

ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT PROCHE DU ROTOR D'UNE HYDROLIENNE ET DE SON INTERACTION AVEC CELLE-CI, LORSQU'ELLE EST SOUMISE À UN COURANT RÉALISTE

STUDY OF THE FLOW NEAR THE ROTOR OF A TIDAL TURBINE AND ITS INTERACTION WITH IT, WHEN IT IS SUBJECTED TO A REALISTIC CURRENT

B. GAURIER⁽¹⁾, P. DRUAULT⁽²⁾, N. AHSSAYNI⁽¹⁾, J.V. FACQ⁽¹⁾
G. GERMAIN⁽¹⁾, B. GOMEZ⁽¹⁾

benoit.gaurier@ifremer.fr

⁽¹⁾IFREMER, RDT Recherches et Développements Technologiques, F-62200 Boulogne-sur-mer

⁽²⁾Sorbonne Université, Institut Jean Le Rond D'Alembert, F-75005 Paris

Résumé

Suite à l'introduction d'un nouveau codeur angulaire dans la maquette de l'hydrolienne tripale à axe horizontal du laboratoire, une campagne de mesure a été menée dans le bassin à houle et courant de l'IFREMER. Cette machine a été soumise à plusieurs configurations d'écoulement : laminaire, cisailé, turbulent, interaction avec une houle. Des mesures simultanées des efforts sur la turbine ainsi que des vitesses du courant autour du rotor ont été réalisées. Les résultats montrent que les effets d'induction et les répartitions angulaires des efforts en pied de pale sont fortement corrélés avec les caractéristiques de l'écoulement rencontré. Une analyse par moyenne de phase permet de quantifier les effets de blocage et de distorsion engendrés par le rotor sur l'écoulement amont.

Summary

Following the introduction of a new angle encoder in the model of the three-bladed horizontal-axis marine turbine of the lab, a measurement campaign was carried out in the wave and current flume tank of IFREMER. This model has been subjected to several flow configurations : laminar, sheared, turbulent, interaction with wave. Simultaneous measurements of the forces applied on the turbine as well as the velocities of the current around the rotor were carried out. The results show that the induction effects and the angular distributions of the blade root forces are strongly correlated with the characteristics of the inflow. A phase average analysis makes it possible to quantify the blockage and distortion effects generated by the rotor on the upstream flow.

I – Introduction

Depuis 2017, le laboratoire d’Hydrodynamique Marine de l’IFREMER développe et utilise une maquette générique d’hydrolienne instrumentée, à l’échelle 1/20^{ème}. Cette maquette tripale à axe horizontal de 70 cm de diamètre est régulièrement utilisées pour des campagnes d’essais menées au bassin à houle et courant de Boulogne-sur-mer. Ces essais ont notamment permis d’étudier les effets de la turbulence [5, 2, 3], de l’interaction houle-courant [7], de l’effet de parc [6], d’un gradient vertical de vitesse [11], de la proximité entre le mat et le rotor [16] ou encore de la bathymétrie [9, 10] sur le comportement de l’hydrolienne.

L’ensemble des résultats obtenus, en fonction des différentes conditions générées, montre des effets plus ou moins importants sur les performances moyennées ou fluctuantes de la maquette. En fonction des conditions de fonctionnement imposées à la turbine, les fluctuations des paramètres d’effort et de couple mesurés représentent 5 % à 20 % de leurs valeurs moyennes.

Cette maquette était, jusqu’à maintenant, dépourvue de capteur de positionnement angulaire. L’angle du rotor était déduit de l’analyse de la projection du poids des pales sur les efforts mesurés. En 2023, cette maquette a été équipée d’un codeur angulaire digital de précision. Ce dernier a permis, d’une part, d’augmenter la précision de la répartition angulaire des efforts et moments s’appliquant sur les pales, pouvant varier de façon significative, pendant une rotation du rotor. D’autre part, ce codeur autorise également la synchronisation, en phase avec la rotation du rotor, de la mesure des paramètres de la machine avec un capteur externe, tel qu’un système de mesure de vitesse.

Dans ce document, nous présenterons d’abord la maquette de l’hydrolienne avec son nouveau capteur angulaire et nous montrerons le gain en précision apporté par celui-ci en comparaison avec la méthode analytique utilisée jusque maintenant. Nous donnerons ensuite les principales caractéristiques hydrodynamiques des différentes conditions d’écoulement générées dans le bassin, auxquelles nous avons soumis l’hydrolienne. Nous nous intéresserons ensuite aux résultats obtenus sur les répartitions angulaires d’effort exercés sur les pales pour ces différentes conditions. Pour terminer, nous nous focaliserons sur la mesure de l’écoulement autour de la machine dans ces conditions, en utilisant le système de vélocimétrie par images de particules, synchronisé avec la rotation de la machine.

II – Matériel et méthode

Les essais présentés dans ce document ont tous été réalisés dans le bassin à houle et courant de l’IFREMER à Boulogne-sur-mer. Ce bassin est une boucle verticale de circulation, contenant 700 m³ d’eau douce, mis en mouvement par 2 hélices d’un mètre de diamètre, animées par 2 pompes de 250 kW chacune. Les vitesses de courant ainsi obtenues s’échelonnent entre 0,2 et 2 m/s, sur une section d’essais de 2 m de profondeur par 4 m de large et une vingtaine de mètres de longueur (figure 1). Le niveau de turbulence moyen est de 1,5 %, grâce à la mise en place d’un nid d’abeille à l’entrée de la zone d’essais.

