



HydroQuest



Méthodes Expérimentales et Numériques pour l'Hydrolien

7-8 juin 2023

Ifremer, Boulogne-sur-Mer (France)

WORKSHOP

Méthodes expérimentales et numériques pour l'hydrolien organisé par le Laboratoire d'Hydrodynamique Marine

Ifremer – Centre Manche Mer du Nord

Boulogne-sur-Mer, France

Contributeurs : N. Ahssayni, T. Archinard, M. Arhant, A. Baldock, JP. Belin, A-C. Bennis, F. Blondel, C. Boake, R. Coquet, P. Davies, E. Droniou, P. Druault, M-A. Dufour, N. Dumergue, A. Durris, J-V. Facq, B. Gaurier, G. Germain*, B. Gomez, M. Grondeau, M. Guilbot, N. Guillaud, N. Guillou, S. Guillou, F. Hadri, M. Huchet, A. Jarno, F. Johnson, L. Jouenne, J-F. Krawczynski, M. Lafosse, M. Magnier, N. Marcon, F. Marin, E. Mascrier, G. Maurice, P. Mercier, M. Moreau, L. Perez, G. Pinon, A. Richard, E. Rivoalen, M. Roperch, A. Santa Cruz, Y. Saouli, K. B. Shariff, J. Thiebot, M. Vah, B. Vermeulen, V. Wilk, F. Zilic de Arcos

* gregory.germain@ifremer.fr – Laboratoire d'Hydrodynamique Marine – Ifremer - Boulogne-sur-Mer

Sommaire :

Introduction	p 3
Session Méthodes expérimentales	pp 4 à 20
1. Obstacles de fond et génération de structures tourbillonnaires, A. Santa Cruz et al.	
2. Reproduction des conditions in-situ au bassin à houle et courant de l'Ifremer, M. Magnier et al.	
3. Etude du comportement d'hydroliennes à axe horizontal – Performances/sillage/effet d'interaction, B. Gaurier et al.	
4. Comportement d'une hydrolienne carénée à double axe vertical dans une diversité de conditions expérimentales, M. Moreau et al.	
5. Complémentarité des infrastructures d'essais, un retour d'expérience, G. Maurice et al.	
6. Etude des vitesses de courants dans la zone de Paimpol-Bréhat pour des applications de dynamique sédimentaire dans un contexte de parc hydrolien, A. Durris et al.	
7. Wake characterisation of tidal turbines in the Pentland Firth using vessel-mounted ADCP measurements, M. Huchet et al.	
8. Durabilité des matériaux utilisés pour l'hydrolien : de l'échantillon à la structure, M. Arhant et al.	
Session Méthodes numériques	pp 21 à 33
1. Simulation des grandes structures tourbillonnaires générées sur le fond marin, P. Mercier et al.	
2. Validation of a lifting line code associated to the Vortex Particles Method software Dorothy, MA. Dufour et al.	
3. Evaluation of three numerical models for the simulation of tidal rotors, F. Zilic et al.	
4. La modélisation numérique chez HydroQuest, N. Guillaud et al.	
5. Modélisation de l'interaction entre hydroliennes avec la méthode Boltzmann sur réseau, M. Grondeau et al.	
6. Predicting turbulence intensity and velocity in tidal turbine farms : an empirical model-based approach, K. Bashir et al.	
7. Caractérisation de la variabilité temporelle des courants de marée du Raz-Blanchard par analyse harmonique et modélisation numérique, J. Thiébot et al.	
Session Posters	pp 34 à 59
1. Les fonctionnalités du bassin à houle et courant de l'Ifremer, JV. Facq et al.	
2. Maquettes d'hydroliennes à axe horizontal et vertical, N. Asshani et al.	
3. Effets du blocage anisotropique sur une hydrolienne, E. Mascrier et al.	
4. Caractérisation expérimentale des effets d'induction en amont d'une hydrolienne à axe horizontal : modèles analytiques comparés aux mesures PIV, P. Druault et al.	
5. Development of a lifting line approach for vertical axis tidal turbines, M. Roperch et al.	
6. Ressource assessment using a combination of seabed mounted and semi-stationary vessel-mounted ADCP measurements, E. Droniou et al.	
7. The FloWatt project : the first commercial deployment of vertical axis tidal turbine in the Raz-Blanchard, G. Germain et al.	
8. Etude du comportement hydrodynamique des câbles dynamiques, G. Germain et al.	
9. Modélisation physique de l'impact d'un câble d'export d'énergie sur la dynamique sédimentaire, M. Vah et al.	
Session Projets Industriels	
1. FloWatt, ferme pilote du Raz-Blanchard, étape vers le déploiement de l'hydrolien, R. Coquet, HydroQuest.	
2. Présentation de l'implication de Sabella dans le projet TIGER, T. Archinard, Sabella.	

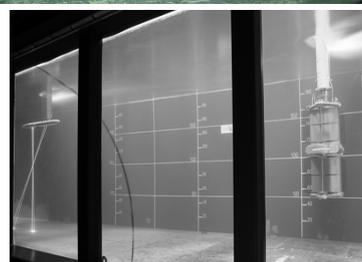
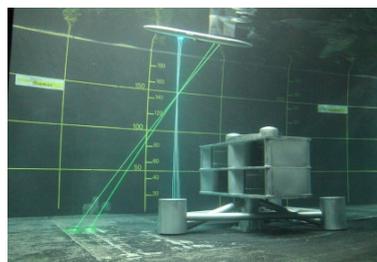
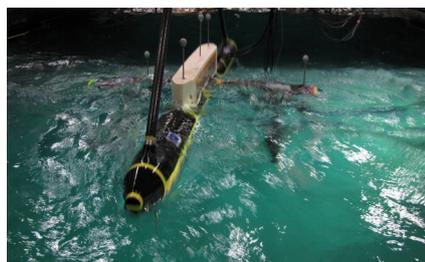
Introduction

L'exploitation de l'énergie des courants marins en France reste aujourd'hui encore à un stade confidentiel. Le développement des projets industriels nécessite donc des efforts importants de l'ensemble de la communauté scientifique pour accompagner efficacement ces projets.

Ce Workshop dédié aux méthodes expérimentales et numériques a permis aux participants d'échanger et de partager leurs méthodes, travaux et résultats. Les 15 présentations retenues ont été organisées en deux sessions spécifiques sur deux demi journées. La première session a permis de balayer un domaine assez large, depuis une meilleure connaissance des conditions hydrodynamiques rencontrées sur site jusqu'à l'étude du comportement des hydroliennes soumises à des conditions instationnaires, en passant par la caractérisation des matériaux composites et le développement de procédures de mesure de sillage en mer. La session numérique a permis de dresser un état des lieux des principales avancées réalisées dans ce domaine, que ce soit à l'échelle de la machine comme à l'échelle du parc. Ces outils, validés en partie à partir des travaux expérimentaux, permettent d'étudier la réponse des turbines et d'estimer le potentiel énergétique des sites hydroliens.

La fin de la première journée a également été consacrée à la présentation des projets industriels d'HydroQuest et de Sabella, deux acteurs majeurs de l'industrie hydrolienne française. Leur retour d'expérience concernant les projets passés, en cours ou à venir (à Ouessant, Paimpol-Bréhat et au Raz-Blanchard) permettra d'alimenter les travaux de Recherche et Développement de la communauté. Les participants ont pu découvrir un ensemble de posters portant l'ensemble de la thématique, depuis la présentation de moyens d'essais, le développement de technique de traitement de données, à l'étude du comportement dynamique de câble d'export.

Ce Workshop, organisé par l'IFREMER et soutenu par le GDR EOL-EMR et les partenaires industriels, a également été une occasion unique de découvrir les maquettes d'hydrolienne développées ces dernières années (turbine 3 à 5 pales à axe horizontal, turbine bi-colonnes quadri-rotors à axe vertical) et les moyens de mesures. Les participants ont pu découvrir les installations d'essais, le bassin à houle et courant étant un moyen unique en Europe.



De gauche à droite et de haut en bas, essais à l'échelle 1/20 : d'une hydrolienne flottante en présence de houle, de mesure LDV en amont d'une hydrolienne carénée, d'une hydrolienne soumise à la turbulence de grille, d'une maquette à axe vertical non carénée en mouvement imposés

Ce recueil de documents permet d'établir un bilan non exhaustif des travaux portant sur l'hydrolien présentés pendant le workshop.

OBSTACLES DE FOND ET GÉNÉRATION DE STRUCTURES TOURBILLONNAIRES – ÉTUDE EXPÉRIMENTALE EN ÉCOULEMENT À HAUTE VITESSE.

A. SANTA CRUZ⁽¹⁾, F. HADRI^(1, 2), J.P. BELIN⁽¹⁾, S. GUILLOU⁽¹⁾

Corresponding author : Alina Santa Cruz (alina.santa-cruz@unicaen.fr)

I. INTRODUCTION

Compte-tenu du fort potentiel énergétique présent, les côtes normandes s'avèrent être une zone propice à l'implantation de fermes d'hydroliennes dont la performance sera soumise à l'impact de divers facteurs, entre autres à ceux liés aux caractéristiques de l'environnement marin. L'un des axes de travail développés au sein du LUSAC, est la compréhension des mécanismes de génération du sillage turbulent issu de la présence de fonds marins complexes. Dans cette contribution, nous présentons une synthèse des principaux résultats expérimentaux obtenus à ce sujet dans le cadre de campagnes de mesures menées dans le Tunnel Hydrodynamique du LUSAC [1].

II. APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Nous procédons à une modélisation simplifiée de la bathymétrie assimilant ses dénivelés à des obstacles cylindriques longs (H et D étant respectivement leur hauteur et largeur) posés sur le fond de la zone d'étude et occupant toute sa largeur (W) [2, 3]. Ces obstacles sont soumis à un fort courant, les vitesses étant de l'ordre de 3 m/s. L'outil de métrologie privilégié est la PIV-2D2C. Les plans de visualisation explorés sont le plan médian, le plan $y/W = -1/4$ et $+1/4$ (cf. Figure 1).

Les caractéristiques des obstacles étudiés dans la suite sont répertoriées dans le tableau 1.

Obstacle	D [mm]	H [mm]	W [mm]	H/D	W/H
O1	40	20	300	0,5	15
O2	30	20	300	0,67	15
O3	20	15	300	0,75	20
O4	20	20	300	1	15
O5	20	30	300	1,5	10
O6	20	40	300	2	7,5

Tableau 1 : Caractéristiques des obstacles

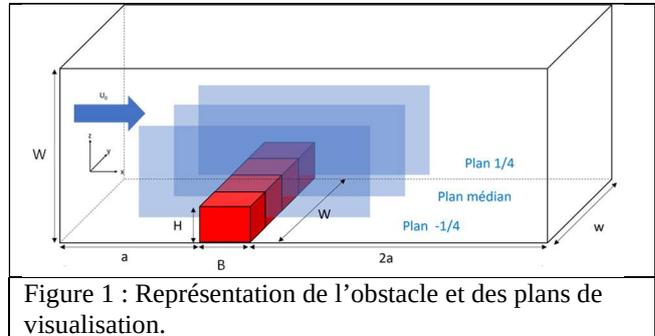


Figure 1 : Représentation de l'obstacle et des plans de visualisation.

III. RÉSULTATS

A. Obstacles longs et bidimensionnalité de l'écoulement

La topologie de l'écoulement moyen généré autour d'un obstacle (O3) de section droite rectangulaire dont le rapport d'aspect est $H/D=0.75$ et l'envergure telle que $W/H=20$ a d'abord été étudiée. Compte tenu de la littérature on peut s'attendre à un écoulement marqué par une forte dimensionnalité dans le proche sillage. En effet avec un rapport $W/H > 10$ nous pouvons considérer que nous sommes dans le cadre des cylindres dits longs [4] et que l'écoulement est pseudo-2D. En vue de vérifier cette hypothèse nous avons fait une caractérisation analogue dans le plan $y/W = -1/4$. Nous observons la présence de deux zones de recirculation moyenne T1 et T2. La première est générée sur le sommet de l'obstacle et se déploie largement, engendrant ainsi un écoulement de retour qui aboutit à la zone de recirculation contre-rotative accolée à l'obstacle.

La topologie de l'écoulement (cf. figure 2) reste très proche à celle observée sur le plan médian, confirmant ainsi que l'écoulement reste 2D pour y/W compris entre $-1/4$ et 0 . Dans le même sens, la longueur de la zone de formation adimensionnée par H , passe de $L_R/D=7$ au plan médian, à $L_R/D=7.5$ à $y/W=-1.4$. La position des zones de recirculation moyennes ne varie pas d'un plan à l'autre. Nous pouvons supposer que par symétrie on peut faire le même constat pour y/W compris entre 0 et $+1/4$.

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

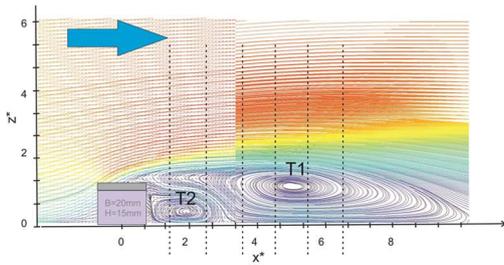


Figure 2 : Zone de formation tourbillonnaire à l'aval de l'obstacle O3 au plan médian.

B. Impact du rapport d'aspect de l'obstacle

En vue d'évaluer l'impact des dimensions de la section droite de l'obstacle sur l'organisation de l'écoulement, on étudie plusieurs obstacles dont le rapport de forme H/D varie entre 0,75 et 2. Le cas de référence est l'obstacle de section carrée O4. Sur la base de l'organisation de la topologie du champ de vitesses moyen on peut faire le classement suivant :

- Les obstacles de rapport H/D proche de 1 (soit O2, O3 et O4) qui présentent une organisation telle que celle observée précédemment (cf. figure 2).

- Les obstacles élancés avec $H/D > 1$ (cf. figure 3), pour lesquels on observe un grand élargissement de la structure principale T1 et la parution d'une zone de recirculation en amont de l'obstacle (T4).

- O1 avec $H/D = 0.5$ (cf. figure 4), pour lequel on observe une zone de recirculation supplémentaire T3, qui pourrait être interprétée comme le résultat d'une scission de T1, suite à son étirement.

Nous observons un impact sur la longueur de la zone de formation tourbillonnaire moyenne, l'étendue de celle-ci ainsi que le nombre de zones de recirculations moyennes dans le proche sillage et la position de leurs centres.

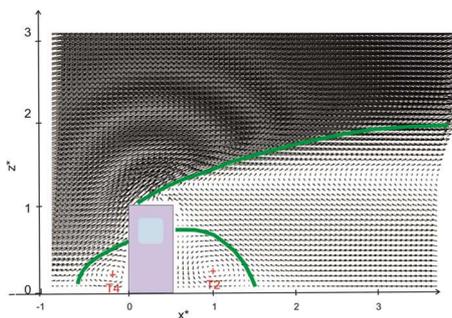


Figure 3 : Champ de vitesse moyen dans le cas O6

C. Combinaison d'obstacles -1ers résultats

Enfin, nous présentons dans la suite nos premiers résultats concernant les effets de la combinaison de deux obstacles identiques (O4) sur la topologie de la zone de formation tourbillonnaire

moyenne. Comme pour le cas O1 on observe entre autres une troisième zone de recirculation T3.

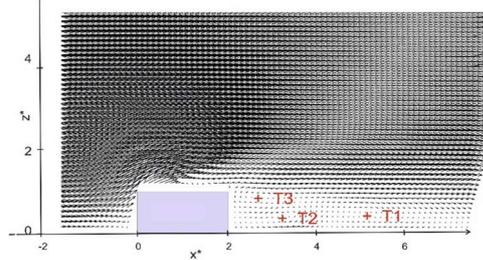


Figure 4 : Champ de vitesse moyen dans le cas O1

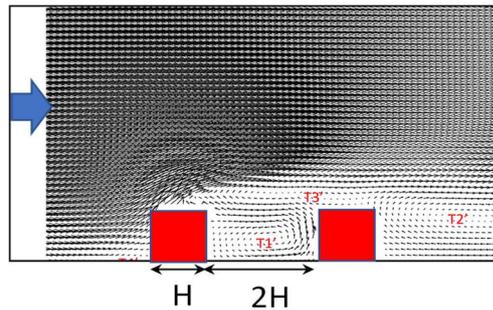


Figure 5 : Configuration de la veine d'essai et champ de vitesse moyen dans le cas de deux obstacles en tandem.

IV. CONCLUSION

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 dénivelés de la bathymétrie ont été modélisées par des cylindres longs occupant toute la largeur du canal. Forts de ces premières explorations nous envisageons de faire une caractérisation plus détaillée de la zone de formation et d'échappement tourbillonnaires

- [1] 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 des 17^{èmes} Journées de l'Hydrodynamique JH2020, Caen, 2020*
- [2] 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.*
- [3] A. Santa Cruz, F. Hadri, C. Mignonnet and S. Guillou. Etude expérimentale de l'écoulement généré par un obstacle de fond en zone a haute vitesse. *Actes du 18^{èmes} Journées de l'Hydrodynamique, Poitiers, 2022.*
- [4] R. Martinuzzi, C. Tropea. The flow around surface-mounted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow, *ASME*, 115(1): 85–92, 1993

Reproduction des conditions in-situ au bassin à houle et courant de l'Ifremer

Maëlys Magnier^{*,a,b}, Yanis Saouli^b, Benoit Gaurier^b, Philippe Druault^a
Grégory Germain^b

a. Institut Jean le Rond d'Alembert, Sorbonne Université

b. Laboratoire d'Hydrodynamique Marine, IFREMER

* Corresponding author: mmagnier@ifremer.fr

Mots clés : Conditions in-situ, Essais expérimentaux, Profils verticaux de vitesse, Bathymétrie, Structures tourbillonnaires, Houle.

Résumé:

Dans les sites à haut potentiel hydrolien, les écoulements sont complexes. Les variations bathymétriques sont responsables de profils de vitesse verticaux cisailés et de la génération de structures tourbillonnaires dans la colonne d'eau [1, 2]. En hiver, les dépressions au large génèrent de la houle qui vient interagir avec les conditions hydrodynamiques déjà complexes de ces sites [3]. Les conditions rencontrées sont alors sans cesse différentes ce qui complexifie l'étude du comportement des structures installées par l'homme dans ces zones (hydroliennes, fondations, sous-stations). De plus, mesurer précisément les états de mer en surface et la dynamique dans la colonne d'eau relève d'un défi. Ainsi, il est nécessaire de reproduire ces conditions de manière contrôlée afin d'étudier expérimentalement leur impact sur le comportement de ces structures. Cette présentation décrit comment les conditions de houle, courant et turbulence typiques des sites à haut potentiel énergétique sont reproduites échelle 1:20 au bassin d'essais à recirculation de l'IFREMER, localisé à Boulogne-sur-Mer. Cette installation présente une veine d'essais de 20 m de long, 4 m de large et 2 m de profondeur. En générant un courant de vitesse amont $U_\infty = 1.0$ m/s, les conditions en bassin sont en similitude de Froude par rapport aux conditions en mer et le nombre de Reynolds, calculé par rapport à la taille des grandes variations bathymétriques, est élevé bien qu'environ deux ordre de grandeur inférieur aux conditions en mer.

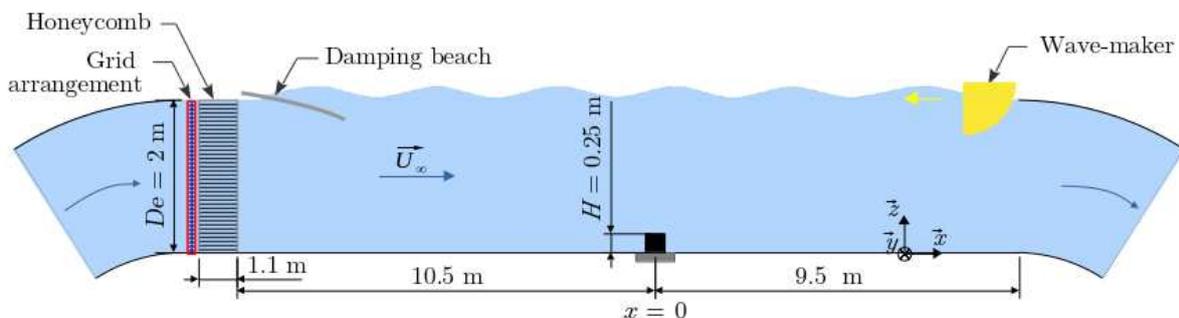


Figure 1: Représentation schématique des dispositifs expérimentaux utilisés pour modéliser les conditions in-situ.

