008, Brest.
- [3] GERMAIN G., BAHAJ A.S., ROBERTS P., HUXLEY-REYNARD C. (2007). *Facilities for marine current energy converter characterization*. 7th EWETEC, Porto.
- [4] GUINOT F., LE BOULLUEC M. (2008). Realistic marine flow conditions for current turbines studies. ICOE 2008, Brest.
- [5] MAGANGA F., PINON G., GERMAIN G., RIVOALEN E. (2008). Numerical Simulation of the wake of marine Current Turbine with a particle method. WREC X, Glasgow.
- [6] MAGANGA F., GERMAIN G., KING J., PINON G., RIVOALEN E. (2009). Experimental study to determine flow characteristic effects on marine current turbine behaviour. 8th EWTEC, Upsala.
- [7] MAGANGA F., PINON G., GERMAIN G., RIVOALEN E. (2010). Wake properties characterisation of marine current turbine. ICOE 2010, Bilbao.
- [8] MASTERS I., ORME J.A.C., CHAPMAN J. (2007). Towards realistic marine flow conditions for tidal stream turbine. 7th EWETEC, Porto.
- [9] MYERS L., BAHAJ A.S. (2008). The effect of boundary proximity upon the wake structure of horizontal axis marine current turbines. 27th OMAE, Estoril.
- [10] MYERS L., BAHAJ A.S. (2008). Scale reproduction of the flow field for tidal energy converters, WREC X, Glasgow.
- [11] MYERS L., BAHAJ A.S., GERMAIN G., GILES J. (2008). Flow boundary interaction effects for marine current energy conversion devices, WREC X, Glasgow.
- [12] MYERS L., BAHAJ A.S. (2009). Near wake properties of horizontal axis marine current turbines. 8th EWTEC, Upsala.
- [13] UBALDI M., ZUNINO P. (2000). *An experimental study of the unsteady characteristics of the near wake of a turbine blade*. Exp. Thermal & Fluid Science, Vol. 23, pp 23-33.
- [14] VERMEER L.J., SORENSEN J.N., CRESPO A. (2003). Wind turbine wake aerodynamics. Progressing in Aerospace Sciences, Vol. 39, pp 467-510.
- [15] EL KASMI A., MASSON C., An extended κ - ϵ model for turbulent flow through horizontal-axis wind turbines, Journal of Wind Engineering and Ind. Aerodynamics 96 (2008) 103-122
- [16] BATTEN W.M., BAHAJ A.S.S., MOLLAND A.F., CHAPLIN J.R., The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines, Renewable energy, 2008
- [17] WUBOW S., SITZKI L. and HAHM T., 3D-simulation of the turbulent wake behind a wind turbine, Journal of Physics: Conference Series 75, 2007
- [18] SØRENSEN J.N. and SHEN W.Z., Numerical modelling of wind turbine wakes. J Fluids Eng, 2002
- [19] BAI L., SPENCE R.G. and DUDZIAK G., Investigation of the Influence of Array Arrangement and Spacing on Tidal Energy Converter Performance using a 3-Dimensional CFD Model, 8th EWTEC, Uppsala, Sweden, 2009
- [20] CRESPO A., MANUEL F., MORENO D., FRAGA E. and HERNANDEZ J., Numerical analysis of wind turbine wakes, Bergeles G, Chadjivassiliadis J, editors, Proceedings of the Delphi, Greece, 1985
- [21] Mc COMBES T., JOHNSTONE C., GRANT A., Unsteady 3D wake modelling for marine current turbines, 8th EWTEC, Uppsala, Sweden, 2009