Un batteur à houle peut être positionné en amont ou en aval de la zone d’essais, pour générer des vagues dans le même sens ou contre le courant respectivement. La vitesse de courant maximale est alors de 0,8 m/s. Ce batteur permet la création de houles régulières ou irrégulières, dont les amplitudes maximales sont de 30 cm crête à creux et dans la gamme de fréquence de 0,25 Hz à 2 Hz. En raison de l’immersion du batteur ou de la

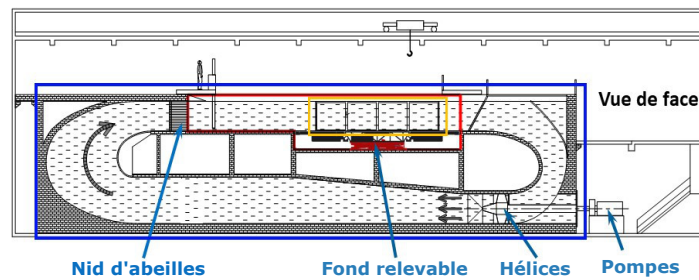


FIGURE 1 – Schéma en coupe du bassin à houle et courant de Boulogne-sur-mer. La zone d’essais est entourée en rouge. La zone entourée en jaune désigne les 4 grandes vitres latérales, permettant l’observation et la mesure optique.

plage d’amortissement en amont de la zone d’essais, un gradient de vitesse vertical est présent dans le bassin. Celui-ci est caractérisé et utilisé comme condition d’écoulement particulier pour ces essais. Une description détaillée de ces conditions sera présentée dans la suite de ce document.

II – 1 Présentation de la maquette

La maquette utilisée pour ces essais est une hydrolienne tripale à axe horizontal, dont le diamètre est $D = 0,724$ m (figure 2). Cette dimension fait qu’elle peut être considérée comme étant un modèle réduit à l’échelle 1/20^{ème} d’une machine qui ferait environ 15 m de diamètre à l’échelle réelle. Elle serait alors immergée dans une zone de profondeur équivalente à 40 m et dans un courant de 3,6 m/s, en respectant la similitude de Froude, pour un courant de 0,8 m/s au bassin.

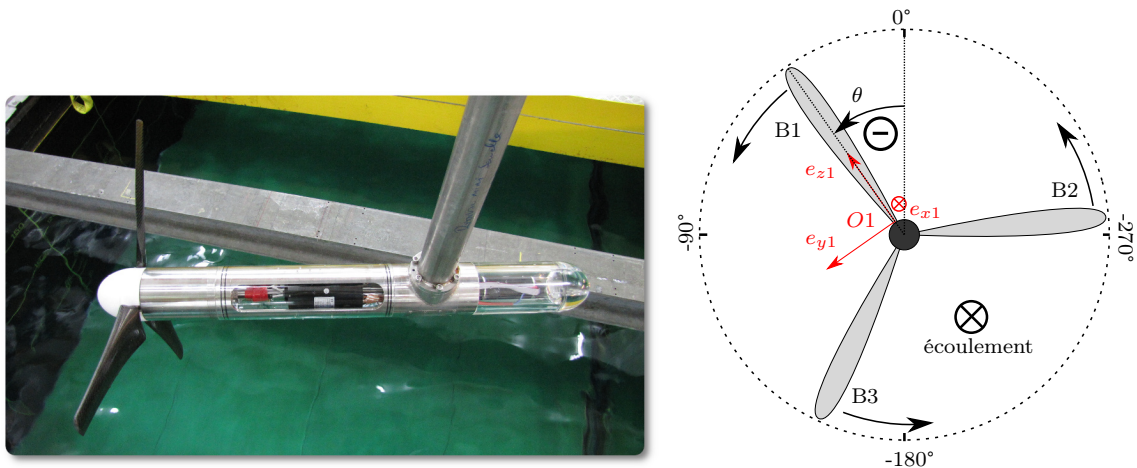


FIGURE 2 – Maquette de l’hydrolienne instrumentée : le cylindre noir au centre de la nacelle est le collecteur tournant, le moteur est situé au bout de la nacelle, à l’opposé du rotor. À droite, le schéma représente le rotor vue de face, avec l’angle θ correspondant à sa position angulaire, ainsi que le repère de la pale 1 en rouge. L’hydrolienne tourne dans le sens négatif du repère.

La géométrie des pales est basée sur un profil NACA 63-418 dont l’angle d’attaque et la corde évoluent avec la longueur. Elles ont toutes été fabriquées à partir du même moule et sont constituées de fibres de carbone et de résine. Elles sont ainsi supposées identiques et indéformables.

Cette maquette est équipée d'une balance, spécifiquement développée pour cette application, qui permet de mesurer les efforts et les moments au pied des 3 pales, ainsi que d'un capteur indépendant de couple et de poussée sur l'axe du rotor. Ces capteurs sont étanches et positionnés en amont des joints d'étanchéité. Un collecteur tournant permet de récupérer les mesures de ces capteurs en rotation. Un moteur, situé au bout de l'axe de rotation, impose la vitesse de rotation de la machine.

II – 2 Amélioration de la mesure de position angulaire

Récemment, un codeur angulaire a été intégré dans la maquette de l'hydrolienne. Celui-ci est positionné entre le collecteur tournant et le moteur, sur l'axe de rotation. Le modèle retenu est digital, incrémental et de type ABZ, codé sur 19 bits. La résolution est ainsi de 131 072 points par révolution, soit un point tous les $0,003^\circ$ environ.

Avant l'installation de ce codeur, la position angulaire du rotor était déterminée par l'analyse de la projection du poids sur les efforts F_{yi} des trois pales (voir figure 2). Deux méthodes étaient utilisées :

- la première consistait à utiliser la transformée de Hilbert sur les efforts F_{yi} ,
- la seconde, purement analytique, reposait sur la projection de ces mêmes efforts.

Les signaux F_{yi} devaient préalablement être filtrés, en utilisant un filtre passe-bande autour de la fréquence de rotation. Ceci imposait donc une vitesse de rotation constante à la machine, ou tout au moins, évoluant sur une bande de fréquence étroite.