Pour modéliser expérimentalement différents profils verticaux de vitesse, le profil incident de vitesse du bassin d'essais est modifié à l'aide d'arrangements de grilles. Celles-ci sont homogènes horizontalement mais pas verticalement, ralentissant graduellement l'écoulement à mesure que la profondeur augmente. Ces arrangements sont placés en amont de la section d'essais, avant le nid d'abeille comme montré figure 1. Trois arrangements de grilles, nommés *Panel 1*, *Panel 2* et *Panel 3* sont retenus. Ils permettent d'obtenir des profils de vitesse compris dans la gamme de lois de puissance présente au Raz Blanchard c'est-à-dire entre $\alpha = 4$ et $\alpha = 14$ [4]. Le cas *Panel 3* atteint les gradients de vitesse les plus forts présents in-situ, et donc les plus sollicitants. Les cas *Panel 2* et *3* génèrent de la turbulence dans la partie basse de la colonne d'eau car le bas des arrangements de grilles bouchent complètement l'entrée du nid d'abeille sur les 20 cm les plus proches du fond. Les écoulements obtenus sont décrits en détail dans [5].

Les larges structures tourbillonnaires présentes dans les courants de marée sont générées à l'aide d'un cylindre de section carrée, installé perpendiculairement au courant, au centre de la section d'essais comme présenté figure 1. Cet obstacle génère un sillage très énergétique et orienté vers la surface. Au sein de la couche cisailée du sillage, des tourbillons de petite taille s'organisent pour former des larges structures tourbillonnaires émises à un nombre de Strouhal égal à 0.06. Ces structures tourbillonnaires remontent jusqu'à la surface, en y formant des bouillons comme ceux présents au Raz Blanchard [6]. Ce sillage est décrit en détail dans les articles [7] et [8].

La houle est générée à l'aide d'un générateur de houle qui peut être placé en amont ou en aval de la veine d'essais. À l'opposé du générateur de houle, on positionne une plage d'amortissement pour limiter la réflexion. La houle est donc générée co ou contre courant. Lorsque le batteur et la plage d'amortissement sont immergés, la vitesse incidente du bassin est réduite à $U_\infty = 0.8$ m/s pour diminuer leur chargement tout en conservant la similitude de Froude et un nombre de Reynolds élevé. Dans ces conditions, les houles équivalentes en mer sont comprises entre 6 s et 22 s de période de pic pour des hauteurs significatives pouvant atteindre 4.5 m. Les houles co-courant ont des périodes plus courtes que les houles contre-courant à cause des interactions houle – courant. Elles sont toutes deux représentatives des conditions moyennes en Manche et les houles contre-courant représentent également bien les houles les plus sévères [9, 10]. Un cas de houle contre-courant aux caractéristiques typiques des houles de tempête en Manche est détaillé dans l'article [11].

En résumé, il est possible de modéliser fidèlement les conditions in-situ présentes dans les sites à haut potentiel hydrolien de la Manche au bassin d'essais à houle et courant de l'IFREMER. Cela permet de mieux comprendre la physique de ces écoulements et d'étudier leur effets sur les performances et la durée de vie des hydroliennes.

References

- [1] L. Furgerot, P. B. Du Bois, Y. Méar, M. Morillon, E. Poizot, and A. C. Bennis, "Velocity profile variability at a tidal-stream energy site (Alderney Race, France): From short (second) to yearly time scales," *2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans, OCEANS - Kobe 2018*, pp. 1–8, 2018.
- [2] M. Thiébaud, J.-F. Filipot, C. Maisondieu, G. Damblans, C. Jochum, L. F. Kilcher, and S. Guillou, "Characterization of the vertical evolution of the three-dimensional turbulence for fatigue design of tidal turbines," *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, vol. 378, no. 2178, p. 20190495, 2020.

- [3] A. C. Bennis, L. Furgerot, P. Bailly du Bois, E. Poizot, Y. Méar, and F. Dumas, “A winter storm in Alderney Race: Impacts of 3D wave–current interactions on the hydrodynamic and tidal stream energy,” *Applied Ocean Research*, vol. 120, p. 103009, 2022.
- [4] A. Sentchev, T. D. Nguyen, L. Furgerot, and P. Bailly du Bois, “Underway velocity measurements in the Alderney Race: towards a three-dimensional representation of tidal motions,” *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, vol. 378, no. 2178, p. 20190491, 2020.
- [5] 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*, vol. 193, pp. 744–757, 2022.
- [6] 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*, vol. 204, p. 107274, 2020.
- [7] M. Ikhennicheu, G. Germain, P. Druault, and B. Gaurier, “Experimental study of coherent flow structures past a wall-mounted square cylinder,” *Ocean Engineering journal*, vol. 182, pp. 137–146, 2019.
- [8] M. Magnier, P. Druault, B. Gaurier, and G. Germain, “Comparison of bathymetry variation effects on tidal turbine behaviour,” in *17ème journées de l’hydrodynamique JH2020*, pp. 1–12, 2020.
- [9] DREAL Basse-Normandie, “Détermination du potentiel hydrolien en Basse-Normandie.” tech. rep., 2012.
- [10] L. Furgerot, A. Sentchev, P. Bailly du Bois, G. Lopez, M. Morillon, E. Poizot, Y. Méar, and A. C. Bennis, “One year of measurements in Alderney Race: preliminary results from database analysis,” *Phil. Trans. R. Soc A*, vol. 378, p. 20190625, 2020.
- [11] M. Magnier, Y. Saouli, B. Gaurier, P. Druault, and G. Germain, “Modification of the wake of a wall-mounted bathymetry obstacle submitted to waves opposing a tidal current,” *Submitted to Ocean Engineering*, 2023.

Bassin d'essais à houle et courant de l'IFREMER : reproduction expérimentale des conditions de fonctionnement des hydroliennes et instrumentation spécifique

B. Gaurier^{*, a}, G. Germain^a, J.-V. Facq^a, B. Gomez^a

a. Laboratoire d'HYdrodynamique MARine, IFREMER, Boulogne-sur-mer

* Corresponding author : benoit.gaurier@ifremer.fr

Key words ou Mots clés : hydrolienne, essais expérimentaux, hydrodynamique, turbulence, houle, courant, profil de vitesse, PIV, LDV, hexapode

Summary ou Résumé :

Dans les zones à fort potentiel énergétique hydrolien, la vitesse élevée des courants de marée s'accompagne toujours de conditions environnementales sévères. Les fluctuations de vitesse y sont très importantes, avec des valeurs d'intensité turbulente comprises entre 6 et 13 % au Raz Blanchard (THIÉBAUT et al. 2020), de l'ordre de 15 % sur le site de Paimpol-Bréhat (FILIPOT et al. 2015) ou plus généralement entre 5 et 20 % d'après l'étude bibliographique réalisée par MYCEK et al. (2014). Par ailleurs, ces vitesses présentent également des variations d'amplitude avec la profondeur ainsi qu'entre le flot et le jusant. MOREAU et al. (2022) montre des profils verticaux du courant enregistrés à Paimpol-Bréhat, présentant des variations maximales de l'ordre de 1,5 m/s entre les différentes phases de la marée, mais également entre le fond et la surface. De plus, la houle en surface impacte de manière significative ces profils de courant, en ajoutant une composante périodique aux fluctuations turbulentes et en modifiant aussi leur valeur moyenne. Avec des houles dont les caractéristiques peuvent atteindre des périodes de pic de 13 s pour des hauteurs significatives de 7 m au Raz Blanchard (FURGEROT et al. 2020), MAGNIER et al. (2022) remarque que les longueurs d'onde les plus grandes (de l'ordre de 100 m) représentent plus du double de la profondeur d'eau (environ 40 m). Au fond de ces sites fortement sollicités par les conditions marines, la bathymétrie présente des variations qui influent également sur les vitesses du courant de l'ensemble de la colonne d'eau. IKHENNICHEU et al. (2019) a ainsi montré qu'une perturbation bathymétrique (de type barre rocheuse) dont la hauteur atteint 1/8ème de la profondeur d'eau, représentative des variations relevées au Raz Blanchard, est à l'origine de tourbillons réguliers et très énergétiques remontant jusqu'à la surface, lorsqu'elle est soumise à un courant.

Le dimensionnement des hydroliennes doit donc être réalisé en conséquence, afin de s'assurer de leur durabilité et de maintenir un coût d'exploitation acceptable. Il est ainsi impératif de pouvoir représenter ces conditions de fonctionnement en bassin afin de modéliser, à l'échelle, les effets de ces sollicitations sur les différentes structures composant les parcs hydroliens (turbines, stations de fond, liaisons fond-surface).

Au bassin d'essais de l'IFREMER de Boulogne-sur-mer, il est possible :

- de générer des courants turbulents, avec des intensités comprises entre 1,5 et 15 %, correspondant aux conditions décrites précédemment sur les sites à fort potentiel énergétique ;
- d'imposer de la houle, orientée dans le même sens que le courant ou dans le sens inverse. Les capacités du générateur de houle, en terme d'amplitude et de période, permettent d'être pleinement représentatif de conditions *in-situ*, comme celles décrites par MOREAU et al. (2022) sur le site de Paimpol-Bréhat, au flot et au jusant ;
- d'ajuster le profil vertical de courant. En utilisant un empilement de structures poreuses, judicieusement disposées en entrée de la section d'essais, les gradients verticaux de vitesse peuvent être très proches de ceux décrits dans la littérature ;
- de représenter les phénomènes de « marmites » observés sur le site du Raz Blanchard à échelle réelle, par l'ajout de variations bathymétriques simplifiées et mises à l'échelle du bassin (MERCIER et al. 2020). Ces dernières ont permis de décrire finement les processus de génération de tourbillons, émis dans leur sillage et impactant toute la colonne d'eau.

Les modélisations expérimentales effectuées dans ce cadre sont toutes réalisées à l'échelle 1/20 et nécessitent donc d'utiliser une maquette d'hydrolienne de taille adéquate, lorsqu'on s'intéresse aux effets sur les machines. Plusieurs campagnes d'essais ont déjà été réalisées sur des hydroliennes à axe horizontal, notamment les maquettes de l'IFREMER, de Sabella (en version 5 et 3 pales) et de Magallanes. De la même manière, des essais utilisant l'hydrolienne à axe vertical d'HydroQuest ont permis de quantifier les effets de l'ensemble des sollicitations décrites ci-dessus sur les efforts et les performances.

La mesure du courant, en amont ou dans le sillage des turbines, s'effectue principalement à partir de moyens lasers non intrusifs. Les deux outils utilisés sont un système de vélocimétrie par image de particules (PIV) et un système de vélocimétrie laser Doppler (LDV). Ces deux systèmes reposent sur la détermination de la vitesse de micro-particules de verre enrobées d'argent (car réfléchissant la lumière) présentes dans l'eau. Le système PIV permet d'obtenir une cartographie bi-dimensionnelle d'une zone donnée, de dimension maximale de 1,5 m par 1 m avec une résolution de l'ordre du centimètre et à une fréquence maximale de 15 Hz. Le système LDV quant lui permet la mesure des 3 composantes de la vitesse du courant, en un point et à haute fréquence (entre 100 et 1000 Hz). Ce dernier est monté sur des tables de déplacement automatique qui permettent de répéter les acquisitions facilement en faisant varier la position du point de mesure successivement. L'enregistrement haute fréquence de la LDV autorise un traitement temporel et fréquentiel très fin (idéal pour la caractérisation de la turbulence). Un système de trajectométrie est également disponible. Il permet de suivre les mouvements ou les déformations d'un corps soumis à l'action de la houle et du courant à partir d'enregistrement vidéo simultané de plusieurs caméras (aériennes ou sous-marines) par reconstruction volumétrique, à une fréquence de 100 Hz. Ces mouvements ou déformations peuvent alors être enregistrés de façon synchronisée avec les efforts qui s'appliquent sur ce corps afin de déterminer la réponse de la structure aux sollicitations imposées. Les mouvements des structures peuvent également être imposés par un hexapode (3 rotations et 3 translations). Ce type d'essais permet de calculer les coefficients hydrodynamiques classiques (traînée et masse ajoutée) en reliant les efforts (ou moments) enregistrés par les balances aux mouvements imposés. Il peut aussi être utilisé pour simuler les mouvements d'une plateforme flottante, supportant une hydrolienne, afin de quantifier les effets de ces mouvements sur les performances de la machine considérée.

Références

- FILIPOT, J.-F., M. PREVOSTO, C. MAISONDIEU, M. LE BOULLUEC et J. THOMSON (2015). “Wave and turbulence measurements at a tidal energy site”. In : *11th Current, Waves and Turbulence Measurement*. IEEE, p. 1-9. DOI : [10.1109/CWTM.2015.7098128](https://doi.org/10.1109/CWTM.2015.7098128).
- FURGEROT, L. et al. (2020). “One year of measurements in Alderney Race : Preliminary results from database analysis : In situ measurements in Alderney Race”. In : *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 378.2178. DOI : [10.1098/rsta.2019.0625](https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0625).
- IKHENNICHEU, M., G. GERMAIN, P. DRUAULT et B. GAURIER (2019). “Experimental study of coherent flow structures past a wall-mounted square cylinder”. In : *Ocean Engineering* 182.May, p. 137-146. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2019.04.043](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.043).
- MAGNIER, M., N. DELETTE, P. DRUAULT, B. GAURIER et G. GERMAIN (2022). “Experimental study of the shear flow effect on tidal turbine blade loading variation”. In : *Renewable Energy* 193, p. 744-757. DOI : [10.1016/j.renene.2022.05.042](https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.042).
- MERCIER, P. et al. (2020). “The merging of Kelvin–Helmholtz vortices into large coherent flow structures in a high Reynolds number flow past a wall-mounted square cylinder”. In : *Ocean Engineering* 204.July 2019, p. 107274. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2020.107274](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107274).
- MOREAU, M., G. GERMAIN, G. MAURICE et A. RICHARD (2022). “Sea states influence on the behaviour of a bottom mounted full-scale twin vertical axis tidal turbine”. In : *Ocean Engineering* 265.Under publication, p. 112582. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2022.112582](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112582).
- MYCEK, P., B. GAURIER, G. GERMAIN, G. PINON et E. RIVOALEN (2014). “Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour. Part I : One single turbine”. In : *Renewable Energy* 66, p. 729-746. DOI : [10.1016/j.renene.2013.12.036](https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.12.036).
- THIÉBAUT, M. et al. (2020). “A comprehensive assessment of turbulence at a tidal-stream energy site influenced by wind-generated ocean waves”. In : *Energy* 191. DOI : [10.1016/j.energy.2019.116550](https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116550).

Behaviour of a ducted twin vertical axis turbine in a diversity of experimental flow conditions

Martin Moreau^{a, b *}, Grégory Germain^b, Guillaume Maurice^a

a. HydroQuest SAS, 16 chemin de Malacher, 38240 Meylan, France.

b. LHyMar, IFREMER, 62200 Boulogne-sur-Mer, France.

* Corresponding author: martin.moreau@ifremer.fr

Key words: Tidal current, Shear, Misalignment, Turbulence, Waves

Summary: Over the past decade, several demonstrators have been tested around the world to harness the tidal stream energy [1]. In the locations identified for tidal energy projects, like the Paimpol-Bréhat test site, France, where *HydroQuest* tested its 1 MW-rated ducted twin vertical axis tidal turbine (2-VATT) demonstrator [2], the flow conditions are complex and combine multiple characteristics. This flow complexity is made of vertically sheared velocity profiles [3] with about 20% velocity difference between the top and the bottom of the 2-VATT capture area at Paimpol-Bréhat. In addition, the current direction varies between ebb and flood tides and over time [4]. The average ebb and flood tide directions at Paimpol-Bréhat are asymmetrical with about 22° difference, so the 2-VATT operated with 7° and 15° misalignment angles between its heading and the flood and ebb tide directions respectively. The ambient turbulence adds to the tidal current complexity, with eventually bathymetry-generated coherent vortices [5], and surface waves cause velocity fluctuations in the water column [6]. At Paimpol-Bréhat, the turbulence intensity was found to be about 15% for average velocities over $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ and the 2-VATT demonstrator faced severe sea conditions with wave heights up to about 6 m and peak periods up to 17s. Predicting accurately the influence of these flow conditions on the tidal turbines power generation and mechanical loads is crucial for a cost effective design. Numerous experimental studies addressed the effect of the above mentioned flow conditions on horizontal axis tidal turbines (HATT) at reduced scale [7, 8]. However, only a few considered vertical axis turbines in complex flow conditions, and most of them were dedicated to wind turbine applications [9].

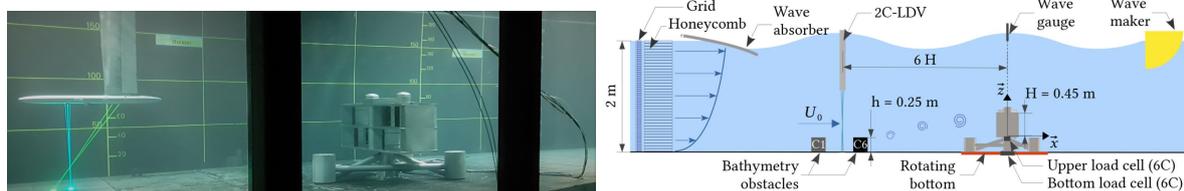


Figure 1: Ducted 2-VATT in the Ifremer wave and current tank, with the 3C-LDV probe upstream (on the left). Scheme of all the experimental setups (on the right).

To better understand separately the effect of the flow shear, the turbine misalignment with the flow direction, the bathymetry-generated turbulence and the presence of surface waves on the behaviour of a ducted 2-VATT, a 1/20 scale model of *HydroQuest*'s 1 MW-rated demonstrator is tested in the Ifremer's wave and current tank in all these flow conditions (Fig. 1) [10, 11, 12, 13]. The presentation summarizes the tested experimental conditions and the results in terms of power generation and structural loads to

identify the critical conditions from a design point of view. These results, compared to those obtained on the demonstrator at sea, also contribute to better qualify the scale effects from reduced scale experiments to full-scale operations and so to improve the design process for the next turbine generations. Overall, idealised experimental flow conditions are sufficient to assess the 2-VATT average power performance with an appropriate reference velocity choice and a Reynolds number effect correction. However, for an optimised mechanical structure design in terms of extreme and fatigue loads, the whole flow complexity must be considered to ensure the turbine integrity over its life time.

References

- [1] IEA-OES, “Annual report: An overview of ocean energy activities in 2022,” tech. rep., International Energy Agency, 2022.
- [2] M. Moreau, G. Germain, G. Maurice, and A. Richard, “Sea states influence on the behaviour of a bottom mounted full-scale twin vertical axis tidal turbine,” *Ocean Engineering*, 2022.
- [3] L. Furgerot, P. B. Du Bois, Y. Méar, M. Morillon, E. Poizot, and A. C. Bennis, “Velocity profile variability at a tidal-stream energy site: From short to yearly time scales,” in *OCEANS*, 2018.
- [4] P. Mercier and S. S. Guillou, “Spatial and temporal variations of the flow characteristics at a tidal stream power site: A high-resolution numerical study,” *Energy Conv. and Management*, 2022.
- [5] P. Mercier and S. Guillou, “The impact of the seabed morphology on turbulence generation in a strong tidal stream,” *Physics of Fluids*, vol. 33, p. 055125, may 2021.
- [6] A.-C. Bennis, L. Furgerot, P. Bailly Du Bois, E. Poizot, Y. Méar, and F. Dumas, “A winter storm in Alderney Race: Impacts of 3D wave–current interactions on the hydrodynamic and tidal stream energy,” *Applied Ocean Research*, vol. 120, no. December 2021, p. 103009, 2022.
- [7] 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*, p. 100061, may 2022.
- [8] S. Draycott, J. Steynor, A. Nambiar, B. Sellar, and V. Venugopal, “Rotational sampling of waves by tidal turbine blades,” *Renewable Energy*, vol. 162, pp. 2197–2209, 2020.
- [9] E. E. Lust, B. H. Bailin, and K. A. Flack, “Performance characteristics of a cross-flow hydrokinetic turbine in current only and current and wave conditions,” *Ocean Engineering*, 2021.
- [10] M. Moreau, G. Germain, and G. Maurice, “Experimental performance and wake study of a ducted twin vertical axis turbine at a 1/20th scale,” *Renewable Energy (Under review)*, 2023.
- [11] M. Moreau, G. Maurice, and G. Germain, “Experimental study of misaligned sheared flow effects on a ducted twin vertical axis tidal turbine,” *Applied Ocean Research (Under review)*, 2023.
- [12] M. Moreau, N. Bloch, G. Maurice, and G. Germain, “Experimental study of upstream bathymetry effects on a ducted twin vertical axis tidal turbine,” *Applied Energy (Under review)*, 2023.
- [13] M. Moreau, G. Germain, and G. Maurice, “Experimental investigation of surface waves effect on a ducted twin vertical axis tidal turbine,” *In preparation*, 2023.

Complémentarité des infrastructures d'essais, un retour d'expérience

Guillaume Maurice ^a Victor Wilk ^a Noe Marcon ^a

a. Hydroquest

* Corresponding author: guillaume.maurice@hydroquest.net

Mots clés: Hydrolienne, Hydroquest, Bassins d'essais

Résumé:

Depuis sa création en 2010, que ce soit pour des questions R&D, le développement de nouveaux prototypes ou des questions à plus court terme liés à des aspect opérationnels de projets particuliers, la société Hydroquest a toujours intégré une démarche essai au cœur de son processus de développement. Cette démarche s'est accélérée à partir de 2019 avec la mise en service du démonstrateur 1MW OceanQuest sur le site d'essai de Paimpol Brehat et le développement d'une nouvelle génération d'hydrolienne pour le projet de ferme pilote de 17.5MW au Raz Blanchard (projet Flowatt) Ainsi grâce au soutien de plusieurs projet nationaux [1] et européens [2], [3] Hydroquest a pu avoir accès ces quatre dernières années à un grand nombre d'infrastructures d'essais de qualité. Le bassin d'essai de circulation du laboratoire LHYMAR de l'Ifremer à Boulogne sur mer faisait naturellement partie de ces infrastructures de par sa proximité, la facilité d'installation des différentes maquettes testées et l'expertise reconnue sur l'hydrolien marin du bassin d'essais. En parallèle, Hydroquest noue une relation particulière avec le bassin d'essais du LHYMAR notamment via le financement de plusieurs thèses CIFRE visant à répondre à des questions de R&D liées à l'étude du comportement des hydroliennes dans diverses configurations d'écoulement.

Pour des besoins plus spécifiques, Hydroquest a fait appel au bassin d'essais de circulation de l'INM à Rome qui permet de dépressuriser la veine d'essai afin d'atteindre des conditions d'essais plus similaires à ce que pourrait rencontrer la turbine sur des sites commerciaux tel que le Raz Blanchard. Pour ces mêmes raisons Hydroquest a également fait appel au bassin d'essai flowave à Edinburg permettant de générer des houles multi directionnelles. Un intérêt particulier a notamment été porté sur la génération de conditions de houle perpendiculaires au courant moyen que l'on retrouve majoritairement dans le Raz Blanchard.

Enfin, Hydroquest a récemment testé en mars 2023 une maquette à l'échelle 1/9 représentative de la nouvelle génération d'hydrolienne OCEANQUEST 2.5 au bassin de traction de l'INM à Rome. Ces essais avaient pour but de connaître de manière fiable et reproductible les coefficients d'effort et de puissance de cette nouvelle turbine afin d'alimenter les phases d'ingénieries avancées.

References

[1] Ademe, "Démonstrateur hydrolien marin hydroquest ocean," 2021.

[2] Tiger, "Tidal stream industry energiser," 2020.

[3] HORIZON2020, "Marine renewable infrastructure network for enhancing technologies 2," 2021.

Étude des vitesses de courants dans la zone de Paimpol Bréhat pour des applications de dynamique sédimentaire dans un contexte de parc hydrolien

Alizée Durris^a, Mélanie Vah^{*,a}, Armelle Jarno^a, François Marin^a

a. Laboratoire LOMC, UMR 6294 CNRS, Université Le Havre Normandie, France

* Corresponding author: melanie.vah@univ-lehavre.fr

Key words ou Mots clés: ADCP, charriage, suspension, hydrophone, Paimpol Bréhat, modélisation physique, in-situ

Summary ou Résumé:

Dans le cadre de l'installation et de la mise en service de parcs hydroliens, il est nécessaire d'étudier la dynamique sédimentaire du lieu afin d'étudier l'impact mutuel entre l'environnement et le : le but est de récupérer de l'énergie dans un contexte où des conditions potentiellement sévères peuvent se produire, en présence de fonds sédimentaires mobiles peut entraîner des dégâts sur le parc. En effet des perturbations localisées dans le temps et l'espace lors de la pose des installations sont à étudier [1], tout comme des perturbations sous forme plus globale et sur le long terme en raison de la modification de l'écoulement à proximité du parc [2] [3].

Bien que les parcs hydroliens soient installés dans des zones à faible disponible sédimentaire mobilisable, il est nécessaire de quantifier le type de sédiment pouvant être mis en mouvement et en suspension avant et après l'installation du parc hydrolien.

Le traitement des données ADCP acquises au large de Paimpol Bréhat par HydroQuest et SEENEOH avec deux Nortek 500 a permis d'obtenir les vitesses d'écoulement sur deux mois entre Août et Octobre 2020 dans la zone du parc hydrolien. Ce type de capteur permet d'une part d'obtenir la pression et donc la hauteur de la colonne d'eau mais aussi les normes de vitesses selon les différents axes. L'étude des vitesses moyennées par période de 10 min a permis d'obtenir les vitesses de frottement au fond. Le diamètre des sédiments pouvant être mis en mouvement et mis en suspension au cours du temps a pu être déterminé théoriquement. Le pourcentage de temps pendant lequel chaque diamètre est en mouvement a ainsi pu être calculé. Une comparaison entre une période de 3.5 jours de vives eaux et 3.5 jours de mortes eaux est présentée en figure 1A dans le cas du charriage.

Ici on observe l'influence de la période de marée sur le type de sédiments pouvant se mettre en charriage et en suspension. On pourra alors anticiper mouvements de sédiments ainsi que les chocs possibles sur l'hydrolienne. La zone de Paimpol-Bréhat est une zone où les courants de flot sont dominants. L'étude de l'impact de cette asymétrie de courant a permis de montrer que pour un coefficient de marée équivalent, diamètre maximal pouvant être mis en mouvement par charriage ou en suspension est divisé par environ 2 entre le flot et le jusant (Figure 1B).

Afin de poursuivre cette étude, une méthode de validation par acoustique passive via un hydrophone est développée. En effet cette méthode est peu intrusive et permettrait des acquisitions sur des temps longs

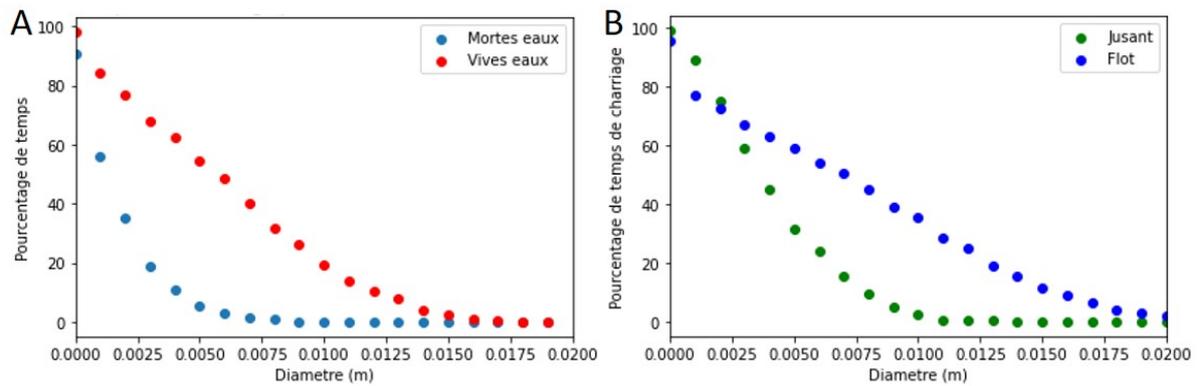


Figure 1: Evolution du pourcentage de temps de mise en mouvement des sédiments par charriage en fonction de leurs diamètres. A : Comparaison entre un cas mortes eaux et un cas vives eaux. B : Comparaison entre le flot et le jusant dans un cas de vives eaux.

(plusieurs mois) à haute fréquence afin de déterminer la taille des sédiments charriés, leur quantité ainsi que contribuer à l'identification des modifications induites par le parc sur la dynamique sédimentaire. Une modélisation physique a été réalisée dans un canal à courant afin d'établir un lien entre les données acquises par l'hydrophone et les mouvements sédimentaires observés. La valeur efficace du signal temporel acquis semble être un bon indicateur afin de quantifier la quantité de sable en mouvement par charriage [4]. L'analyse spectrale peut permettre de connaître le diamètre des sédiments en mouvement sur le fond. Cette méthode de suivi semble être une opportunité de mettre en place un suivi simplifié de l'impact d'un parc hydrolien sur les fonds marins qui pourrait compléter des campagnes ADCP qui elles permettent le suivi de l'écoulement.

References

- [1] B. Taormina, J. Bald, A. Want, G. Thouzeau, M. Lejart, N. Desroy, and A. Carlier, "A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, pp. 380–391, 2018.
- [2] S. P. Neill, E. J. Litt, S. J. Couch, and A. G. Davies, "The impact of tidal stream turbines on large-scale sediment dynamics," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2803–2812, 2009.
- [3] N. Guillou and J. Thiébot, "The impact of seabed rock roughness on tidal stream power extraction," *Energy*, vol. 112, pp. 762–773, 2016.
- [4] P. D. Thorne, "Laboratory and marine measurements on the acoustic detection of sediment transport," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 80, no. 3, pp. 899–910, 1986.

Remerciements

Les auteurs remercient le programme Interreg VA France (Manche) Angleterre via le projet TIGER ainsi que le LABEX EMC³ qui ont permis le financement de cette étude. Les auteurs remercient également SEENEOH et HydroQuest pour le partage des données ADCP via le consortium TIGER

Caractérisation du sillage d'hydroliennes dans le Pentland Firth à l'aide de mesures par ADCP mobile

M. Huchet^{*,a}, E. Droniou^a, L. Perez^a, F. Johnson^b, A. Baldock^c, B. Vermeulen^d, C. Boake^e

a. DynamOcean, Lannion, France

b. Projet MeyGen, Royaume-Uni

c. Baldock Energy, Royaume-Uni

d. Wageningen University & Research, Pays-Bas

e. Applied Renewable Research Ltd, Royaume-Uni

* Contact : marion.huchet@dynamocean.com

Mots clés : Hydrolienne, sillage, mesures in situ, ADCP mobile

Résumé :

Caractériser l'importance et l'extension spatiale du déficit de vitesse dans le sillage d'une hydrolienne en fonctionnement est d'un grand intérêt pour optimiser l'agencement des futurs parcs, car le sillage induit par une turbine en amont peut affecter considérablement les forces exercées sur une autre turbine en aval, et car une réduction de la vitesse incidente peut diminuer l'énergie récupérée à l'échelle du parc. Cet aspect est d'autant plus important à prendre en compte pour les projets prévoyant de nombreuses turbines. Le projet MeyGen est le plus grand projet de ferme hydrolienne prévu dans le monde : il vise à développer jusqu'à 398 MW de puissance installée dans le Pentland Firth, en Écosse, sur un site où les vitesses de courant peuvent atteindre jusqu'à 5 m/s. Pendant la phase 1 du projet, quatre turbines de 1,5 MW ont été installées. Des campagnes de caractérisation du site ont été menées lors de la phase 2 pour planifier le déploiement de turbines supplémentaires, offrant une occasion unique d'étudier, à l'échelle réelle, l'influence du fonctionnement des turbines déjà en place sur l'écoulement en aval.

Dans ce contexte, nous présentons une méthode pour caractériser le sillage d'hydroliennes à l'aide de mesures par profileur acoustique de courant à effet Doppler (ADCP) monté sur un navire. Lors de marées de vives eaux, des mesures de vitesse ont été effectuées avec un ADCP mobile de 600 kHz configuré avec une résolution verticale de 1 m, associé à un GNSS pour obtenir la localisation précise de ces mesures. L'objectif de cette étude était de cartographier l'écoulement en aval des turbines déjà installées sur le site et d'identifier leur sillage. Pour chaque turbine considérée, les mesures ont été réalisées le long de plusieurs sections définies perpendiculairement à la direction du courant. Leurs positions ont été choisies pour couvrir des distances à l'hydrolienne allant de 2 diamètres de turbine en amont à 14 diamètres en aval. Chaque section transversale est constituée de 5 passages consécutifs le long du tracé de consigne, pour une meilleure précision du résultat final. Toutes les sections ont été mesurées à la fois pendant le flot et pendant le jusant, avec la turbine en marche puis à l'arrêt pour repérer les différences introduites par le fonctionnement de l'hydrolienne.

Les données collectées ont été traitées avec un solveur de vitesse dédié à l'analyse de transects par ADCP mobile [1], afin de calculer la vitesse moyenne dans chaque section à un instant donné du cycle de marée. Ce solveur fournit des estimations de vitesse plus précises que celles obtenues par la méthode conventionnelle, qui associe les mesures des faisceaux divergents de l'ADCP par date de collecte pour obtenir la vitesse en un point donné. En effet, la méthode améliorée agrège les données de vitesse en fonction de leur position précise plutôt que de leur date de collecte, permettant de grouper les mesures effectuées au même endroit en différents instants, avant de calculer la vitesse moyenne. Ceci a pour conséquence de réduire fortement le volume de mesure et donc l'étendue spatiale sur laquelle l'homogénéité de l'écoulement doit être supposée, diminuant ainsi les chances que cette hypothèse soit erronée. Les résultats obtenus par cette méthode sont plus fiables et plus précis, et permettent également une cartographie plus fine de l'écoulement dans une section, ce qui est d'un grand avantage pour l'étude du sillage d'une hydrolienne. Ce solveur a déjà été utilisé pour des applications en rivière. Cependant, à la connaissance des auteurs, c'est la première fois que cette méthode est appliquée à la caractérisation de sillage sur un site hydrolien.

Dans le cas présent, la méthode permet d'obtenir l'amplitude et la direction de la vitesse moyenne dans chaque section transversale étudiée, avec une résolution horizontale de 5 m et une résolution verticale de 3 m. Dans chaque section, les composantes de vitesse dans la direction principale de l'écoulement sont comparées, pour les cas où la turbine est en marche et à l'arrêt. Le déficit de vitesse en aval est nettement marqué dans le cas où l'hydrolienne est en fonctionnement, permettant d'identifier clairement le sillage induit par la turbine et d'évaluer son étendue et sa trajectoire. L'influence du fonctionnement de l'hydrolienne sur l'écoulement reste visible jusqu'à 10 diamètres en aval de la turbine dans certains cas. Les résultats montrent également que le solveur amélioré fournit une cartographie de l'écoulement dans les sections transversales plus détaillée que la méthode conventionnelle, comme attendu puisque cette dernière a tendance à lisser les variations spatiales.

Au vu de ces premiers résultats, la méthode présentée ici apparaît ainsi comme un outil prometteur pour la caractérisation du sillage des hydroliennes.

Références

- [1] B. Vermeulen, M. G. Sassi, and A. J. F. Hoitink, "Improved flow velocity estimates from moving-boat ADCP measurements," *Water Resources Research*, vol. 50, pp. 4186–4196, May 2014.

Durabilité des matériaux utilisés pour l'hydrolien - De l'échantillon à la structure

P. Davies, M. Arhant*, N. Dumergue

Laboratoire SMASH, Ifremer

* Corresponding author: mael.arhant@ifremer.fr

Mots-clés: Structure, durabilité, matériaux, hydrolienne.

Résumé : Depuis plus de 30 ans, le laboratoire SMASH (Structures, Matériaux Avancés et Sollicitations Hyperbares) de l'Ifremer travaille sur la durabilité des matériaux polymères et composites en milieu marin dans différents domaines (océanographie, techno pêche, offshore, militaire, course au large). Depuis une quinzaine d'années, de nombreuses études visant à étudier le comportement à long terme des matériaux polymères pour l'hydrolien se sont succédées, plus particulièrement concernant les matériaux composites constituant les pâles d'hydrolienne ou les membranes ondulantes de quelques concepts. Trois grands volets ont permis l'étude de ces matériaux, allant du vieillissement en milieu marin au laboratoire, à l'instrumentation en mer ainsi qu'aux essais mécaniques réalisés à rupture sur pâles d'hydrolienne.

Dans un premier temps, les études se sont focalisées sur le comportement à long terme de matériaux composites de référence comme le carbone et le verre/époxy pour désormais être complétées par des recherches portant sur l'étude de matériaux plus respectueux de l'environnement (matériaux biosourcés, recyclables, réparables). Des campagnes expérimentales conséquentes ont été conduites, visant à caractériser la durabilité en milieu marin de ces matériaux ainsi que leur réponse face à des chargements complexes de type fatigue. Une courbe de fatigue illustrant les résultats de ces travaux est présentée en Figure 1.a. Ces travaux ont été obtenus dans le cadre du projet européen Realtide (H2020) et présente des résultats d'essais réalisés sur différents matériaux (Carbone/Epoxy, Carbone/Polyamide 6 et Carbone/Epoxy avec résine biosourcée). Dans un second temps, l'instrumentation en mer de ces structures a permis de valider les modèles de dimensionnement. Ces travaux ont été conduits auprès de deux entreprises, Sabella et Eel Energy à l'aide de loggers autonomes. Ces mesures ont permis d'étudier les déformations réelles auxquelles sont soumises ces structures en mer, un élément actuellement crucial pour la compréhension du milieu dans lequel évoluent les turbines. La Figure 1.b montre la membrane d'Eel Energy à l'échelle 1/6ème testée en 2017 en rade de Brest. Enfin, des essais sur pâles d'hydrolienne à échelle réelle ont été réalisés dans le laboratoire et ont permis de valider des calculs par éléments finis utilisés pour le dimensionnement. Des premiers essais sur spar ont été réalisés en 2014 sur une des pâles utilisées sur l'actuelle turbine Sabella D10. Ces essais visaient à vérifier la raideur du spar et a permis de valider le modèle éléments finis mis en place. Cet essai n'a cependant pas été réalisé jusqu'à rupture. Quelques années plus tard, de nouveaux essais à échelle réelle ont été réalisés jusqu'à rupture dans le cadre du projet européen Realtide (2020-2021). Pour ce faire, un banc d'essai spécifique a été conçu, réalisé et équipé de deux vérins de capacité 100 et 25 tonnes. Ces essais multi-instrumentés (jauges de déformation, fibres optiques, capteurs ultrasons, LVDT, capteurs à fils, etc.) ont été conduits à rupture

avec succès, et ont permis de mettre en évidence quelques points d'amélioration pour la suite des travaux.

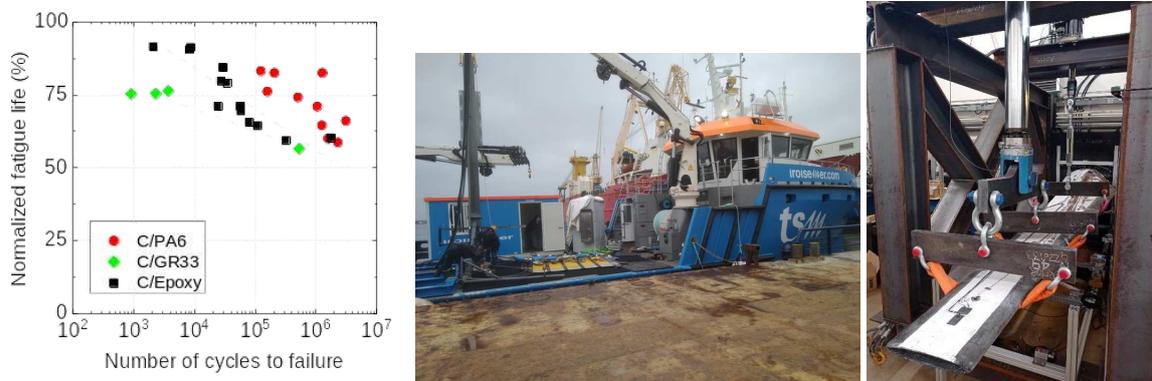


Figure 1: (a) Résultats d'essais de fatigue sur matériau de référence (C/Epoxy) et deux alternatives (C/Greenpoxy et C/PA6) (b) Membrane à l'échelle 1/6ème d'Eel Energy lors d'essais en mer (c) Pâle d'hydrolienne à l'échelle 1 au laboratoire SMASH de l'Ifremer.