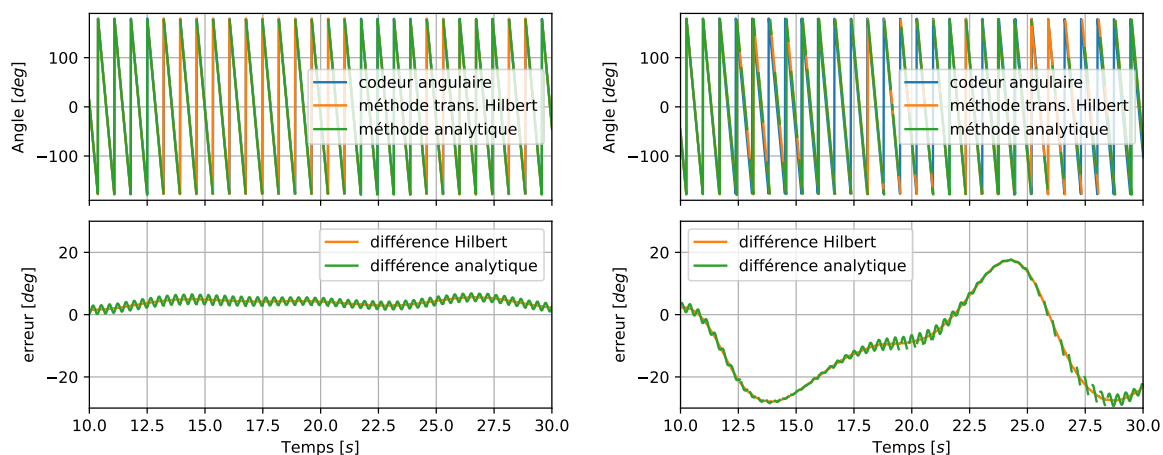


FIGURE 3 – Comparaison de la mesure du codeur angulaire avec les angles obtenus en utilisant les méthodes de la transformée de Hilbert et analytique. Les figures du haut montrent un extrait des enregistrements pour les 3 mesures et celles du bas montrent les différences obtenues entre les 2 méthodes et le codeur. Les graphiques de gauche ont été obtenus dans un écoulement peu turbulent et ceux de droite dans un écoulement cisailé et turbulent. Dans les deux cas, l'hydrolienne tourne à sa vitesse de rotation nominale et la norme de la vitesse de l'écoulement amont est d'environ 0,8 m/s.

Sur la figure 3 sont présentées deux mesures de position angulaire obtenues avec l'utilisation du codeur angulaire, ainsi qu'avec les deux méthodes décrites précédemment, pour deux types d'écoulement différents. Sur les figures du haut, on observe que l'angle θ décroît de façon constante (voir son orientation sur la figure 2) et saute de 360° quand il arrive à -180° . Les différences, présentées dans les figures inférieures, sont relativement faibles pour le cas faiblement turbulent (figures de gauche), bien que non nulles. La différence

moyenne est de 3° , mais varie entre -3° et 9° , sur l'ensemble de l'acquisition. Pour le cas cisailé et turbulent (figures de droite), la différence moyenne est supérieure en valeur absolue, avec -9° , et varie entre -40° et 18° (ce maximum est visible sur la figure) sur l'ensemble de l'acquisition.

Le codeur angulaire améliore donc de façon significative la précision de la mesure de la position angulaire du rotor. Ceci est d'autant plus vrai que les écoulements sont complexes. Or, c'est justement ces écoulements qui présentent un intérêt tout particulier dans l'étude de la répartition des efforts mesurés en pied de pale, en fonction de la position angulaire, comme nous le verrons dans la suite de ce document.

II – 3 Présentation de l'instrumentation PIV

Le système de vélocimétrie par images de particules (PIV) utilisé pour ces essais est composé d'un laser double cavité, d'une puissance de 200 mJ par cavité, et d'une caméra double image, disposant de $5,5 \times 10^6$ pixels et codés sur 16 bits en niveau de gris (figure 4). La fréquence d'acquisition usuelle du système est de 15 Hz. Le traitement réalisé ensuite repose sur une inter-corrélation croisée et multi-passe de chaque paire d'images acquises, dont la taille de la fenêtre d'interrogation varie en fonction du rapport signal sur bruit du pic de corrélation. L'ensemble de la dimension des images est couverte par des fenêtres d'interrogation glissantes, avec un recouvrement imposé de 50 %.

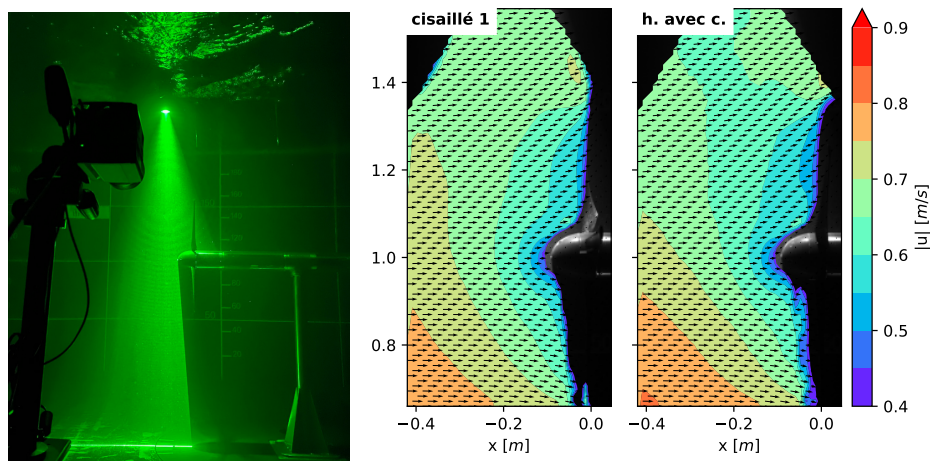


FIGURE 4 – Vue de l'hydrolienne fixée au fond, depuis la vitre du bassin, pendant un essai avec la nappe laser perçant la surface libre et la caméra du système PIV. À droite, deux images, obtenues dans cette configuration, de la moyenne temporelle du module et des vecteurs de la vitesse mesurée pendant un essai (exprimés en m/s), avec un gradient vertical de vitesse (à gauche) et une houle dans le sens du courant (à droite).