Depuis une quinzaine d'années, plusieurs projets se sont succédés sur la durabilité des matériaux polymères et composites utilisés dans l'hydrolien. Une méthodologie d'étude du vieillissement en milieu marin a été mise en place afin de comparer de nouveaux matériaux à ceux de référence utilisés classiquement pour ces applications (carbone et verre/époxy). L'instrumentation en mer de ces hydroliennes a permis d'apporter quelques réponses quant aux chargements auxquelles celle-ci sont soumises. Des travaux conséquents restent cependant à conduire sur ce volet (récupération des données en temps réel, protection des systèmes de mesure, intégration de fibres optiques, etc.). Enfin, plusieurs travaux concernant la caractérisation à échelle réelle ont été présentés. Ces essais ont montré qu'il était possible de tester ces structures en laboratoire, de corrélérer les résultats aux modèles éléments finis mais ont également mis en évidence quelques points d'amélioration vis-à-vis du process de fabrication.

Simulation des grandes structures tourbillonnaires générées sur le fond marin

P. Mercier, S.S. Guillou, M. Grondeau
LUSAC Cherbourg, Université de Caen Normandie

Les marmites, grandes structures tourbillonnaires observées à la surface des sites à fort potentiel hydrolien, témoignent de l'intensité des phénomènes turbulents générés sur le fond marin (voir Figure 1). Ces tourbillons influencent la production des hydroliennes ainsi que leurs sollicitations mécaniques. Il est donc crucial, dans la perspective de l'installation de turbines, de mieux comprendre les processus de formation et d'évolution de la turbulence dans les courants de marée. Afin de prendre en compte la nature instationnaire de ces phénomènes, leur étude peut être réalisée à l'aide de la simulation des grandes échelles de la turbulence (LES). Cette méthode est utilisée à l'échelle expérimentale et à l'échelle d'un parc hydrolien, en utilisant la méthode de Boltzmann sur réseau (LBM).



Figure 1 : « Marmite » à la surface du Raz Blanchard. Photo Lucille Furgerot.

Les simulations à l'échelle expérimentale permettent une comparaison à des expériences réelles effectuées dans des conditions contrôlées [1,2]. L'étude du sillage d'obstacles de forme canonique permet de mieux comprendre la dynamique tourbillonnaire et de proposer des mécanismes génériques de formation et d'évolution des structures tourbillonnaires (voir Figure 2). Ces études peuvent jouer sur la forme, les dimensions, la succession d'obstacles, pour relier ces paramètres aux caractéristiques de la turbulence.

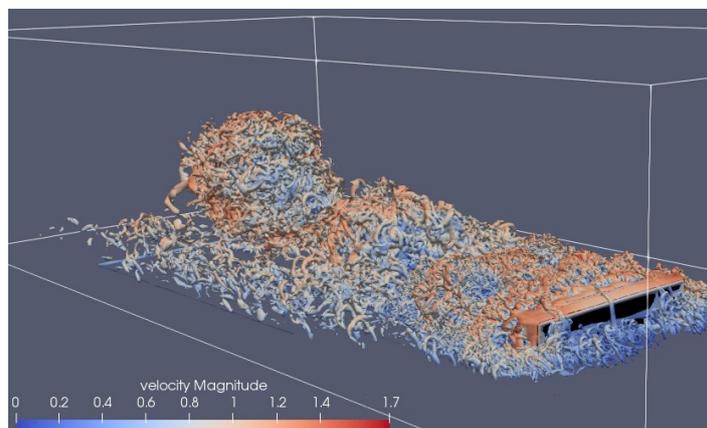


Figure 2 : Simulation numérique du sillage d'un obstacle canonique posé sur le fond. Cas du cylindre à base carré étudié au bassin de l'Ifremer à Boulogne-sur-Mer.

Des techniques de détection et de suivi automatique des tourbillons sont en développement pour simplifier l'étude de la dynamique tourbillonnaire et identifier des phénomènes d'interaction entre tourbillons qui peuvent être difficile à interpréter par visualisation directe (voir Figure 3).

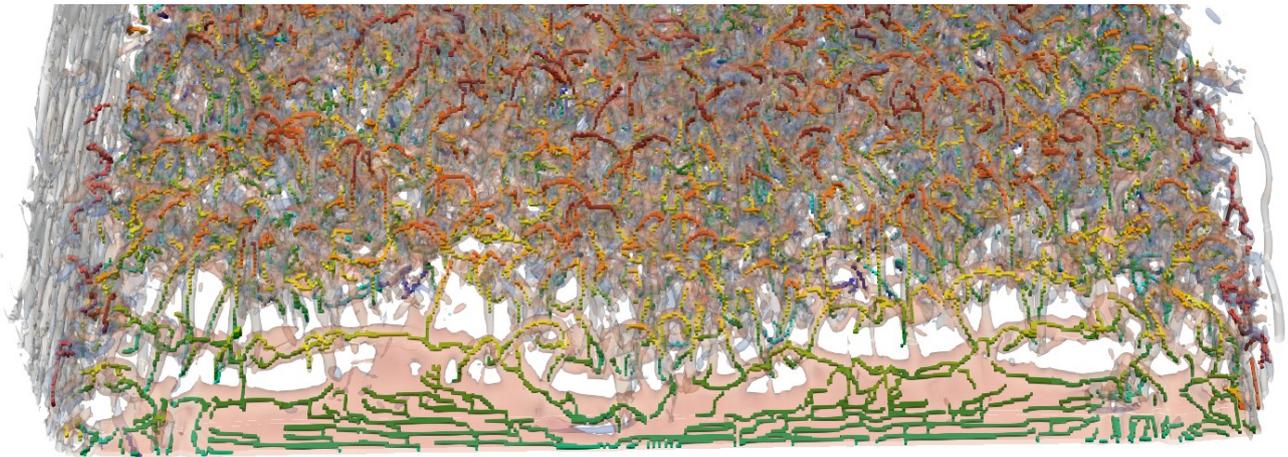


Figure 3 : Identification automatique de tourbillons dans le sillage d'un cylindre à base carrée.

Les simulations à l'échelle d'un parc hydrolien peuvent être validées par rapport à des mesures *in situ* [3]. Elles permettent de quantifier l'impact de la turbulence sur les turbines, sur des zones d'environ 0,5 km² (voir Figure 4). L'étude des variations spatiales des caractéristiques de l'écoulement permet d'identifier des zones propices ou non à l'installation d'hydroliennes [4]. En suivant dans le temps l'évolution de des structures tourbillonnaires, il est possible d'identifier les aspérités du fond marin susceptibles d'être à l'origine de marmites.

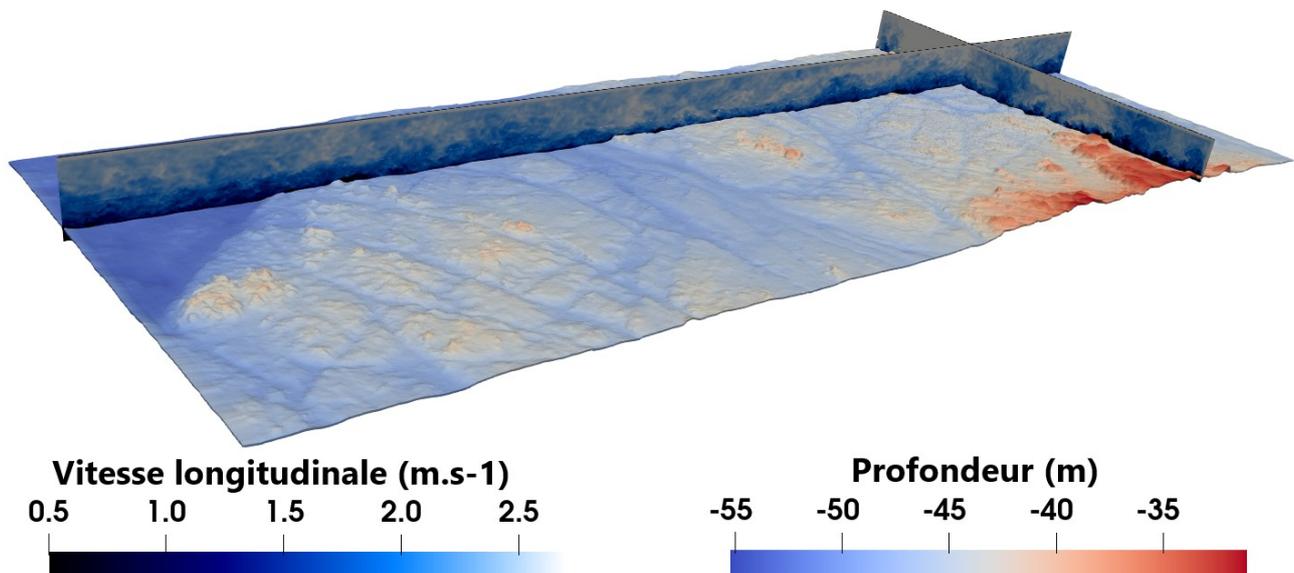


Figure 4 : Vitesse longitudinale instantanée du courant sur le site hydrolien de Paimpol-Bréhat. Simulation numérique LBM-LES.

- [1] Mercier, P.; Ikhennicheu, M.; Guillou, S.S.; Germain, G.; Poizot, E.; Grondeau, M.; Thiébot, J. & Druault, P. 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*, **2020**, 204.
- [2] Ikhennicheu, M.; Germain, G.; Druault, P. & Gaurier, B. Experimental study of coherent flow structures past a wall-mounted square cylinder. *Ocean Engineering*, **2019**, 182, 137-146.
- [3] Mercier, P.; Grondeau, M.; Guillou, S.; Thiébot, J. & Poizot, E. Numerical study of the turbulent eddies generated by the seabed roughness. Case study at a tidal power site. *Applied Ocean Research*, **2020**, 97.
- [4] Mercier, P. & Guillou, S.S. Spatial and temporal variations of the flow characteristics at a tidal stream power site: A high-resolution numerical study. *Energy Conversion and Management*, **2022**, 269.

Numerical computation of tidal turbines wake interaction using Dorothy LL-VPM

M.-A. Dufour^{a,d}, G. Pinon^{*,a}, E. Rivoalen^{a,b}, F. Blondel^c, G. Germain^d

a. Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC) - Normandie Université, CNRS, 76600 Le Havre

b. Laboratoire de Mécanique de Normandie (LMN) - INSA ROUEN, 76000 Rouen

c. IFP Energies Nouvelles, 1-4 Avenue de Bois Préau, Rueil-Malmaison, France

d. Laboratoire d'Hydrodynamique Marine, IFREMER, 62321 Boulogne-sur-Mer

* Corresponding author: gregory.pinon@univ-lehavre.fr

Key words: CFD, Lagrangian, VPM, Lifting-line, Tidal turbines, Wake interaction

Summary: Dorothy is an in-house numerical solver of Navier-Stokes equations in their velocity-vorticity formulation. It relies on the Lagrangian Vortex Particle Method (VPM) framework. This code has been developed thanks to a joint effort between LOMC from University of Le Havre Normandy, IFREMER and CNRS [1]. One of the assets of the present code is the ability to account for upstream turbulent flows by Choma Bex *et al.* [2].

At first, the code relied on a panel method for rotor blades representation which proved to reproduce accurately wake simulation [1] and interaction [3]. However, a need was felt for a methodology that provides both wake interaction and accurate blade loads results. This is the reason why a lifting-line representation of rotor blades has been developed and presented in Dufour *et al.* [4].

After having reminded the theoretical background of the Vortex Particle Method, the lifting-line specific implementation within the code Dorothy, LL-VPM, is thoroughly presented. The key aspect of shed particles position and vorticity weight is stressed on. More details about this LL-VPM development can be found in Dufour *et al.* [4].

Secondly, some of the validation results of the present LL-VPM are thoroughly presented. This focuses on the Mexnext-III wind turbine study with comparison to experimental and other numerical results at different TSR 's. Dorothy LL-VPM proved to perform accurately with respect to other codes.

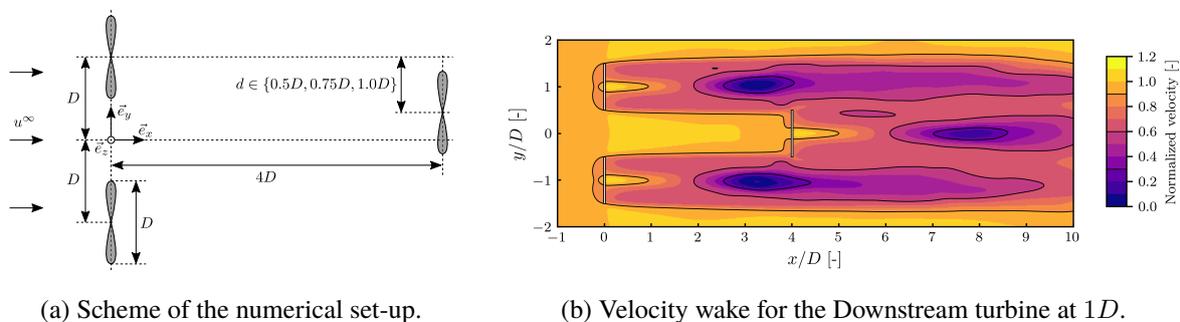


Figure 1: Numerical set-up and numerical wake for the downstream turbine at $1D$.

Eventually, a focus is led on the study of a three tidal turbine models in interaction with the Dorothy LL-VPM solver. It is based upon an experimental campaign conducted in IFREMER's wave and current

flume tank (see Gaurier *et al.* in [5]). Three positions d are studied for the downstream turbine: $1D$, $0.75D$ and $0.5D$ away from one of the upstream turbines rotation axis, as exhibited in fig. 1a. The first striking element is that wake expansion and length are similar between numerical, see fig. 1b, and experimental results [5]. The following main conclusions are drawn concerning the loads experienced by the downstream turbine:

- Averaged torque and thrust, and their relative variations with respect to downstream turbine positions, are in agreement between numerical and experimental results ;
- Numerical loads standard deviations are underestimated for positions $1D$ and $0.5D$. To the authors' opinion this is due to the absence of upstream turbulence in the computations ;
- For the $0.75D$ position, loads standard deviations are in agreement between numerical and experimental results. It shows that, at this specific position, the prominent effect driving loads fluctuations is the wake generated by the upstream turbine ;
- When experiencing a strong turbulent inflow, this means for positions $0.75D$ and $0.5D$, the Power Spectral Densities (PSD) of the numerical loads reproduces the $-11/3$ slope in the inertial range, as in experimental study [6].

References

- [1] G. Pinon, P. Mycek, G. Germain, and E. Rivoalen, "Numerical simulation of the wake of marine current turbines with a particle method," *Renewable Energy*, vol. 46, no. 0, pp. 111–126, 2012.
- [2] C. Choma Bex, C. Carlier, A. Fur, G. Pinon, G. Germain, and É. Rivoalen, "A stochastic method to account for the ambient turbulence in Lagrangian Vortex computations," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 88, pp. 38–54, 2020.
- [3] M. Slama, G. Pinon, Y. Ben Belkacem, C. Choma Bex, M. Togneri, and I. Evans, "Fluctuating loads perceived by the downstream turbine in a farm," in *Proceedings of the Fourteenth European Wave and Tidal Energy Conference* (D. Greaves, ed.), (University of Plymouth, UK), pp. 1–8, EWTEC, Sept. 2021.
- [4] M.-A. Dufour, G. Pinon, E. Rivoalen, F. Blondel, and G. Germain, "Development and validation of a lifting-line code associated to the Vortex Particles Method software Dorothy," *Submitted to Wind Energy*, 2023.
- [5] 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*, vol. 148, pp. 1150–1164, Apr. 2020.
- [6] 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*, vol. 181, pp. 1062–1080, Jan. 2022.

Evaluation of three numerical models for the simulation of tidal rotors

Federico Zilic de Arcos^{a,*}, Grégory Pinon^a,

a. Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, Normandie Univ, UNIHAVRE, CNRS LOMC-UMR
6294, Le Havre, France

* Corresponding author: federico.zilic@univ-lehavre.fr

Key words: Tidal turbines, Numerical models, CFD, Actuator Line, BEM

Summary:

Numerical modelling tools are required to study, design, and install marine energy devices. The availability of high-fidelity numerical models notwithstanding, industry and academia still rely on tools of different fidelities depending on their application, requirements, and computational cost limitations. This presentation will discuss some numerical models, apart from Dorothy, that are used by our research team to study tidal rotor hydrodynamics. The three discussed models rely on different assumptions, have very different computational costs, and have strengths that make them suitable for different applications.

Blade-resolved CFD simulations The most typical case of blade-resolved simulations used within our group is a steady-state Reynolds-Averaged Navier-Stokes CFD model that exploits the rotational symmetry of the problem. This allows modelling only one-third of the domain with periodic boundary conditions. The blade rotation in the context of steady-state simulations is achieved through the Multiple Reference Frame (MRF) approach of [1]. Typical simulations are performed with a $k-\omega$ SST closure for the momentum equations. This model agrees well with experiments and higher-order turbulence models (including Reynolds Stress Models and Large Eddy Simulations) for turbine applications in mean loads, pressures, and mean wake profiles (e.g., [2]). The example shown in the presentation corresponds to a 1.2 metres diameter tidal rotor designed by Cao [3]. The mesh targets a maximum $y^+ \sim 1$ to resolve the boundary layer and an isotropic blockage ratio of $\sim 3\%$. Typical uses of these simulations include the study of near-blade fluid mechanics and forces. These are often used for comparison with lower-order engineering models. Advanced flow-sampling methods can also be employed to extract spanwise lift and drag coefficients [4] used later in models based on blade-element theory [5]. The computational cost of such simulations is high but manageable with the steady-state approach. Transient simulations, however, can become prohibitively expensive.

BEM model BEM-based models are the standard in engineering practice to determine loads and power performance on tidal rotors. Nevertheless, our research demonstrated substantial deficiencies in common BEM models to predict loads and especially power performance on highly-loaded axial rotors. The deficiencies are normally observed as an underestimation of power and thrust across most of the span of the blade, and an overestimation of near-tip loads. The deficiencies are related to the corrections on the momentum equation for high-thrust regimes, and tip-loss models. Our recent research includes a

re-examination of the basic principles of BEM theory, and a proposal for improvements, including a new turbulent wake model that substantially improves thrust and power predictions. The cost of BEM-based models is low and even dynamic BEM codes can run on personal computers. However, they are strongly limited in the physics that the models can capture, including phenomena relevant to tidal rotors such as blockage, multi-rotor interactions, wakes, etc.

Actuator-line CFD models The actuator-line model is a rotor representation in the context of a CFD model. Rotor blades are modelled through sets of collocation points [6] arranged over lines. Body forces are smeared onto the flow as momentum sources on each collocation point, with forces determined through blade-element theory. The local inflow and angle of attack, required for sectional force computations, are determined by sampling the flow. Our recent research modified the traditional flow-sampling method used in AL models [6] to determine the local angle of attack, which is based on sampling the velocity at the collocation point, by the Line Average method [7]. This method samples the flow over sets of symmetrically-arranged points around the collocation and outside the region where forces are applied, assuming that the flow speed averaged over a closed segment around the blade would cancel the velocities induced by the bound circulation. This improved methodology has increased the accuracy and robustness of our computations, reducing the dependency of the model on the characteristics of the force Gaussian, as well as on temporal and spatial discretisation parameters [8]. These models have a high yet manageable computational cost that can enable the computation of dynamic flow phenomena. The actuator-line model has been used by our group to study transient flow effects such as non-isotropic blockage and wave-current interaction effects on tidal rotors.

References

- [1] J. Y. Luo and A. D. Gosman, "Prediction of impeller-induced flow in mixing vessels using multiple frames of reference," INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS SYMPOSIUM SERIES, 1994.
- [2] M. Shives and C. Crawford, "Adapted two-equation turbulence closures for actuator disk RANS simulations of wind & tidal turbine wakes," *Renewable Energy*, vol. 92, pp. 273–292, July 2016.
- [3] B. Cao, *Hydrodynamic design of multi-rotor tidal array*. PhD thesis, University of Oxford, 2020.
- [4] F. Zilic de Arcos, C. Vogel, and R. H. J. Willden, "Extracting angles of attack from blade-resolved rotor CFD simulations," *Wind Energy*, vol. 23, no. 9, pp. 1868–1885, 2020.
- [5] A. Wimshurst and R. H. J. Willden, "Extracting lift and drag polars from blade-resolved computational fluid dynamics for use in actuator line modelling of horizontal axis turbines," *Wind Energy*, vol. 20, pp. 815–833, May 2017.
- [6] J. N. Sorensen and W. Z. Shen, "Numerical modeling of wind turbine wakes," *J. Fluids Eng.*, vol. 124, no. 2, pp. 393–399, 2002.
- [7] E. Jost, L. Klein, H. Leipprand, T. Lutz, and E. Krämer, "Extracting the angle of attack on rotor blades from CFD simulations," *Wind Energy*, vol. 21, no. 10, pp. 807–822, 2018.
- [8] M. Zormpa, F. Zilic de Arcos, X. Chen, C. R. Vogel, and R. H. J. Willden, "The effect of flow sampling on the robustness of the actuator line method," *Wind Energy*, 2023. To be submitted.