La dimension des plans acquis avec le montage présenté sur la figure 4 est d'environ 450 mm de large par 900 mm de haut. La résolution vectorielle finale, après traitement des données, est ainsi de l'ordre d'un vecteur tous les 10 mm dans chaque direction (seulement 1 vecteur sur 3 est représenté sur les cartographies de la figure 4).

Une seconde campagne de mesure PIV a également été menée, pendant laquelle le laser était successivement positionné devant et derrière le rotor. Lors de cette deuxième campagne, le déclenchement de la PIV a été synchronisé avec la rotation de la turbine, grâce au codeur angulaire. La fréquence d'acquisition de la PIV correspondait donc exactement à la fréquence de rotation du rotor. La turbine tournait à sa vitesse de rotation

nominale ($TSR = 4$) ce qui correspond environ à une fréquence de 1,4 Hz. Quatre séries d'images ont été acquises. La première correspond exactement au moment où la pale 1 est orientée vers le haut. Les suivantes ont été décalées de 30° à chaque fois, ce qui correspond aux 4 phases présentées sur la figure 5. Les mesures PIV ont ainsi été répétées devant et derrière le rotor, pour ces 4 phases et pour les différentes conditions d'écoulement décrites dans le paragraphe suivant.

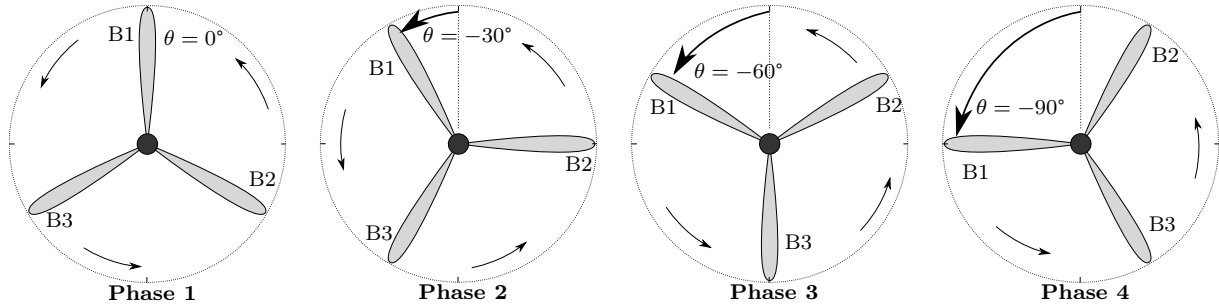


FIGURE 5 – Présentation des 4 phases correspondantes aux mesures PIV réalisées devant et derrière le rotor. La phase 1 correspond au moment où la pale 1 est orientée vers le haut ($\theta = 0^\circ$), les autres sont successivement décalées de -30° . Il est à noter que la phase 3 ($\theta = -60^\circ$) correspond au moment où la pale 3 est orientées vers le bas.

II – 4 Conditions de courant générées

Différentes conditions d'écoulement ont été générées durant ces essais, avec une vitesse moyenne de l'ordre de 0,8 m/s. Afin de caractériser ces conditions, nous avons initialement réalisé des mesures PIV, sans la présence de l'hydrolienne, pour les configurations suivantes :

- courant faiblement turbulent et homogène, nommé laminaire,
- 2 types de courant cisailé et turbulent, obtenus avec le batteur à houle en aval de la zone d'essais, nommé cisailé 1, et avec la plage d'amortissement à cette même position, nommé cisailé 2,
- 2 configurations de houle et courant simultanés : houle avec courant et houle contre courant. La houle générée dans les 2 cas est une houle régulière d'amplitude environ 50 mm et de fréquence 0,45 Hz.

Sur les cartographies de la figure 6, on observe un gradient vertical de vitesse bien marqué, avec des écarts de l'ordre de 0,2 m/s entre la partie haute et basse de la zone de mesure, pour une vitesse moyenne légèrement inférieure à 0,8 m/s. Ces écarts s'amplifient pour le cas houle avec courant. À la vue de ces résultats, représentatifs des 5 configurations testées, nous pouvons considérer que la répartition des vitesses est indépendante de la position x , sur la largeur considérée ici, et qu'elle ne dépend donc que de la position z . De ce fait, dans la suite, nous comparerons les profils des vitesses extraits le long de la ligne verticale centrale ($x = -0,18$ m).

Ces profils de vitesse moyenne (figure 6) montrent des variations assez différentes entre les configurations d'écoulement. Le profil laminaire est relativement constant sur la hauteur mesurée, indiquant une répartition de vitesse assez homogène. Au contraire, sur les 4 autres profils, le cisaillement vertical est assez significatif. Ces profils peuvent être regroupés 2 à 2. Pour le premier groupe, obtenu avec le batteur en amont (cisailé 1 et houle avec courant), la variation de vitesse montre une pente relativement constante le long de l'axe vertical. Au contraire, pour le second groupe avec la plage en amont (cisailé

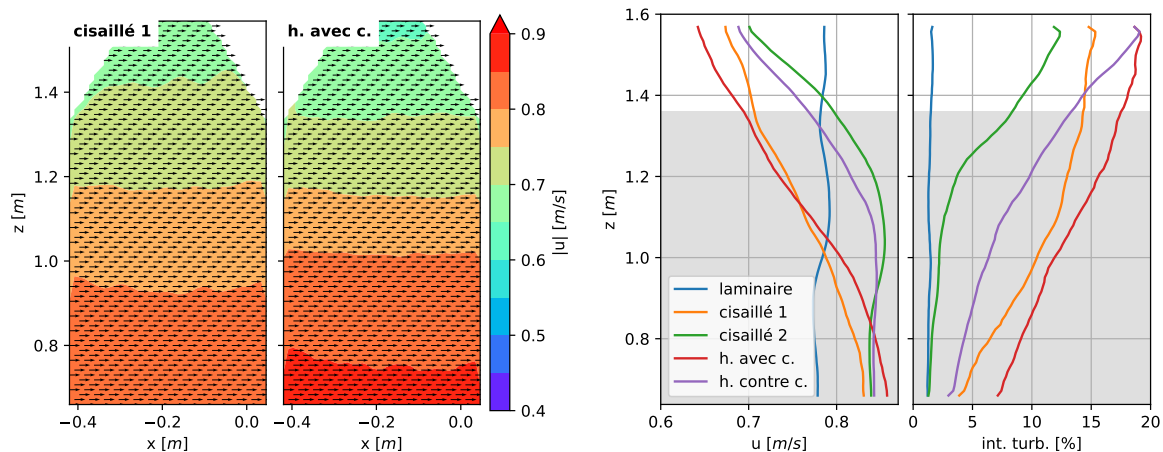


FIGURE 6 – Figures de gauche : cartographie du module et des vecteurs de la vitesse moyenne pour le cas cisailé 1 (à gauche) et houle avec courant (à droite), exprimées en m/s. Ces résultats correspondent aux mêmes configurations qu’à la figure 4, sans l’hydrolienne. Figures de droite : profils de la composante axiale de la vitesse moyenne pour les 5 configurations d’écoulement (à gauche) et de l’intensité turbulente correspondante (à droite), extraits des mesures PIV le long de la ligne verticale centrale. La profondeur $z = 1,0$ m correspond au centre du bassin et la zone grisée correspond à la hauteur du rotor de l’hydrolienne.

2 et houle contre courant), les vitesses sont quasi-constantes dans la moitié basse du profil et diminuent assez fortement dans la moitié haute. Le graphique de droite montre des intensités turbulentes assez fortes en haut, comprises entre 10 % à 20 %, et qui diminuent avec la profondeur, sauf pour le profil laminaire qui reste constant à moins de 2 %. Il est à noter que la composante de houle n’a pas été enlevée du signal des vitesses, pour le calcul de l’intensité turbulente. Une analyse spectrale (non montrée ici) fait apparaître clairement la fréquence de houle, sur l’ensemble de la hauteur de mesure, pour les cas houle et courant. Des fréquences plus basses ($f \simeq 0,12$ Hz), surtout présentes dans la moitié haute de la zone de mesure, sont également visibles pour ces derniers cas ainsi que sur les cas cisailés. Elles correspondent à des détachements tourbillonnaires énergétiques provenant du batteur à houle ou de la plage.

III – Résultats

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus sur la mesure angulaire des efforts en pied des pales de l’hydrolienne, lorsque celle-ci est soumise aux 5 conditions d’écoulements décrits précédemment. Nous nous intéressons également à la manière dont le rotor en rotation de l’hydrolienne perturbe le courant, à partir des mesures PIV.

III – 1 Effet de l’écoulement sur les efforts en pied de pale

La moyenne et l’écart type angulaire de l’effort de traînée F_x perçu par la pale 1, sont présentés sur les figures 7. La moyenne temporelle a été retranchée de ces résultats, afin de s’affranchir des effets de modification de norme de la vitesse, entre les différentes configurations d’écoulement.

Sur ces figures, la courbe présentant le plus de variations angulaire est celle obtenue dans la configuration d’écoulement houle avec courant. Celle-ci montre, en effet, des va-

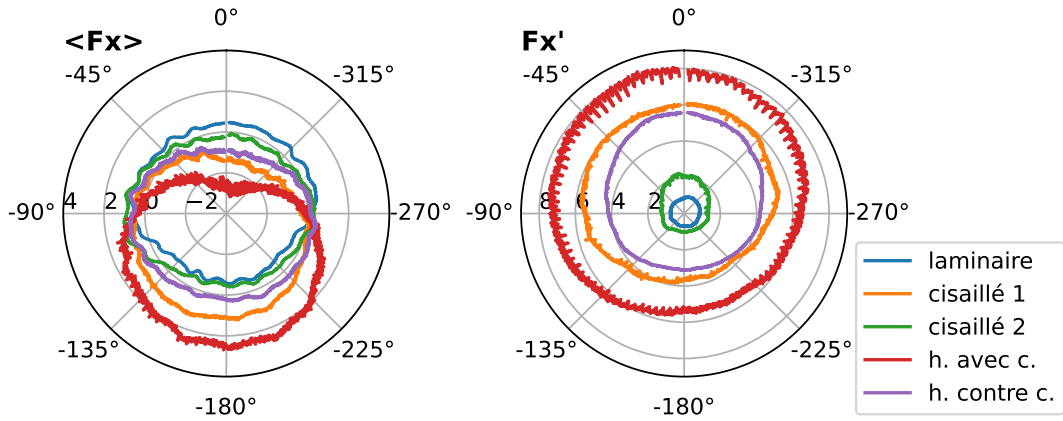


FIGURE 7 – Moyenne et écart type angulaire de l’effort F_x de la pale 1, lorsqu’elle est soumise aux écoulements décrits dans le paragraphe II – 4 et précisés dans les légendes. L’hydrolienne tourne à sa vitesse de rotation nominale (TSR = 4).

riations moyennes comprises entre -3 N et 3 N , ce qui représente environ 15 % de la valeur temporelle moyenne qui est de 41 N . D’après le profil de vitesse présenté en figure 6, cette configuration d’écoulement est aussi celle qui montre le plus fort gradient vertical. Un déphasage de 20 à 30° est toutefois observée sur cette répartition angulaire moyenne, en fonction des conditions d’écoulement, probablement lié à la mise en rotation de celui-ci dans la zone d’induction [12, 15].