La simulation numérique chez HydroQuest

Nathanaël Guillaud^{*,a}, Matthieu Guilbot^a a. HydroQuest

* Corresponding author : nathanael.guillaud@hydroquest.net

Mots clés : Hydroliennes à flux transverse, simulations URANS pales résolues.

Résumé :

La société HydroQuest est un acteur majeur de l'hydrolien marin avec une solution innovante d'hydrolienne marine basée sur un concept de turbines à axe vertical et flux transverse. En 2019, un premier démonstrateur d'hydrolienne marine d'une puissance unitaire de 1 MW a été testé durant 2 années consécutives sur le site d'essais EDF de Paimpol-Bréhat (projet OceanQuest). Forte de cette expérience réussie, HydroQuest projette désormais le déploiement d'une ferme pilote de 7 machines installées au Raz-Blanchard pour une puissance totale de 17,5 MW (projet FloWatt).

Les hydroliennes à flux transverse étant le siège de phénomènes hydrodynamiques complexes, la prédiction et l'amélioration continue de leurs performances nécessitent des outils numériques performants. Dans un cadre industriel, un bon compromis doit être trouvé entre précision des résultats obtenus et coût de calcul. La démarche de modélisation numérique d'une hydrolienne mise en place à HydroQuest sera présentée. Cette dernière s'organise en deux axes principaux.

Le premier consiste à optimiser la géométrie de l'hydrolienne suivant plusieurs critères (coefficient de puissance, d'efforts...). Une modélisation numérique permettant de classer différentes géométries est alors nécessaire. Une vague de comparaison avec des essais ont permis de montrer que les simulations URANS 2D permettent de répondre à cet objectif.

Le deuxième axe consiste à fournir des données d'entrées aussi précises que possible pour le dimensionnement des hydroliennes une fois la géométrie choisie. Une méthode de correction des résultats des simulations URANS 2D par rapport aux essais a été mise en place et permet d'améliorer la précision des résultats des simulations.

Modélisation de l'interaction entre hydroliennes avec la méthode de Boltzmann sur réseau

Mikaël Grondeau ⁽¹⁾ et Sylvain Guillou ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg (LUSAC), University of Caen, Cherbourg-en-Cotentin, France

Les hydroliennes sont des dispositifs qui exploitent l'énergie contenue dans les courants de marée de grandes intensités que l'on trouve par exemple dans le raz Blanchard au large du Cotentin. Plusieurs concepts d'hydrolienne existent et nous nous intéressons ici à la machine à axe vertical développée par l'entreprise HydroQuest.

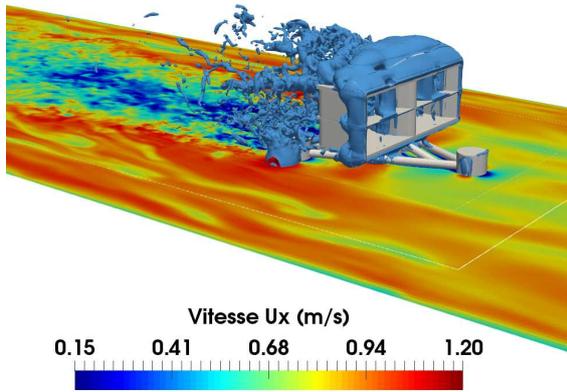


FIGURE 1 – Simulation ALM-LBM-LES de la maquette HydroQuest.

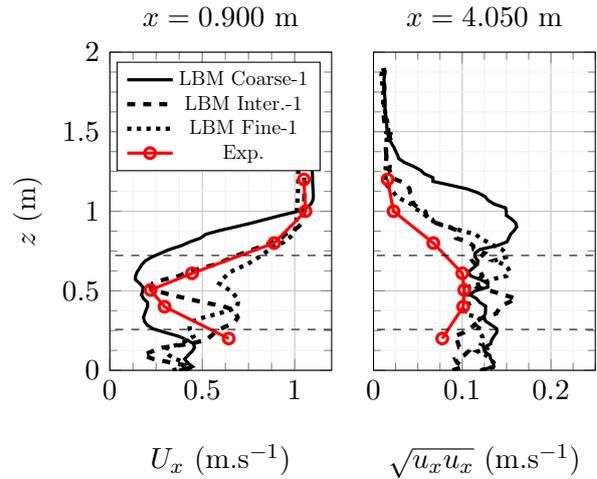


FIGURE 2 – Vitesse et fluctuations moyennes dans le sillage de la maquette HydroQuest. Profils en $y = 0.31$ m. Configuration *Flood*.

Les courants exploitables par les hydroliennes sont très localisés et les sites hydroliens de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres carrés, une exploitation industrielle passera donc très probablement par la création de fermes d'hydroliennes. Il est attendu que les turbines interagissent entre elles et qu'il soit nécessaire d'optimiser leur placement afin de maximiser l'énergie produite.

L'une des approches pour prédire les interactions au sein d'un parc hydrolien consiste à modéliser des fermes hydroliennes avec des méthodes numériques. Dans notre étude, des fermes constituées de 3 ou 4 prototypes HydroQuest sont modélisées avec une approche basée sur la méthode de Boltzmann sur réseau (LBM), la méthode des lignes actuatrices (ALM) et la modélisation des grandes échelles de la turbulence (LES) [1]. Notre approche utilise la librairie open-source Palabos [2]. La turbulence est générée en amont de la turbine par la méthode des tourbillons synthétiques (SEM) [4].

La méthode ALM-LBM-LES est d'abord validée avec les résultats expérimentaux de Moreau *et al.* (2022) [3]. La turbine en question est une maquette 1/20^{ème} du prototype HydroQuest visible sur la Figure 1 et présentée en détail dans [3]. On étudie uniquement la disposition *Flood* de la machine. Plusieurs maillages sont testés afin d'évaluer la sensibilité de la méthode à la taille de maille. Le Tableau 1 résume les différents maillages. Des profils de la vitesse moyenne à $x = 0.9$ et 4.05 m en aval de la machine sont tracés sur la Figure 2. Les fluctuations de la vitesse moyenne sont surestimées par les trois maillages. Cependant, l'erreur diminue lorsque la résolution augmente et l'approche ALM-LBM-LES fournit des résultats corrects dès le maillage Inter.-1.

TABLE 1 – Maillages utilisés pour les simulations ALM-LBM-LES.

Config.	Δx (m)	Noeuds
Gross.-1	$1.25 \cdot 10^{-2}$	$12.3 \cdot 10^6$
Inter.-1	$6.25 \cdot 10^{-3}$	$37.0 \cdot 10^6$
Fin-1	$4.17 \cdot 10^{-3}$	$124.7 \cdot 10^6$

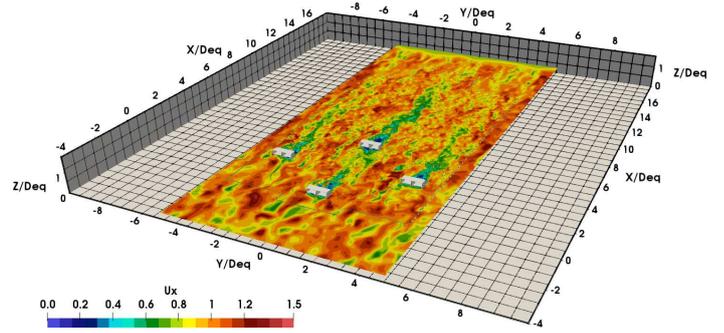


FIGURE 3 – Modélisation de 4 hydroliennes avec la méthode de Boltzmann sur réseau. Vitesse axiale instantanée.

Des simulations de petites fermes du prototype HydroQuest à échelle 1 sont ensuite réalisées. Les détails du modèle sont donnés dans [1]. Trois dispositions alignées et trois dispositions en quinconce sont étudiées. Les espacements longitudinaux considérés sont 50, 100 et 150 m. Une analyse des sillages et puissances produites est effectuée. La Figure 3 illustre une ferme de 4 machines modélisées avec l’approche ALM-LBM-LES. Dans le cas où les trois turbines sont alignées on observe une accumulation du déficit de vitesse, même avec un espacement inter-machine de 150 m. La puissance produite par la troisième turbine est alors réduite de moitié par rapport à la première. Les observations faites sur les simulations en quinconce révèlent que l’interaction des sillages dans la direction y est faible pour les trois distances considérées.

Références

- [1] Mikaël GRONDEAU et al. « Wake of a Ducted Vertical Axis Tidal Turbine in Turbulent Flows, LBM Actuator-Line Approach ». en. In : *Energies* 12.22 (nov. 2019), p. 4273. ISSN : 1996-1073. DOI : 10.3390/en12224273. URL : <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/22/4273> (visité le 07/01/2021).
- [2] Jonas LATT et al. « Palabos : Parallel Lattice Boltzmann Solver ». en. In : *Computers & Mathematics with Applications* 81 (jan. 2021), p. 334-350. ISSN : 08981221. DOI : 10.1016/j.camwa.2020.03.022. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0898122120301267> (visité le 31/05/2023).
- [3] M. MOREAU et al. « Experimental study of two opposed flow directions effect on a ducted twin vertical axis tidal turbine ». In : *Trends in Renewable Energies Offshore*. 1^{re} éd. Taylor & Francis, 2022, p. 7. ISBN : 978-1-00-336077-3.
- [4] R. POLLETO, T. CRAFT et A. REVELL. « A new divergence free synthetic eddy method for the reproduction of inlet flow conditions for LES ». In : *Flow, Turbulence and Combustion* 91.3 (2013), p. 519-539.

Predicting turbulence intensity and velocity in tidal turbine farms: An empirical model-based approach

Kabir B. Shariff* and Sylvain S. Guillou

Normandie Université, UNICAEN, LUSAC, EA4253, 60 rue Max Pol Fouchet, 50130,
Cherbourg-Octeville, France

* Corresponding author: kabir-bashir.shariff@unicaen.fr

Keywords: Tidal farm, wake, empirical model, turbulence, power

Summary:

Several studies have been dedicated to investigating the wake effect in tidal farms with an emphasis on velocity deficits. However, full-scale experimental campaigns are limited and largely confidential. The reduced models, while not replicating the complex tidal currents, are used to provide agreeable results. Various numerical models are developed to simulate the wake of tidal turbines with highly accurate results. However, simulating full-scale turbine parks is still quite expensive.

Consequently, researchers devise a low computational analytical/empirical model to estimate the turbine wake. These models are developed from self-similar flow characteristics and are mainly used for estimating the far wake region. Over time, the analytical models developed from a simple top-hat model to more accurate artificial intelligence (AI) models to estimate the velocity deficit in the wind farm. These analytical models required calibration for highly turbulent shallow water tidal turbines [1]. However, these models do not take into account the added turbulence in the wake which may be non-negligible depending on the position of the downstream turbine. An added turbulence model for a full-scale tidal turbine is proposed by the authors [2] for different ambient turbulence. This model is later implemented in a simple tidal park with ideal hydrodynamics similar to the Alderney Race [3].

The rotor diameter to depth (DH) ratio is the area the rotor covered along the vertical plane. This study presents a generic model for estimating the velocity deficit and turbulence intensity in a tidal turbine farm. The proposed model considers a range of the rotor DH ratio and thrust coefficient in realistic applications. The velocity deficit is evaluated using effective turbulence considering the local added turbulence at the turbine location. The generic model is compared with experimental data at different DH ratios and shows acceptable results, especially in the far wake.

In this study, we consider a tidal park comprising 16 tidal turbines in both in-line and staggered configurations with hydrodynamics similar to that of the Raz Blanchard. A rotor of 20 m diameter is selected for the farm which is the size of AR2000 of Simec-Atlantis turbine. The turbine spacing is 7 D and 4 D in longitudinal and lateral directions respectively. This turbine spacing will ensure wake recovery and flow acceleration from the upstream turbine. The turbine-wake interaction is evaluated using the superposition method in terms of kinetic energy deficit and turbulence energy.

The normalized velocity contour at different array configurations shows upstream turbines produce maximum power as they are not affected by the prior wake interaction. A comparison of power produced by each turbine in the rectilinear and staggered array using the empirical model shows that the upstream turbine produces identical power output irrespective of the turbine configuration. The downstream turbine is affected by the wake, therefore, producing less power. The total amount of power produced by the

rectilinear and staggered parks is 22.1 MW and 28.1 MW, respectively. For a given farm size, the staggered configuration generates 6 MW more power than the in-line configuration due to sufficient wake recovery spacing. The results show the added turbulence effect is significant in a rectilinear array as a consequence of limited turbine spacing.

It is noted from the contour plot that the rectilinear array identifies each turbine row independently since no interaction between turbine rows is spotted whereas the staggered configuration shows the wake interaction in both longitudinal and lateral directions. Thus, the spacing can be reduced without affecting the efficiency of the farm. But, what is the minimal turbine spacing that barely diminishes the output power?

To demonstrate, the lateral spacing is reduced from $4D$ to $2D$ while maintaining the longitudinal spacing of $7D$. The cumulative power in the farm remains 22.1 MW for the different lateral spacing. However, a wake interaction effect is spotted between the turbine rows. In reality, there may be some slight difference as the model evaluate the power using the centerline velocity instead of the average velocity across the rotor. Similarly, in the staggered array, the longitudinal spacing is reduced from $7D$ to $5D$ (i.e. the effective inline spacing is reduced from $14D$ to $10D$) while maintaining the lateral distance of $4D$. The total power extracted from the farm dropped from 28.1 MW to 27.1 MW. The 3.1% reduction in efficiency can be tolerated in regard to the reduction in the farm size. Reducing the farm size whilst maintaining efficiency is essential because it will drastically reduce cable costs and will present an opportunity for future expansion of the farm.

The effect of the rotor DH ratio is also investigated. The results show at a low DH ratio, the wake expansion is higher and the interaction is higher. The power produced by the downstream turbine decreases with an increase in the DH ratio. The total farm power P_{farm} at DH20, DH40, and DH60 is 29.8 MW, 28.1 MW, and 26.9 MW respectively. In a low rotor diameter-to-depth ratio (i.e. DH20), the wake recovery process is faster as the flow in the bypass region is sufficient to cause mixing between the low velocity at the rotor's core and the ambient flow in the bypass region. However, at a high DH ratio (i.e. DH60), the velocity deficit along the rotor is substantial compared to the free stream flow in the bypass region, therefore lagging the wake recovery to the upstream condition. This implies that for an identical turbine size, the power extracted can vary with the channel depth.

To conclude, this generic model can provide insight into the power production in tidal farms under different conditions. The effect of ambient conditions on the turbine farm will be presented in the subsequent work of the authors. The next step is to validate the model with a full-scale pilot farm and then optimize the turbine position for maximum power production using a multi-objective algorithm.

References

- [1] O. A. Lo Brutto, V. T. Nguyen, S. S. Guillou, J. Thiébot, and H. Gualous, "Tidal farm analysis using an analytical model for the flow velocity prediction in the wake of a tidal turbine with small diameter to depth ratio," *Renewable Energy*, vol. 99, 2016.
- [2] K. B. Shariff and S. S. Guillou, "An empirical wake model accounting for the velocity deficit and turbulence intensity in a simple tidal park," in *18è Journées de l'Hydrodynamique*, (Poitiers), Nov. 2022.
- [3] K. B. Shariff and S. S. Guillou, "An empirical model accounting for added turbulence in the wake of a full-scale turbine in realistic tidal stream conditions," *Applied Ocean Research*, vol. 128, 2022.

Caractérisation de la variabilité temporelle des courants de marée du Raz Blanchard par analyse harmonique et modélisation numérique

Jérôme Thiébot ^{*,a}, Sylvain Guillou ^a, Nicolas Guillou ^b

a. LUSAC, EA4253, UNICAEN, 60 rue Max Pol Fouchet, 50130, Cherbourg-en-Cotentin, France

b. Cerema, Direction Risques, Eau et Mer, HA, Laboratoire de Génie Côtier et Environnement (LGCE), Technopôle Brest-Iroise, 155 rue Pierre Bouguer, BP 5, 29280, Plouzané, France

* Corresponding author: jerome.thiebot@unicaen.fr

Mots clés : Ressource hydrolienne, Cycle de Saros, Analyse harmonique, Modélisation numérique, Telemac, Raz Blanchard, Passage du Fromveur, Ramsey Sound

Résumé :

L'estimation de la variabilité spatiale et temporelle des courants marins est une étape importante d'un projet hydrolien. Dans cette étude, nous nous concentrons sur la variabilité temporelle. Cette dernière est en grande partie liée aux interactions entre les différentes ondes de marée, ce qui a déjà fait l'objet de nombreuses études (e.g. [1]) portant sur les mécanismes contrôlant l'évolution des courants à court terme tels que les asymétries flot-jusant, les inégalités diurnes, les cycles de morte eau - vive eau... Il existe en revanche peu d'études sur l'évolution des courants sur le long terme. Pourtant, les caractéristiques de la marée changent sur cette échelle de temps. En effet, l'inclinaison de l'orbite de la Lune par rapport à l'équateur évolue au cours d'un cycle de 18,6 années (cycle de Saros). Ainsi les forces génératrices de la marée changent au cours de ce cycle ce qui engendre des modifications très lentes de l'amplitude et de la phase des ondes lunaires. Dans les analyses harmoniques, cela est pris en compte avec des corrections nodales, i.e. des modifications d'amplitude et de phase.

L'objectif de cette étude est de quantifier l'influence du cycle de Saros sur la variabilité interannuelle de la ressource hydrolienne en étudiant trois sites : le Raz Blanchard dans la Manche, le passage du Fromveur en mer d'Iroise et le Ramsey Sound en mer d'Irlande. Dans un premier temps, la variabilité est étudiée à partir d'analyses harmoniques basées sur l'outil Matlab UTide. Dans un second temps, elle est estimée à partir de prédictions numériques effectuées avec le code Telemac3D. L'indicateur retenu pour estimer la ressource est la densité de puissance annuelle (APD : Annual Power Density) qui est une fonction de la vitesse des courants au cube :

$$APD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho U(t_i)^3 \quad (1)$$

où n est le nombre d'instant (notés t_i) dans une année, ρ est la masse volumique de l'eau de mer et U est la vitesse du courant.

L'analyse harmonique réalisée sur les trois sites avec UTide a permis d'identifier entre 29 et 35 composantes harmoniques et a montré que les courants de marée sont très largement dominés par l'onde M_2

([2]). UTide a ensuite été utilisé pour prédire les courants sur la période 2014-2033. Puis, à partir de ces prédictions, nous avons calculé la variabilité interannuelle de l'APD. Les résultats montrent que la variabilité est comparable pour les trois sites et qu'elle atteint $\pm 10\%$ (Figure 1,[3]). Comme l'onde M_2 prédomine largement, c'est la correction nodale de l'amplitude de cette onde qui contrôle en grande partie la variabilité de l'APD.

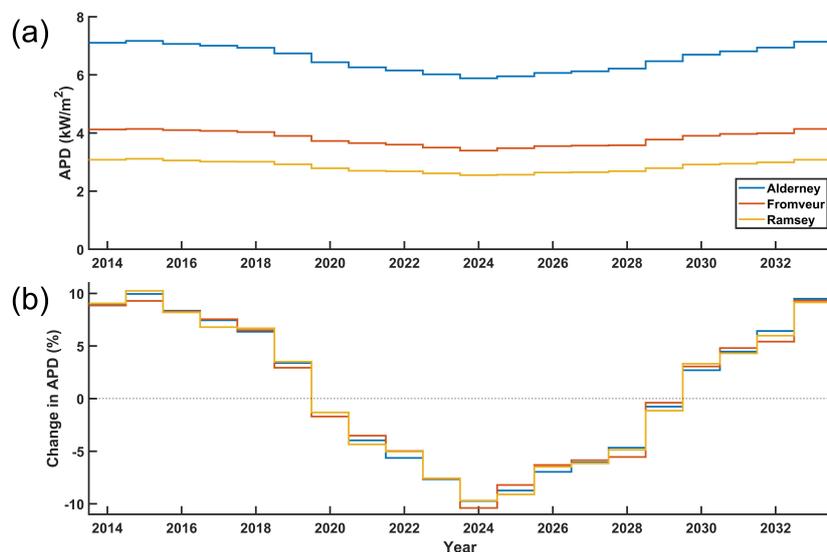


Figure 1: (a) Evolution de l'APD sur la période 2014-2033) ; (b) Ecart par rapport à la moyenne ([3]).