Concernant l’écart type, les plus grandes valeurs angulaires sont également observées pour l’écoulement houle avec courant et varient entre 6 N et 8 N , le maximum étant atteint pour un angle d’environ 350° . Finalement, ceci signifie donc que, pour cet écoulement, l’effort F_x mesuré sur les pales vaut 41 N en moyenne temporelle, qu’il varie autour de cette valeur de $\pm 3\text{ N}$ en moyenne à chaque tour et que cette variation angulaire présente un écart type pouvant atteindre localement 8 N . Ces variations angulaires sont significatives et génèrent une fatigue importante sur le matériau constituant les pales, puisqu’elle se répète à chaque rotation. Il est donc nécessaire de dimensionner le rotor en conséquence.

III – 2 Modification du courant en fonction de l’écoulement incident

En effectuant la différence entre le profil issu des mesures PIV moyennes avec et sans la turbine, le long de la ligne verticale centrale, l’effet d’induction de la turbine est clairement visible. Il est nécessaire de préciser que ce profil est obtenu à une distance de 18 cm en amont du rotor en rotation à TSR = 4, situé à $x = 0\text{ m}$. Une comparaison de ces différences est présentée sur la figure 8 pour les 2 composantes mesurées et pour les 5 cas d’écoulement.

Les profils de ces différences ainsi obtenus sont assez similaires pour toutes les configurations d’écoulement testées. Globalement, on relève un net déficit de la vitesse axiale u au niveau du nez du rotor, qui diminue en bout de pale. En parallèle, la vitesse verticale w est positive dans la moitié supérieure, négative dans la partie inférieure et passe par 0 au centre. Les valeurs maximales sont atteintes à 90-95 % du rayon des pales, comme cela a déjà été observé précédemment [13, 4].

À cette distance du rotor (18 cm), un écart de 3 cm/s maximum est observé entre les différents écoulements générés pour la composante u . Cet écart apparaît dès le centre de rotation du rotor et est approximativement le même dans toute la moitié haute. Au

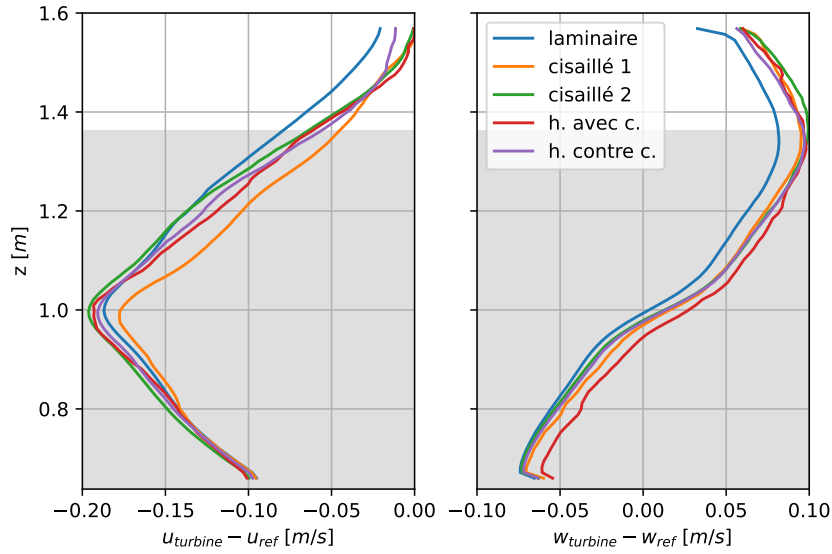


FIGURE 8 – Différence entre le profil de courant moyen mesuré avec et sans la turbine en rotation à sa vitesse nominale, pour les configurations d’écoulement décrits dans le paragraphe II – 4. Ces profils sont issus des mesures présentées aux figures 4 et 6, le long de la ligne verticale centrale, 18 cm en amont du rotor. La figure de gauche montre la composante u (dans l’axe principal du courant) et celle de droite, la composante w (dans l’axe vertical).

contraire, dans la partie basse, les profils sont tous confondus. Pour la composante w , les écarts sont faibles, n’excédant pas 2 cm/s, et sont constants sur la hauteur du rotor. Il est intéressant de constater que ces écarts tendent à rendre ces profils non symétriques, en accord avec les résultats précédents [1, 4]. Ainsi, les profils obtenus pour l’écoulement laminaire sont parfaitement symétriques, sur la hauteur du rotor. La dissymétrie apparaît principalement en augmentant les vitesses u dans la moitié haute du rotor, de façon assez significative pour le cas cisailé 1. Pour la composante w , c’est le cas houle avec courant qui montre l’augmentation la plus marquée. Globalement, l’écoulement tend ainsi à contourner le rotor de façon plus prononcée par le haut, pour les écoulements cisailés et avec houle.

III – 3 Modification du courant en fonction de la position angulaire

La figure 9 présente les résultats obtenus dans les cas d’écoulement laminaire et houle avec courant, pour les mesures PIV réalisées en moyenne de phase avec la rotation de la turbine et pour la phase $\theta = 0^\circ$. En comparant ces cartographies, on retrouve d’abord la signature des profils incidents de vitesse présentés à la figure 6, avec des valeurs supérieures, pour le cas laminaire, au dessus du sillage du rotor, d’environ 0,1 m/s. En amont du rotor, c’est sous l’axe de rotation de la turbine que les vitesses sont les plus fortes, pour le cas houle avec courant. La zone d’induction, en amont du rotor est également bien visible pour les deux cas.

Ces mesures synchronisées avec la rotation permettent surtout de montrer les tourbillons d’extrémités de pale, à la fois dans la partie externe du sillage du rotor, mais aussi le long de la nacelle, sur toute la longueur mesurée, pour le cas laminaire. Ces tourbillons sont nettement moins marqués, pour le cas houle avec courant, puisqu’un seul apparaît distinctement. Ceci provient, d’une part, du gradient de vitesse plus faible dans le sillage, pour cette configuration, et du niveau de turbulence plus élevé qui désorganise et dissipe

plus rapidement ces tourbillons.

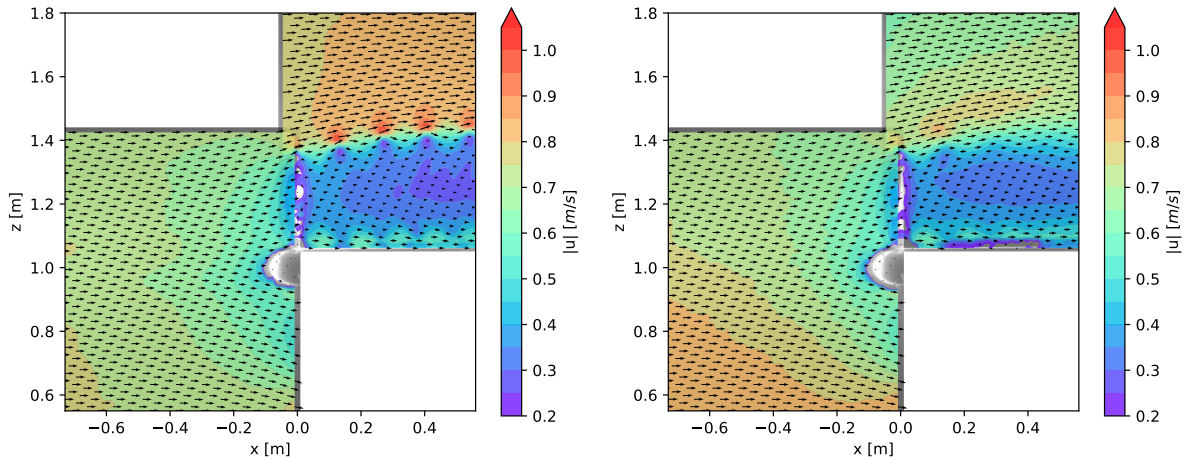


FIGURE 9 – Moyenne de phase du module et des vecteurs de la vitesse mesurée dans la configuration laminaire (à gauche) et houle avec courant (à droite) pour la phase $\theta = 0^\circ$. Le nez de l’hydrolienne est présent sur ces images et permet de situer la machine. La machine tourne à sa vitesse de rotation nominale.

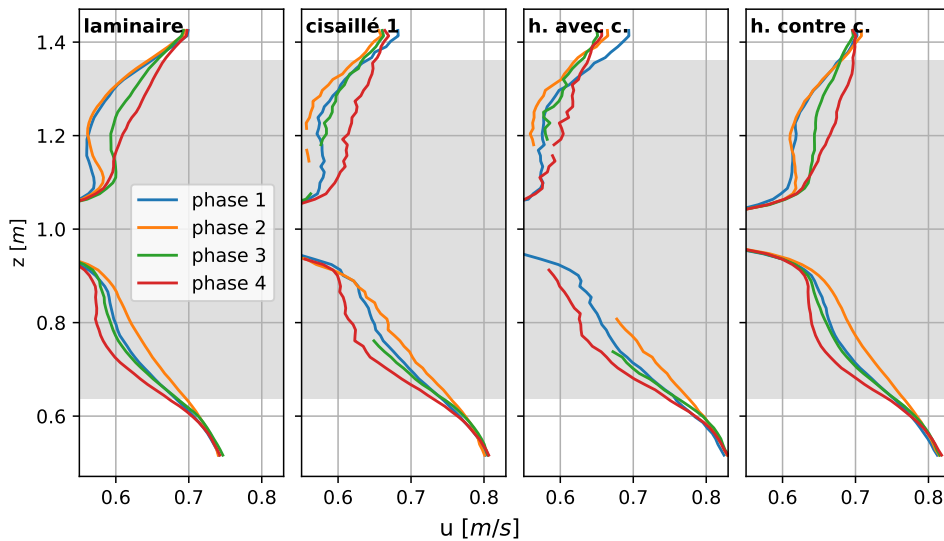


FIGURE 10 – Profils des moyennes de phase des vitesses axiales mesurées devant le rotor à $x = -0,1$ m pour les configurations laminaire, cisailé 1, houle avec et contre courant et pour les 4 phases de rotation décrites à la figure 5. Les profils extraits pour les cas cisailés 1 et houle avec courant sont partiellement manquants, en particulier pour les phases 2 et 3, en raison d’un positionnement peu adapté du laser PIV.

Afin de comparer facilement les résultats obtenus entre les 4 phases et pour les différents écoulements, un profil moyen a été extrait de ces cartographies, 10 cm devant le rotor. Sur ces profils, présentés figure 10, des différences assez significatives sont observées entre les phases. Au contraire, ceux-ci sont assez similaires entre les écoulements testés, sur la hauteur du rotor (zone grisée). Ceci signifie donc que l’effet d’induction généré devant le rotor domine, à cette distance, par rapport à l’effet des caractéristiques intrinsèques de l’écoulement incident.

Il est intéressant de constater que les vitesses les plus faibles ne sont pas observées au moment exact du passage des pales à la verticale, mais sur la phase immédiatement après, soit 30° plus tard. Ceci est vrai dans la moitié haute (phase 2) et dans la moitié basse (phase 4) du rotor. Au contraire, les vitesses les plus fortes n'apparaissent pas non plus au moment central entre deux pales, mais sur les phases immédiatement suivantes, soit sur la phase 4 en haut et la phase 2 en bas, de nouveau 30° plus tard. Ceci conforte le déphasage angulaire de 20 à 30° observé sur la répartition angulaire de l'effort F_x des pales, au paragraphe III – 1. L'origine de ce déphasage réside principalement dans la distorsion et l'effet de blocage de l'écoulement, à l'approche du rotor [8, 14]. Des analyses complémentaires, notamment de la partie fluctuante des vitesses, sont nécessaires afin d'appréhender correctement les différents phénomènes en présence et d'améliorer les modèles analytiques et numériques des effets d'induction du rotor d'une turbine.