En négligeant l'influence des corrections nodales sur les phases (elle est très faible car les corrections ne dépassent pas 1°), la variabilité de l'APD peut s'expliquer simplement : comme les vitesses de courant associées aux ondes i sont multipliées par des facteurs nodaux a_i et que la densité de puissance est fonction du cube de la vitesse, la variation de l'ADP dépend des facteurs nodaux au cube (a_i^3). Cette façon de faire permet certes d'obtenir une première estimation de la variabilité mais elle repose sur un modèle simplifié (une analyse harmonique) et utilise une hypothèse de linéarité. Pour évaluer l'influence de cette hypothèse, nous avons donc complété l'analyse en estimant la variabilité avec un modèle numérique (non linéaire). Nous avons utilisé une configuration de Telemac3D qui a été calibrée et validée avec un large jeu de données acquis dans le Raz Blanchard et nous avons réalisé plusieurs simulations à différents moments du cycle de Saros. La variabilité de l'APD ainsi estimée est de l'ordre de $\pm 6\%$ ce qui reste élevé et montre l'importance du choix de la période retenue pour caractériser la ressource hydrolienne.

References

- [1] P. Robins, S. Neill, M. Lewis, and S. Ward, "Characterising the spatial and temporal variability of the tidal-stream energy resource over the northwest european shelf seas," *Applied Energy*, vol. 147, pp. 510–522, 2015.
- [2] J. Thiébot, S. Guillou, and E. Droniou, "Influence of the 18.6-year lunar nodal cycle on the tidal resource of the alderney race, france," *Applied Ocean Research*, vol. 97, p. 102107, 2020.
- [3] J. Thiébot, N. Guillou, D. Coles, and S. Guillou, "On nodal modulations of tidal-stream energy resource in north-western europe," *Applied Ocean Research*, vol. 121, p. 103091, 2022.

Bassin d'essais à houle et courant de l'Ifremer

JV. Facq*, G. Germain, G. Gaurier, B. Gomez

Laboratoire d'Hydrodynamique Marine, Ifremer

* Corresponding author: jvfacq@ifremer.fr

Mots-clés: Essais hydrodynamique, houle, courant, LDV, PIV.

Résumé : Le Laboratoire d'Hydrodynamique Marine (LHyMar) fait parti de l'unité Recherches et Développements Technologiques de l'IFREMER. L'unité contribue aux développements technologiques nécessaires à l'exploration et l'exploitation durable des océans et à la surveillance de l'environnement depuis le littoral jusqu'aux grandes profondeurs. Dans ce cadre, le LHyMar contribue à l'amélioration des connaissances sur le comportement des structures en mer pour :

- quantifier les conditions de fonctionnement des structures (vent, vagues, courant) à partir de modélisations déterministes et statistiques ;
- modéliser les interactions fluide/structure et les comportements induits au travers d'études expérimentales mettant en œuvre les moyens d'essais en hydrodynamique (bassin à houle et courant de Boulogne/mer, le canal à houle à Brest, bassin à houle et vent de Brest, site d'essais in-situ de Sainte-Anne du Portzic), et d'interprétations de mesures in situ ou de simulations numériques.

Les principales thématiques de recherche couvrent : les énergies marines renouvelables, l'hydrodynamique navale, les interactions fluide/structure, les interventions grandes profondeurs, via notamment des partenariats public/privé et universitaires. Grâce à ses grandes dimensions, le bassin d'essais à houle et

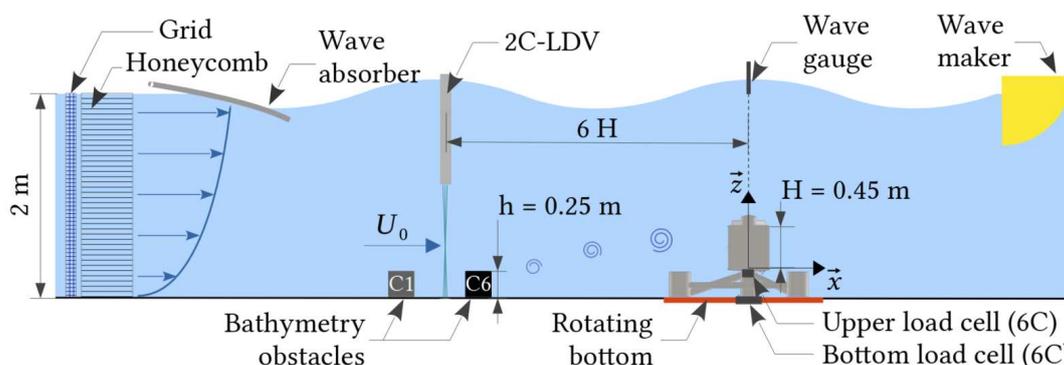


Figure 1: Exemple de dispositif expérimental permettant d'étudier les effets cumulés de la houle, du profil vertical de vitesse, de la turbulence sur le comportement d'une hydrolienne à l'échelle 1/20.

courant de l'Ifremer permet d'étudier, sur le comportement des maquettes d'hydrolienne en terme de performances et de caractéristiques de l'écoulement (induction, sillage), les effets :

- du profil vertical de vitesse de l'écoulement incident (jusqu'à 2m/s) [1];
- de l'orientation de la machine par rapport au courant incident (0 à 360°) [2];
- des fluctuations de vitesse de l'écoulement imposé (turbulence homogène, émission de structures tourbillonnaires dans le sillage d'un obstacle de fond) [3];
- de la présence de la houle (avec et contre-courant), de fréquence entre 1 et 2,5s et d'amplitude maximale de 12 cm [4].

L'instrumentation disponible au bassin d'essais permet d'acquérir des bases de données expérimentales indispensables pour la validation des modèles numériques développés en parallèle pour simuler le comportement des hydroliennes dans leur milieu. Ces modèles sont utilisés pour optimiser les parcs de machines, estimer le potentiel énergétique d'un site d'exploitation, mais également pour étudier les effets d'interaction avec les écosystèmes, des mesures in-situ permettant d'asseoir l'ensemble de ces travaux [5].

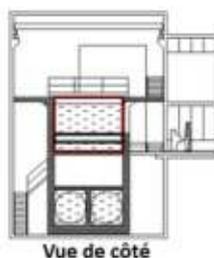
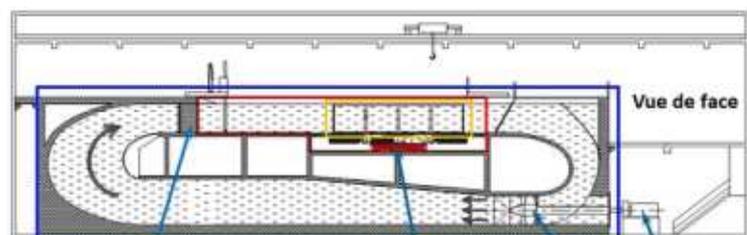
Les thèses co-encadrées au LHyMar Boulogne/Mer, dédiées aux EMR, sont les suivantes :

- Maganga F. : Caractérisation numérique et expérimentale des effets d'interaction entre une hydrolienne et le milieu marin, co-financée Région Haute-Normandie/Ifremer, 2011.
- Mycek P. : Caractérisation numérique et expérimentale des effets d'interaction fluide/structure entre hydroliennes, co-financée Région Haute-Normandie/Ifremer, 2013.
- Déporte A. : Caractérisation du fonctionnement d'une membrane ondulante pour récupérer l'énergie des courants marins, co-financée ADEME/Eel Energy, 2016.
- Carlier C. : Simulation du comportement d'hydroliennes dans des conditions de fonctionnement réalistes, co-financée Région Haute-Normandie/Ifremer, 2017.
- Trasch M. : Caractérisation expé/num. du comportement hydrodynamique d'une hydrolienne à membrane ondulante, co-financée ADEME/Eel Energy, 2019.
- Ikhennicheu M. : Etude expérimentale de la turbulence présente dans les sites fortement énergétiques dédiés aux EMR, co-financée Région Hauts de France/Ifremer, 2019.
- Gaurier B. : Etude expérimentale des performances d'une hydrolienne soumise aux effets de la turbulence et de l'interaction houle-courant, Ifremer, 2020.
- Choma-Bex C. : Développement de modèles numériques pour simuler le comportement d'hydroliennes, Ifremer, 2021.
- Magnier M. : Caractérisation expérimentale de la turbulence en présence de houle et d'obstacles, Ifremer, 2023.
- Moreau M. : Characterisation of scale effects on the vertical axis tidal turbine behaviour, CIFRE HydroQuest, 2023.
- Dufour MA. : Prédiction des performances d'un parc d'hydroliennes, co-financée Ifremer/Région Normandie, 2022/25.
- Saouli Y. : Etude expérimentale du comportement d'une hydrolienne à flux transverse non carénée soumise à des conditions de fonctionnement instationnaires, CIFRE HydroQuest, 2023/26.

References

- [1] 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*, p. 100061, may 2022.
- [2] M. Moreau, G. Germain, and G. Maurice, "Experimental study of misaligned sheared flows effect on a ducted twin vertical axis turbine," *Applied Ocean Research*, 2023.
- [3] M. Magnier, P. Druault, and G. Germain, "Experimental investigation of an 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*, 2021.
- [4] B. Gaurier, S. Ordonez-Sanchez, J.-V. Facq, G. Germain, and al., "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*, 2020.
- [5] M. Moreau, G. Germain, G. Maurice, and A. Richard, "Sea states influence on the behaviour of a bottom mounted full-scale twin vertical axis tidal turbine," *Ocean Engineering*, 2022.

Le bassin à houle et courant



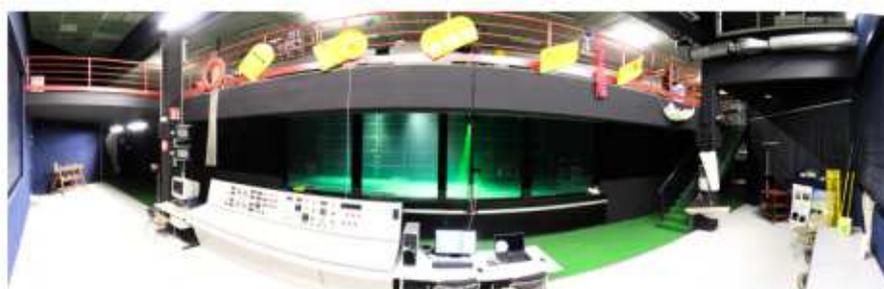
Dispositif de conditionnement d'écoulement Fond relevable Hélices Moteurs



Bassin hors tout	Longueur :	34m
	Largeur :	5m
	Hauteur :	9m
Zone utile	Longueur :	18m
	Largeur :	4m
	Hauteur :	2m
Zone d'observation	Longueur :	8m
	Largeur :	4m
	Hauteur :	2m
Fond relevable	Longueur :	4m
	Largeur :	4m

Fonctionnement et missions

Veine à circulation d'eau et à surface libre pouvant générer un courant maximum de **2.2m/s** sur une section de **8m²** et de **18m** de longueur utile. De la houle pouvant atteindre 15cm d'amplitude et de période variant de 0,6s à 3,5s, peut être combinée au courant jusqu'à 0.8m/s. Ce bassin est utilisé pour étudier le comportement d'engins navigants et de structures ancrées soumis au courant et à la houle. Ses dimensions et son instrumentation associée en font un outil performant pour de multiples applications : Energies Marines Renouvelables (EMR), structures offshores, engins remorqués. Il permet de visualiser et de mesurer le comportement dynamique de prototypes de l'échelle réduite à l'échelle 1. Pour le développement de nouveaux équipements, c'est une étape importante entre la modélisation numérique et les premiers essais en mer.

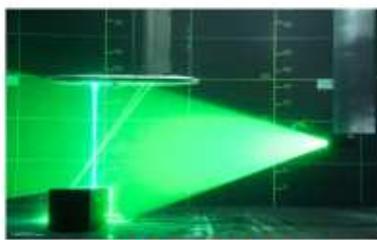


Domaines de compétences

- Hydrodynamique
- Mesure de grandeurs physiques (effort, pression, accélération, vitesse d'écoulement, houle...)
- Traitement de données
- R&D, conception CAO
- Montage de projets scientifiques

Moyens de mesure et équipements

- Balances d'efforts multicomposantes
- Sondes à houle
- Instrumentation laser LDV/PIV 2D et 3D
- Système de trajectométrie 3D aérien et sous-marin
- Générateur de houle
- Hexapode
- Fond relevable 4m x 4m



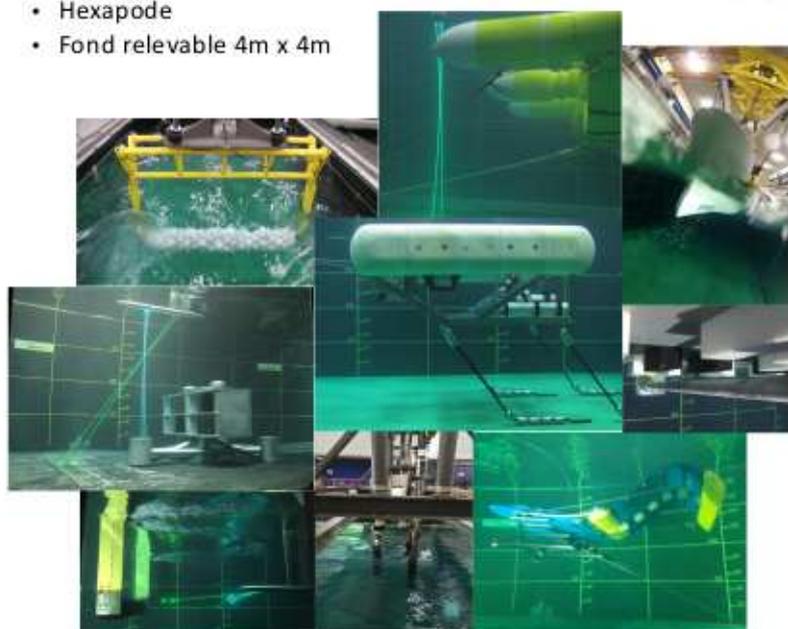
LVD 3D et PIV 2D



Hexapode



Générateur de houle



Domaines d'activités

- Conception CAO, réalisation de prototypes et maquettes
- Prestations d'essais hydrodynamiques
- Projets de recherche académiques et industriels
- Développement des systèmes EMR
- Aide à la conception de navires scientifiques
- Expertise et accompagnement de projets industriels EMR, structures côtières

Equipe 2023

- 2 Chercheurs
- 1 Technicien
- 1 Ingénieur
- 1 Assistante

Contact : Jean-Valéry FACQ

Mail : jvfacq@ifremer.fr

Laboratoire d'Hydrodynamique MARine (LHYMAR)

Maquettes d'hydroliennes à axe horizontal et vertical

N. Ahssayni, J.V. Facq*, G. Germain, G. Gaurier, B. Gomez, M. Moreau

Laboratoire d'Hydrodynamique Marine, Ifremer

* Corresponding author: jvfacq@ifremer.fr

Mots-clés: Essais hydrodynamique, houle, courant, hydrolienne.

Résumé : Grâce à ses grandes dimensions, le bassin d'essais à houle et courant de l'Ifremer permet d'étudier, sur le comportement des maquettes d'hydrolienne en terme de performances et de caractéristiques de l'écoulement (induction, sillage), les effets :

- du profil vertical de vitesse de l'écoulement incident (jusqu'à 2m/s) [1];
- de l'orientation de la machine par rapport au courant incident (0 à 360°) [2];
- des fluctuations de vitesse de l'écoulement imposé (turbulence homogène, émission de structures tourbillonnaires dans le sillage d'un obstacle de fond) [3];
- de la présence de la houle (avec et contre-courant), de fréquence entre 1 et 2,5s et d'amplitude maximale de 12 cm [4].

L'instrumentation disponible au bassin d'essais permet d'acquérir des bases de données expérimentales indispensables pour la validation des modèles numériques développés en parallèle pour simuler le comportement des hydroliennes dans leur milieu. Ces modèles sont utilisés pour optimiser les parcs de machines, estimer le potentiel énergétique d'un site d'exploitation, mais également pour étudier les effets d'interaction avec les écosystèmes, des mesures in-situ permettant d'asseoir l'ensemble de ces travaux [5].

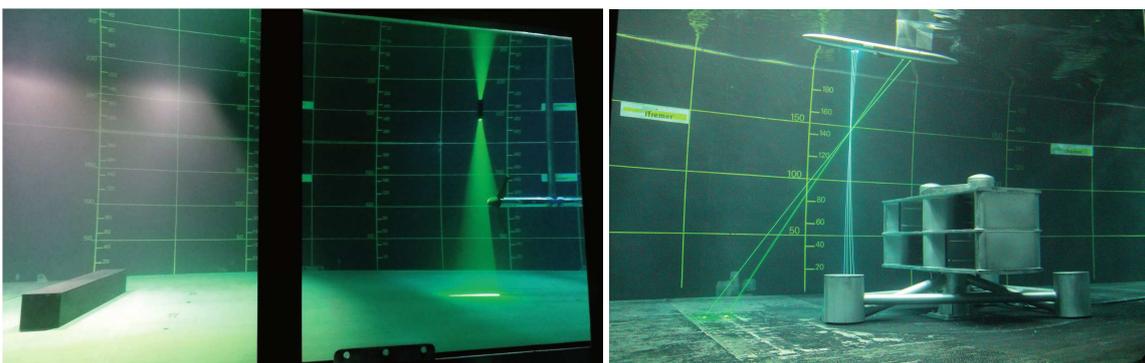


Figure 1: Mesure PIV en amont d'une hydrolienne à axe horizontal à gauche et mesure LDV 3C en amont d'une hydrolienne à axe vertical à droite. Les deux maquettes sont à l'échelle 1/20

Ces études nécessitent l'utilisation de maquette d'hydrolienne reproduisant le fonctionnement des machines industrielles. La modélisation expérimentale permet d'étudier le comportement des hydroliennes dans différentes conditions de fonctionnement (houle, turbulence, angle d'incidence...). La comparaison des résultats obtenus à l'échelle 1/20 à ceux obtenus in-situ permet d'évaluer les effets de similitude

et d'échelles et de valider les différents choix de design d'une machine industrielle.

Le pilotage et l'instrumentation des maquettes développées permettent des réglages fins et des acquisitions de données précises. Les prototypes sont équipés de :

- moteurs pilotés par des contrôleurs ;
- capteurs de rotation qui mesurent la vitesse de rotation de la machine en temps réel ;
- capteurs d'efforts pour mesurer forces et moments appliqués à la maquette et aux pales ;
- couplemètres et codeurs angulaires pour mesurer le couple induit en fonction de la position des pales.

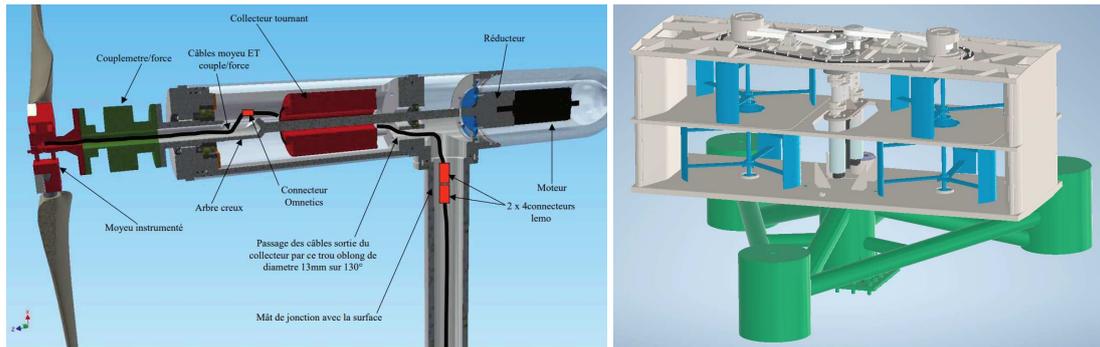


Figure 2: Maquettes instrumentées d'une hydrolienne à axe horizontal à gauche et d'une hydrolienne à axe vertical à droite.

References

- [1] 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*, p. 100061, may 2022.
- [2] M. Moreau, G. Germain, and G. Maurice, "Experimental study of misaligned sheared flows effect on a ducted twin vertical axis turbine," *Applied Ocean Research*, 2023.
- [3] M. Magnier, P. Druault, and G. Germain, "Experimental investigation of an 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*, 2021.
- [4] B. Gaurier, S. Ordonez-Sanchez, J.-V. Facq, G. Germain, and al., "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*, 2020.
- [5] M. Moreau, G. Germain, G. Maurice, and A. Richard, "Sea states influence on the behaviour of a bottom mounted full-scale twin vertical axis tidal turbine," *Ocean Engineering*, 2022.



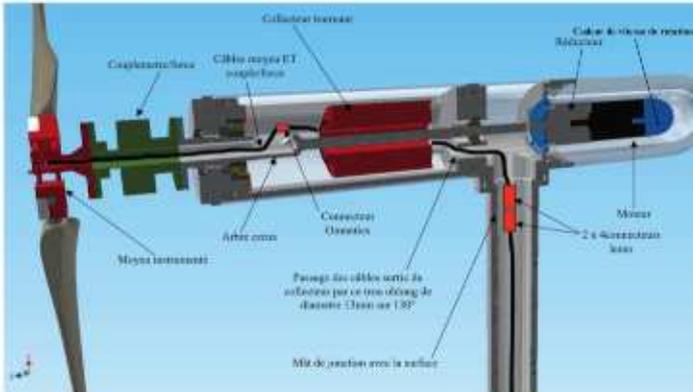
MAQUETTES D'HYDROLIENNES

CONTEXTE ET OBJECTIFS

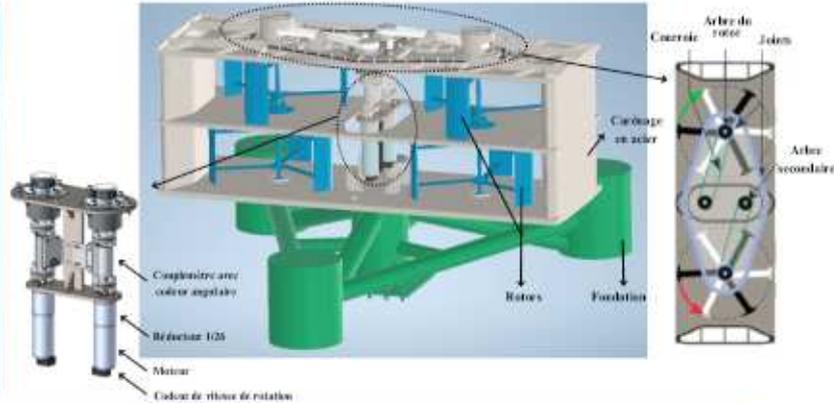
La modélisation expérimentale permet d'étudier le comportement des hydroliennes dans différentes conditions de fonctionnement (houle, turbulence, angle d'incidence...). La comparaison des résultats obtenus à l'échelle 1/20 à ceux obtenus in-situ permet d'évaluer les effets de similitude et d'échelles et de valider les différents choix de design d'une machine industrielle.

COMPOSITION/INSTRUMENTATION DES HYDROLIENNES

Hydrolienne à axe horizontal



Hydrolienne à axe vertical



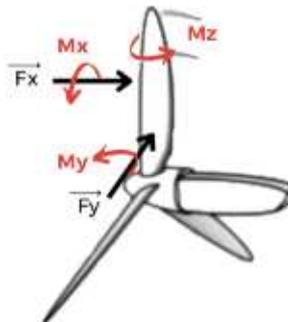
➤ Le pilotage et l'instrumentation des maquettes permettent des réglages fins et des acquisitions de données précises.

Les prototypes sont équipés de :

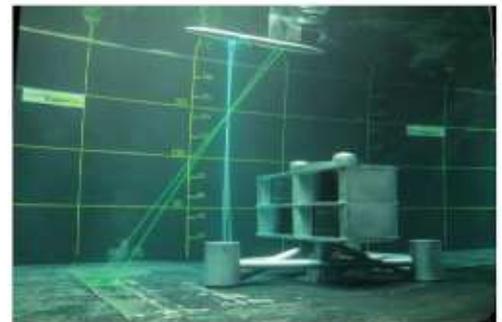
- moteurs pilotés par des contrôleurs ;
- capteurs de rotation qui mesurent la vitesse de rotation de la machine en temps réel ;
- capteurs d'efforts pour mesurer forces et moments appliqués à la maquette et aux pales ;
- couplemètres et codeurs angulaires pour mesurer le couple induit en fonction de la position des pales.



Mesure PIV en amont du rotor de l'hydrolienne à axe horizontal



Forces et moments mesurés sur une pale d'hydrolienne à axe horizontal



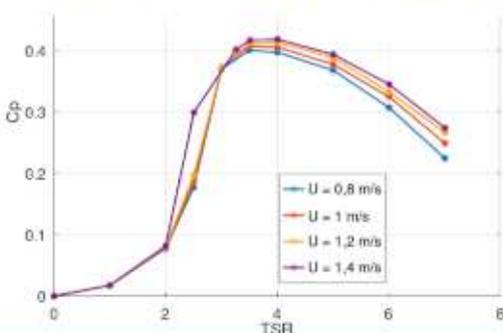
Mesure LDV 3C en amont de l'hydrolienne à axe vertical

ESSAIS RÉALISÉS SUR LES MAQUETTES

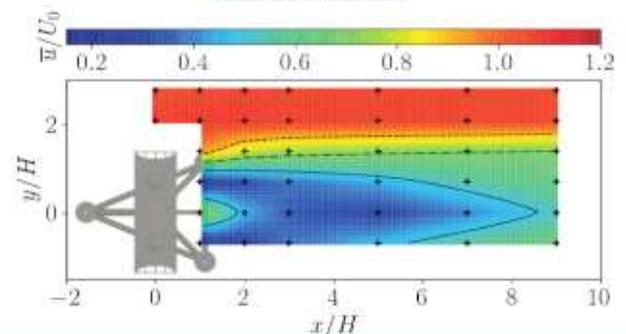
➤ Ces maquettes permettent d'étudier, pour différents points de fonctionnement de la machine, les effets sur ses performances et les caractéristiques de l'écoulement (induction, sillage) en fonction :

- du profil vertical de vitesse de l'écoulement incident (jusqu'à 2m/s) ;
- de l'orientation de la machine par rapport au courant incident (0 à 360°) ;
- des fluctuations de vitesse de l'écoulement imposé (turbulence homogène, émission de vortex dans le sillage d'un obstacle) ;
- de la présence de la houle (avec et contre-courant), de fréquence entre 1s et 2,5s et d'amplitude maxi de 12cm (0,9 m/s de courant max).

Effet du nombre de Reynolds sur les performances d'une hydrolienne à axe horizontal



Sillage d'une hydrolienne à axe vertical issu de mesure LDV 3C



Effects of non-isotropic blockage on a tidal turbine modeled with the Actuator-Line Method

E. Mascrier^{*,a}, F. Zilic de Arcos^b, G. Pinon^b

a. Université Le Havre Normandie, Le Havre, France

b. Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, Normandie Univ, UNIHAVRE, CNRS, LOMC-UMR 6295, Le Havre, France

* Corresponding author: enzo.mascrier@etu.univ-lehavre.fr

Key words : Tidal Energy, Blockage, Aspect Ratio, Numerical simulations, Actuator-Line

Extended abstract:

The discussion of blockage effects on rotors emerged during the development of wind tunnel testing [1]. Those wind tunnels played a significant role in the experimental testing of airfoils and turbine blades. In its simplest form, blockage refers to the interaction between a body, in this case a rotor, and the outer boundaries of a tunnel. Blockage is characterized by the ratio of the rotor swept area to the channel cross-sectional area, and is denoted by β . Blockage effects can lead to changes in performance and wake development of a turbine [2].

This study aims to investigate the impact of anisotropic blockage on the performance of a tidal turbine. A 20m diameter rotor is modeled with OpenFOAM, an open-source CFD software, using the Actuator Line method [3]. This method allows the modeling of blades as lines made of body forces. This method avoids modeling the blade walls and therefore reduces the computational cost. The actuator line method has been validated successively over the past few years [4]. The simulations were performed on the MYRIA Cluster at the Center Régional Informatique et d'Applications Numériques de Normandie (CRIANN) because of the high calculation costs.

A mesh study has been performed by using the grid-convergence index (GCI) [5]. This index is used to determine the mesh used. Ensuring mesh convergence is an important step in validating simulation results.

To study the anisotropic blockage, the aspect ratio (AR) is used. It is defined by the height divided by the width of the channel. Our results were in agreement with previous studies: an increase in blockage results in higher thrust and power performance. Concerning the anisotropic blockage, the power extracted from the flow reduces with the aspect ratio. This is due to the volume of flow influence in the channel. At low values of β and aspect ratio, the presence of the turbine causes reduced disturbance in the flow, thus performances decrease. When the blockage increases, blades start to interact with the domain boundaries. This is observed on the angles of attack along the span of the blades. The flow is accelerated at the center and at the tip of the blade. This results in a change in the angle of attack at these locations, affecting power and thrust.

Regarding the wake development, the velocity profile can be affected by the blockage and the aspect ratio. The wake took a longer distance to recover 80 % of its initial speed (3 m.s^{-1}). This could have significant implications for the design of tidal rotor arrays, affecting the overall performance and

efficiency of the system [6]. If the wake is shorter, it may be possible to pack more turbines in a given area, thereby potentially increasing the overall power output.

References

- [1] C.-K. Choi and D.-K. Kwon, "Wind tunnel blockage effects on aerodynamic behavior of bluff body," *Wind Struct Int J*, vol. 1, no. 4, pp. 351–364, 1998.
- [2] J. B. Barlow, W. H. Rae, and A. Pope, *Low-speed wind tunnel testing*. John Wiley & Sons, 1999.
- [3] J. N. Sørensen and W. Z. Shen, "Numerical modeling of wind turbine wakes," *J. Fluids Eng.*, vol. 124, no. 2, pp. 393–399, 2002.
- [4] K. Nilsson, W. Z. Shen, J. N. Sørensen, S.-P. Breton, and S. Ivanell, "Validation of the actuator line method using near wake measurements of the Mexico rotor," *Wind Energy*, vol. 18, no. 3, pp. 499–514, 2015.
- [5] P. J. Roache, "Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 29, no. 1, pp. 123–160, 1997.
- [6] R. Shakoor, M. Y. Hassan, A. Raheem, and Y.-K. Wu, "Wake effect modeling: A review of wind farm layout optimization using Jensen's model," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1048–1059, 2016.

Workshop Ifremer : Méthodes Expérimentales et Numériques pour l'Hydrolien - 7 et 8 Juin 2023

Effects of non-isotropic blockage on a tidal turbine

Enzo Mascrier¹, Federico Zilic de Arcos², Grégory Pinon²

¹Université Le Havre Normandie, Le Havre, France

²Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, Normandie Univ, UNIHAVRE, CNRS, LOMC-UMR 6295, Le Havre, France

Background

In constrained flows, the concept of **blockage** β is relevant. The effect of increasing blockage in a turbine can increase the amount of **extractable power**^[1]. However, studies on **non-isotropic blockage** are limited, and further research is required to gain a comprehensive understanding of this phenomenon.

Actuator-Line Method (ALM)

To model the turbine, the **Actuator-Line Method**^[2] is used with the CFD software **OpenFOAM**. Blades are modeled as lines composed of actuator points. On each point, a force is applied, based on the local drag and lift. This force is smeared by using a Gaussian function, which result in the flow modification. This approach results in **reduced computational costs** while maintaining **good modeling accuracy**.

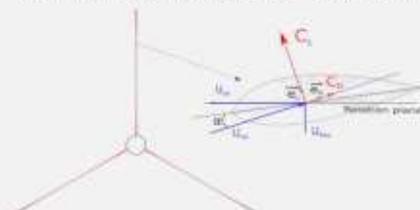


Figure 1 : Airfoil section

Methods

Turbine characteristic \Rightarrow Sch15B tidal rotor^[3]

- 20-meter-diameter rotor
- Placed in the center of a 15D-length channel

Turbulence properties \Rightarrow k- ω SST model^[4]

- Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) equations
- PIMPLE iterative algorithm

Problem parameters :

- Tip-Speed Ratio $\lambda = \frac{\omega R}{V_\infty}$
- Aspect Ratio $AR = \frac{w}{H}$
- Blockage $\beta = \frac{A_{rotor}}{A_{channel}}$

where ω the angular velocity (s^{-1}), R the radius (m), V_∞ the tidal velocity ($m \cdot s^{-1}$), w and H the width and the height of the channel (m).

Results

Power / Thrust

- Similar trends for power and thrust
- Power increases with blockage
- For low β , increasing the AR decreases the power
- \hookrightarrow Flow is less affected by the turbine
- For high β , AR = 0.3 returns the highest value of power
- \hookrightarrow Boundaries are getting closer

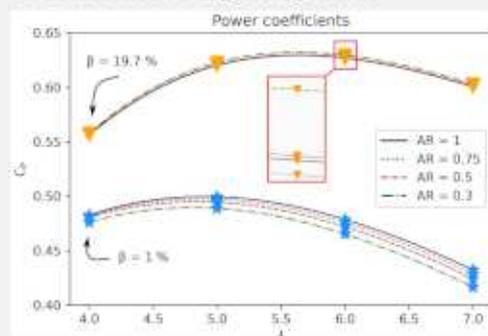


Figure 2 : Power coefficient for different parameters

Angle of attack

- α increases with the blockage
- $\hookrightarrow r/R < 0.75$: α increases with the AR
- $\hookrightarrow r/R > 0.75$: inverse phenomenon
- For $\beta = 0.01$, lower α at each location for lower AR
- Velocity around the turbine must be influenced by the aspect ratio

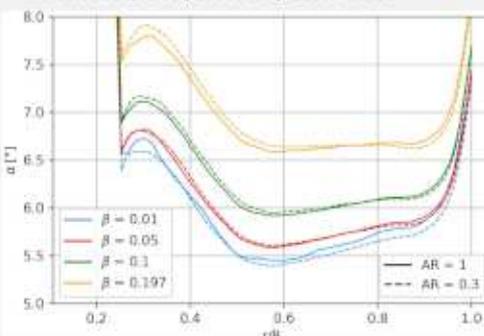


Figure 3 : Angle of Attack along the spanwise

Wake development

- The wake is longer when the blockage increases
- Boundaries prevent the wake from expanding \Rightarrow Narrowing + flow acceleration at the tip
- Blades interact with boundaries as they come closer \Rightarrow Bypassing the rotor becomes impossible

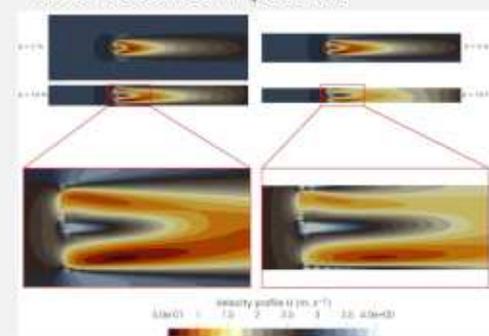


Figure 4 : Wake development for AR = 3

Conclusions and perspectives

Variations due to the AR are characterized : At low β , a **reduction of power performance** is observed due to the large width of the channel. At high β , **minor variations** are noticed. In this case, boundaries are closer to the turbine, which leads to a **blade-boundaries interaction**, a consequence of the flow acceleration due to the mass flux increases. Regarding the wake development, boundaries constrain the flow behind the turbine, which leads to a **flow acceleration** and **greater wake recovery distance**.

References

- [1] Garrett, C., & Cummins, P. (2007). *Journal of Fluid Mechanics*, 588, 243-251.
- [2] Sorensen, J. N., & Shen, W. Z. (2002). *Journal of Fluids Engineering*, 124(2), 393-399.
- [3] Schluntz, J., & Willden, R. H. J. (2015). *Renewable Energy*, 81, 432-441.
- [4] Menter, F. R. et al. (2003). *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 4(1), 625-632.

Caractérisation expérimentale des effets d'induction en amont d'une hydrolienne à axe horizontal : modèles analytiques comparés aux mesures PIV

Ph. Druault^{*,a}, L. Jouenne^a, J-F. Krawczynski^a, G. Germain^b

a. Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université (Paris)

b. IFREMER (Boulogne-sur-Mer)

* Corresponding author: philippe.druault@sorbonne-universite.fr

Mots clés : Turbine induction, turbulence, PIV, Modèles analytiques

Résumé :

Dans l'optique de mieux prédire le fonctionnement des hydroliennes et notamment de limiter la fatigue structurelle des rotors, il est important d'étudier les effets d'induction dans la gamme de fonctionnement des turbines. Différents modèles analytiques ayant été proposés dans le secteur de l'éolien, nous proposons d'étudier leur validité pour des applications à des hydroliennes.

Des bases de données expérimentales, issues de mesures par Vélocimétrie par Image de Particules (PIV) effectuées en amont de la turbine pour différentes vitesses de rotation (TSR : Tip Speed Ratio) en écoulement uniforme, sont analysées pour étudier les effets d'induction sur une hydrolienne tri-pales à axe horizontal [1, 2]. Les champs de vitesse obtenus pour trois TSR autour du point de fonctionnement optimal et pour la turbine à l'arrêt sont comparés au champ de vitesse de l'écoulement en absence de turbine. Ainsi, cinq configurations peuvent être étudiées.

Les résultats confirment tout d'abord que même si le déficit de vitesse axiale est principalement régi par la vitesse de rotation de la turbine, un profil de vitesse similaire est observé quelle que soit la vitesse de rotation : le profil uniforme de vitesse moyenne axiale évolue vers un profil cisailé avec un déficit de vitesse maximal devant le moyeu. Le profil de la vitesse radiale moyenne n'est pas sensible à la vitesse de rotation de la turbine en amont du moyeu mais l'amplitude de cette composante de vitesse augmente en bout de pale lorsque le TSR augmente. Les coefficients de dissymétrie et d'aplatissement (moments d'ordre 3 et 4 de la vitesse axiale) ont également été comparés. Comparée à l'intermittence de l'écoulement en absence de la turbine, l'intermittence de l'écoulement en amont de la turbine est modifiée. En présence de la turbine, l'écoulement amont présente une augmentation du coefficient d'aplatissement en bout de pale ainsi qu'une modification du signe du coefficient de dissymétrie par rapport à l'écoulement en absence de turbine.

A partir de ces données expérimentales, la validité des principaux modèles analytiques d'induction classiquement utilisés en éolien [3, 4, 5] est analysée. Ces modèles semblent présenter des limitations pour une estimation correcte des déficits de vitesse moyenne notamment en amont du moyeu de l'hydrolienne. Nous proposons de corriger ces limitations en associant deux modèles :

- le premier caractérisant le déficit de vitesse juste en amont du moyeu
- le second classiquement utilisé dans le domaine de l'éolien pour caractériser le déficit de vitesse devant les pales en rotation.

Ce couplage permet de tenir compte séparément de l'influence du moyeu et des pales en rotation. En comparant les résultats ainsi obtenus aux données de vitesse PIV en amont de l'hydrolienne, ce nouveau modèle hybride fournit alors une très bonne prédiction des déficits de vitesse.

Ce nouveau modèle analytique est actuellement en cours de validation pour un écoulement amont cisailé. Les premiers résultats confirment l'intérêt de coupler les 2 modèles pour une meilleure représentation des déficits de vitesse en amont de l'hydrolienne.

References

- [1] P. Druault and G. Germain, "Experimental investigation of the upstream turbulent flow modifications in front of a scaled tidal turbine," *Renewable Energy*, vol. 196, pp. 1204–1217, 2022.
- [2] L. Jouenne, P. Druault, J.-F. Krawczynski, and G. Germain, "Induction study of a horizontal axis tidal turbine: Analytical models compared with experimental results," *Ocean Eng.*, vol. 268, no. 113458, 2023.
- [3] E. Branlard and M. Gaunaa, "Cylindrical vortex wake model: right cylinder," *Wind Energy*, vol. 18, pp. 1973–1987, 2015.
- [4] N. Troldborg and A. Meyer Forsting, "A simple model of the wind turbine induction zone derived from numerical simulations," *Wind Energy*, vol. 20, pp. 2011–2020, 2017.
- [5] B. Anderson, E. Branlard, G. Vijayakumar, and N. Johnson, "Investigation of the nacelle blockage effect for a downwind turbine," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1618, no. 062062, 2020.