IV – Conclusions et perspectives

Suite à l'introduction d'un nouveau codeur angulaire dans la maquette de l'hydrolienne tripale à axe horizontal du laboratoire, une nouvelle base de données a été constituée. Celle-ci se compose de mesures des paramètres de la turbine ainsi que de la vitesse de l'écoulement autour du rotor, obtenue par PIV. Plusieurs configurations d'écoulements ont été testées, depuis une configuration laminaire et homogène, jusqu'à des cas présentant un cisaillement vertical des vitesses, de la turbulence et de l'interaction houle - courant.

Cette base de données a permis, dans un premier temps, de montrer l'avantage de la mesure angulaire du rotor par le codeur, en comparaison avec les méthodes utilisées auparavant. Un gain significatif sur la précision angulaire a ainsi été obtenu. La répartition angulaire des efforts mesurés sur les pales de l'hydrolienne, ou sur la poussée et le couple du rotor, montre des variations significatives, à chaque rotation, en fonction du type d'écoulements rencontré. Ces variations sont à l'origine d'une fatigue importante du matériau et des structures, dont il est nécessaire de tenir compte. Les mesures de vitesse, effectuées devant le rotor de façon synchronisée avec les efforts, présentent des effets d'induction marqués et assez différents selon les cas étudiés. Par ailleurs, l'utilisation de ce capteur permet également d'effectuer des mesures en moyenne de phase, de façon précise. Une comparaison des vitesses mesurées pour 4 phases différentes, devant le rotor, permet de mettre en évidence les effets de blocage liés au passage des pales ainsi que la distorsion de l'écoulement devant le rotor.

Des analyses complémentaires sont nécessaires, en particulier sur le lien entre les efforts sur le rotor et le contenu des fluctuations des vitesses mesurées. Celles-ci devraient permettre de mieux comprendre les phénomènes liés aux effets d'induction du rotor d'une machine afin de les reproduire de manière plus précise par les méthodes de simulation numérique ou analytique.

Références

- [1] M. Bastankhah and F. Porté-Agel. Wind tunnel study of the wind turbine interaction with a boundary-layer flow : Upwind region, turbine performance, and wake region. *Physics of Fluids*, 29(6) :065105, 06 2017.
- [2] G. Deskos, G. S. Payne, B. Gaurier, and M. Graham. On the spectral behaviour of the turbulence-driven power fluctuations of horizontal-axis turbines. *Journal of Fluid Mechanics*, 904 :A13, 2020.

- [3] P. Druault, B. Gaurier, and G. Germain. Spatial integration effect on velocity spectrum : Towards an interpretation of the $-11/3$ power law observed in the spectra of turbine outputs. *Renewable Energy*, 181 :1062–1080, 2022.
- [4] P. Druault and G. Germain. Experimental investigation of the upstream turbulent flow modifications in front of a scaled tidal turbine. *Renewable Energy*, 196 :1204–1217, 2022.
- [5] O. Durán Medina, F. G. Schmitt, R. Calif, G. Germain, and B. Gaurier. Turbulence analysis and multiscale correlations between synchronized flow velocity and marine turbine power production. *Renewable Energy*, 112 :314–327, 2017.
- [6] B. Gaurier, C. Carlier, G. Germain, G. Pinon, and E. Rivoalen. Three tidal turbines in interaction : An experimental study of turbulence intensity effects on wakes and turbine performance. *Renewable Energy*, 148 :1150–1164, 2020.
- [7] B. Gaurier, S. Ordonez-Sanchez, J.-V. Facq, G. Germain, C. Johnstone, R. Martinez, F. Salvatore, I. Santic, T. Davey, C. Old, and B. Sellar. Marinet2 tidal energy round robin tests – performance comparison of a horizontal axis turbine subjected to combined wave and current conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6) :463, 2020.
- [8] J. M. R. Graham. Rapid distortion of turbulence into an open turbine rotor. *Journal of Fluid Mechanics*, 825 :764–794, 2017.
- [9] M. Ikhennicheu, B. Gaurier, P. Druault, and G. Germain. Experimental analysis of the floor inclination effect on the turbulent wake developing behind a wall mounted cube. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 72 :340–352, 2018.
- [10] M. Ikhennicheu, G. Germain, P. Druault, and B. Gaurier. Experimental study of coherent flow structures past a wall-mounted square cylinder. *Ocean Engineering*, 182 :137–146, 2019.
- [11] M. Magnier, N. Delette, P. Druault, B. Gaurier, and G. Germain. Experimental study of the shear flow effect on tidal turbine blade loading variation. *Renewable Energy*, 193 :744–757, 2022.
- [12] A. Mason-Jones, D. O’Doherty, C. Morris, and T. O’Doherty. Influence of a velocity profile and support structure on tidal stream turbine performance. *Renewable Energy*, 52 :23–30, 2013.
- [13] D. Medici, S. Ivanell, J.-Å. Dahlberg, and P. H. Alfredsson. The upstream flow of a wind turbine : blockage effect. *Wind Energy*, 14(5) :691–697, 2011.
- [14] I. A. Milne and J. M. R. Graham. Turbulence velocity spectra and intensities in the inflow of a turbine rotor. *Journal of Fluid Mechanics*, 870 :R3, 2019.
- [15] G. S. Payne, T. Stallard, R. Martinez, and T. Bruce. Variation of loads on a three-bladed horizontal axis tidal turbine with frequency and blade position. *Journal of Fluids and Structures*, 83 :156–170, 2018.
- [16] G. Shoukat, B. Gaurier, J.-V. Facq, and G. Payne. Experimental investigation of the influence of mast proximity on rotor loads for horizontal axis tidal turbines. *Renewable Energy*, 200 :983–995, 2022.