Ph. Druault¹, L. Jouenne¹, J-F. Krawczynski¹, G. Germain²

¹ Institut Jean Le Rond d'Alembert, Sorbonne Université - Paris
² IFREMER - Boulogne-sur-mer

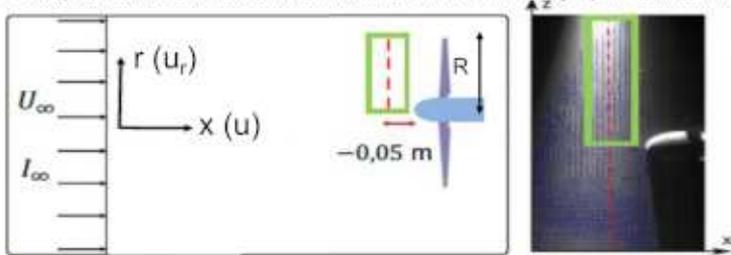
Objectifs – Données expérimentales

Mieux prédire le fonctionnement des hydroliennes (limiter la fatigue structurelle, limiter les variabilités de puissance, effet TSR – écoulement turbulent amont, ...)

Améliorer les modèles analytiques prenant en compte l'effet d'induction d'une turbine [4]

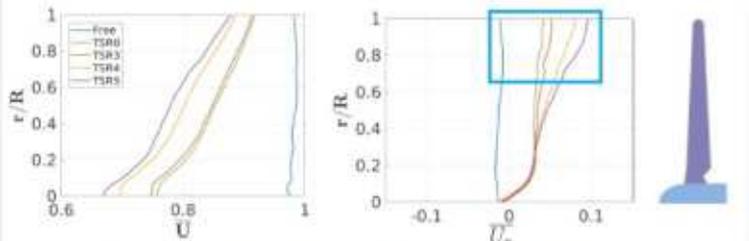
- Mieux comprendre les modifications d'un écoulement uniforme impactant une hydrolienne
- Réaliser des mesures PIV des vitesses $(u, u_r)_{(x,r)}$ en amont (ligne pointillée rouge) d'une hydrolienne-bassin d'essai Boulogne-sur-mer [4,5]

- 5 configurations d'écoulement étudiées : Free (sans turbine), TSR0 (turbine sans rotation), TSR3, TSR4 (puissance optimale) et TSR5
- Analyse des modifications en fonction du TSR - Tip Speed Ratio, $TSR = \frac{\omega R}{U_{\infty}}$
- Comparaison des vitesses obtenues aux modèles analytiques existants



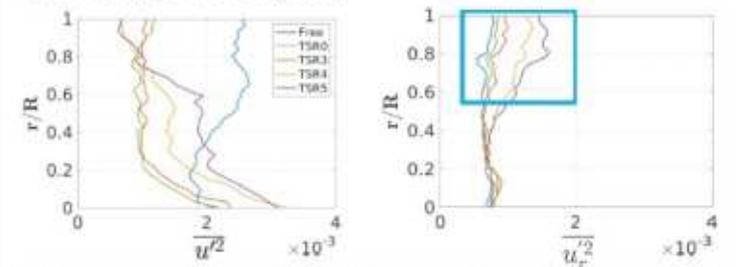
Analyse du champ moyen de vitesse

- La rotation des pales engendre un cisaillement de la vitesse axiale avec un minimum en $r=0$
- Augmentation de la décroissance de la vitesse moyenne axiale U lorsque le TSR augmente
- Augmentation de la vitesse moyenne radiale U_r , aux extrémités des pales

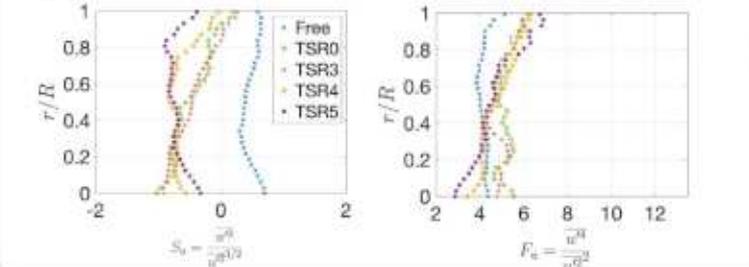


Analyse du champ fluctuant de vitesse

- Augmentation des niveaux de $\overline{u'^2}$ pour $r \in [0 : 0.07R]$
- $\overline{u_r'^2}$ reste quasiment constante et très faible sauf aux extrémités des pales lorsque le TSR augmente



- Modification de l'intermittence (skewness, flatness) en présence de la turbine



Analyse comparative - mesure/modèles analytiques

Les modèles analytiques sont basés sur le coefficient de poussée :

$$C_T = \frac{\overline{T}}{\frac{1}{2} \rho S U_{\infty}^2}$$

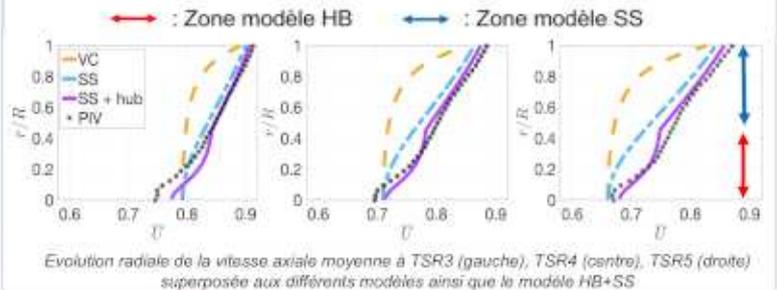
La poussée moyenne \overline{T} mesurée simultanément aux mesures PIV des vitesses, a été utilisée pour calibrer les modèles analytiques.

Modèles analytiques (éoliens)

- Vortex Cylinder (VC) [1] : modélisation à l'aide de vortex hélicoïdaux
- Self-Similar (SS) [2] : calibré avec 107 simulations RANS d'un écoulement autour d'un disque poreux
- Hub Blockage (HB) [3] : modélisation du hub sans pales à l'aide des écoulements potentiels

Combinaison des modèles

- Vitesse uniforme utilisée dans les modèles : U_{free}
- Le modèle Self-similar modélise assez fidèlement le déficit de vitesse axiale moyenne au niveau des pales
- Problème (modèle SS) : le disque poreux utilisé lors des simulations ne prend pas en compte les effets du hub
- Proposition d'un nouveau modèle combinant le modèle Self-Similar avec le modèle Hub Blockage
- Les deux modèles sont raccordés en un point $r_c = 0.45R$ correspondant à la position radiale où le hub n'a plus d'influence sur la vitesse
- Ce modèle permet d'obtenir d'excellents résultats par comparaison avec les données expérimentales (maximum 5% d'écart)

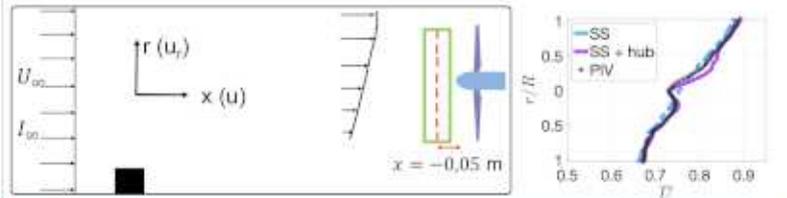


Evolution radiale de la vitesse axiale moyenne à TSR3 (gauche), TSR4 (centre), TSR5 (droite) superposée aux différents modèles ainsi que le modèle HB+SS

Conclusions et perspectives

Lorsque le TSR augmente,

- Diminution de la vitesse moyenne axiale
- Augmentation de la vitesse moyenne radiale en bout de pales
- Similitude des niveaux d'énergie cinétique turbulente
- Développement d'un nouveau modèle analytique d'induction
- Validation (en cours) de ce modèle pour un écoulement amont cisailé



Références

[1] E. Branlard, M. Gaunaa, Cylindrical vortex wake model: right cylinder, Wind Energy (2014)
[2] N. Troldborg, A. R. M. Forsting, A simple model of the wind turbine induction zone derived from numerical simulations, Wind Energy (2017)
[3] B. Anderson, E. Branlard, G. Vijayakumar, N. Johnson, Investigation of the nacelle blockage effect for a downwind turbine, J. Phys.: Conf. (2020)
[4] L. Jouenne, Ph. Druault, J-F Krawczynski, G. Germain, Induction study of a horizontal axis tidal turbine: Analytical models compared with experimental results, Ocean Eng. (2023)
[5] Ph. Druault, G. Germain, Experimental investigation of the upstream turbulent flow modifications in front of a scaled tidal turbine, Renew Energy (2022)

Development of a lifting line approach for vertical axis tidal turbines

M. Roperch ^{*,a}, G. Pinon ^a

a. Laboratoire Ondes et Milieux Complexes - Normandie Univ, UNIHAVRE, CNRS, 76600 Le Havre
* Corresponding author: maelenn.ropersch@etu.univ-lehavre.fr

Key words: Tidal turbines, Vertical axis, Lifting line, Vortex Methods

Summary:

The poster will present recent developments of a lifting line applied to a H-type vertical axis tidal turbine. The numerical simulations use a three-dimensional unsteady Lagrangian Vortex Particle Method [1]. Recently, a lifting line approach was developed for horizontal axis (axial flux) turbines to evaluate the angles of attack, subsequent loads along the turbine blades, and then integrated power and thrust coefficients [2]. The newly modified version of lifting line approach applied to vertical axis turbine makes use of this previous study and attempt to adapt the code to such vertical axis turbines.

The poster will present the validation tests performed on a three-bladed H-Darrieus tidal turbine. The turbine geometry is based on the SHIVA turbine from Delafin PhD thesis [3] with a NACA0018 profile without pitch. Numerical results will be compared with those obtained from the aforementioned SHIVA turbine, considering two different Tip Speed Ratios: $TSR = 2$ and $TSR = 3$, the optimal TSR for this turbine being $TSR = 3$. Numerical cyclic load variations, power coefficients will also be assessed.

At $TSR = 2$, the angles of attack and the normal coefficients on the upstream part of the turbine are similar with those compute from Delafin [3]. On the downstream part, the normal coefficients should be null, a feature which is presently not reproduced by the present implementation which display a symmetric behaviour with the upstream part. The power coefficient has a cyclic variation corresponding to the three blades rotation. But the minimum and maximum values together with the averaged value over a rotation are different from those presented in [3]. At $TSR = 3$ the power coefficient is higher than 1, indicating that the turbine would work like a fan. For the two TSR , the tangential coefficients are very different.

From these first results and comparisons, it is clear that the numerical model needs to be improved. However, these preliminary results give confidence to the team that such an implementation is possible providing an important debugging work from the actual implementation.

References

- [1] P. Mycek, *Étude numérique et expérimentale du comportement d'hydroliennes*. PhD thesis, Université du Havre, 2013.
- [2] M.-A. Dufour, G. Pinon, E. Rivoalen, F. Blondel, and G. Germain, "Development and validation of a lifting-line code associated to the Vortex Particles Method software Dorothy," *Submitted to Wind Energy*, 2023.
- [3] P.-L. Delafin, *Analyse de l'écoulement transitionnel sur un hydrofoil : application aux hydroliennes à axe transverse avec contrôle actif de l'angle de calage*. PhD thesis, 2014.

Motivation

The simulation are performed with a 3D Lagrangian software DOROTHY. A lifting line method was added in the software to model the blades and to estimate the loads, torque and thrust[1]. DOROTHY was used since 2011 for simulation on horizontal axis tidal turbines[2]. Recent development extended the lifting line method for H-type vertical axis tidal turbine study.

Numerical Method

Hypothesis	Navier-Stokes Equations
<ul style="list-style-type: none"> - Incompressible - Homogeneous spatial discretization of the fluid 	Vorticity-Velocity Formulation [2] : $\begin{cases} \operatorname{div} \vec{u} = 0 \\ \operatorname{rot} \vec{u} = \vec{\omega} \\ \frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{\omega} = (\vec{\omega} \cdot \nabla) \vec{u} + \nu \Delta \vec{u} \end{cases}$
	Lifting Line Method Circulation equations [3][4] : <ul style="list-style-type: none"> - Bound circulation : $\Gamma_{B,k} = \frac{1}{2} c_l v_{rel} C_L$ - Trailing circulation : $\Gamma_{T,k} = \Gamma_{B,k+1} - \Gamma_{B,k}$ - Spanwise circulation : $\Gamma_{S,k} = \Gamma_{B,k}(t) - \Gamma_{B,k}(t - dt)$

1. Cyclic load

For a H-type tidal turbine, blades loads are cyclic with the rotation. The adimensional loads coefficient are : $C_t = \frac{F_t}{\frac{1}{2} \rho c_l U_\infty^2}$ and $C_n = \frac{F_n}{\frac{1}{2} \rho c_l U_\infty^2}$.

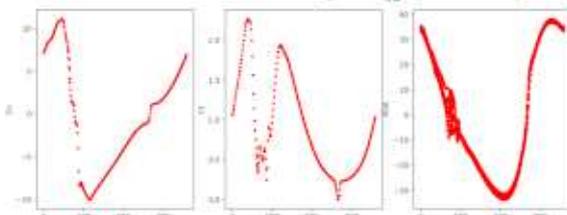


Figure 1. Normal, tangential coefficient and angle of attack at TSR=2

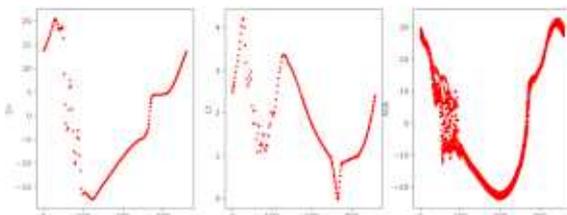


Figure 2. Normal, tangential coefficient and angle of attack at TSR=3

The angle of attack α at $TSR = 2$ are similar at those compute with analytic method. The difference is bigger with $TSR = 3$, because α is between $+20$ and -20 .

For C_n , it is an Dorothy with positive value in the downstream part of the turbine, when it should be null or negative. But the result of the upstream part of the turbine is similar at those in [5].

C_t is very different from [5] even for the upstream part of the turbine.

Conclusion and perspectives

- Results at high TSR are nonphysical, the turbine works like a fan.
- C_n and C_t coefficient are higher of those present on Delafin PhD thesis [5] for the two value of TSR .
- It is a first work on a vertical axis turbine with Dorothy. Some improvement need to be done.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the support of the Interreg TIGER project funding of this work. Part of this work was performed using computing resources of CRIANN (Normandy, France).

Simulation set-up

The simulation are compute with the SHIVA turbine geometry and flow parameter presented and used in Delafin PhD thesis[5]

Turbine geometry	Simulation parameter
<ul style="list-style-type: none"> - H-type tidal turbine - Profil NACA0018 - Blade length : 1m - Rotor diameter : 1.6m - Number of blade : 3 - Cord : 0.152m 	<ul style="list-style-type: none"> - Uniform upstream velocity : $U_\infty = 2m/s$ - Tip speed ratio : $TSR = \frac{\Omega R_L}{U_\infty} = 3$ and 2 ; optimal $TSR = 3$ - No pitch

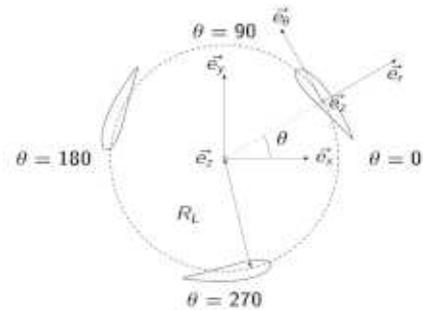


Figure 3. Vertical axis turbine scheme

2. Power coefficient

The power coefficient is defined for a H-type vertical axis turbine as :

$$C_p = \frac{Q\Omega}{\rho R_L H U_\infty^3}$$

Where Q is rotor torque and H the blade length.

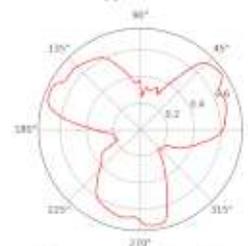


Figure 4. Power coefficient for $TSR = 2$

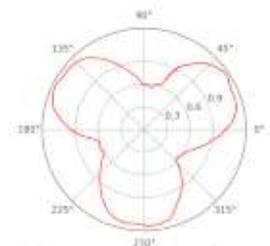


Figure 5. Power coefficient for $TSR = 3$

Power coefficient are higher as reference value from [5]. Dorothy have a C_p mean of 0.5 instead of 0.3 at $TSR = 2$. At $TSR = 3$, it works like a fan and the mean power coefficient is 1.45 .

Bibliography

- [1] M.-A. Dufour, G. Pinon, E. Rivoalen, F. Biondel, and G. Germain, "Development and validation of a lifting-line code associated to the Vortex Particles Method software Dorothy," *Submitted to Wind Energy*, 2023.
- [2] P. Mycek, *Étude numérique et expérimentale du comportement d'hydroliennes*. PhD thesis, Université du Havre, 2013.
- [3] A. van Garrel, "Development of a Wind Turbine Aerodynamics Simulation Module," *Energy research Centre of the Netherlands*, 2003. Publisher: Energy research Centre of the Netherlands.
- [4] J. Murray and M. Barone, "The Development of CACTUS, a Wind and Marine Turbine Performance Simulation Code," in *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, (Orlando, Florida), American Institute of Aeronautics and Astronautics, Jan. 2011.
- [5] P.-L. Delafin, *Analyse de l'écoulement transitionnel sur un hydrofoile : application aux hydroliennes à axe transverse avec contrôle actif de l'angle de calage*. PhD thesis, 2014.

Caractérisation de la ressource hydrolienne par combinaison de mesures par ADCP fixes et semi-stationnaires

E. Droniou^{*,a}, M. Huchet^a, L. Perez^a, F. Johnson^b, A. Baldock^c, C. Boake^d

a. DynamOcean, Lannion, France

b. Projet MeyGen, Royaume-Uni

c. Baldock Energy, Royaume-Uni

d. Applied Renewable Research Ltd, Royaume-Uni

* Contact : eloi.droniou@dynamocean.com

Mots clés : Hydroliennes, caractérisation de site, évaluation de la ressource, mesures, ADCP

Résumé :

Evaluer précisément la vitesse des courants de marée et leur variabilité spatiale sur un site hydrolien potentiel est d'une grande importance pour optimiser l'agencement des turbines et l'extraction d'énergie sur l'ensemble du parc. La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) fournit des directives pour l'évaluation des ressources énergétiques hydroliennes [1] : idéalement, une fois que l'emplacement des futures turbines est fixé avec précision, des mesures par profileurs de courant acoustiques à effet Doppler (ADCP) posé sur le fond marin sont effectuées à tous les endroits envisagés. Néanmoins, le déploiement de nombreux ADCP posés peut augmenter considérablement les coûts associés aux campagnes de terrain et à la collecte de données.

Nous présentons ici une technique utilisée pour obtenir à moindre coût les vitesses de courant à différents emplacements prévus pour les turbines. Elle combine des mesures semi-stationnaires effectuées par un ADCP mobile et des mesures par ADCP posé sur le fond, et analyse la corrélation entre les jeux de données. Plus précisément, elle repose sur une méthode de mesure - corrélation - prédiction (MCP), qui vise à prédire les conditions environnementale sur des sites d'intérêt où seules des mesures à court terme sont disponibles, et qui est couramment utilisée dans le secteur de l'éolien. Cette technique a récemment fait l'objet d'une analyse théorique pour une application à l'énergie hydrolienne [2]. Elle est ici appliquée à un cas réel : la présente étude s'inscrit en effet dans le cadre du projet MeyGen, le plus grand projet de parc hydrolien au monde, qui vise à développer jusqu'à 398 MW de puissance installée dans le Pentland Firth, en Écosse, sur site où les vitesses de courant peuvent atteindre jusqu'à 5 m/s.

Dans ce contexte, une campagne de mesures de 35 jours par ADCP posé a été menée à un emplacement T00 de référence dans la zone prévue pour les futures turbines. Les données ont été collectées avec un ADCP configuré avec une fréquence d'échantillonnage de 2 Hz, mesurant les vitesses dans les 5 faisceaux de l'instrument avec une taille de cellule de 1 m. L'analyse harmonique des mesures et l'utilisation d'un outil de prédiction ont permis d'étendre ce jeu de données pour produire une série temporelle de la vitesse du courant en T00 prédite sur une période de 18,6 ans.

En parallèle, plusieurs jeux de données ont également été collectés en période de vives eaux à l'aide d'un ADCP mobile aux différents emplacements envisagés pour les nouvelles turbines, notés T2xx. L'ADCP

était configuré avec une fréquence d'échantillonnage d'environ 1 Hz et des cellules de 1 m. Les mesures ont été réalisées en chaque emplacement par intervalles d'environ 5 minutes toutes les heures, pendant un cycle de marée de 12 heures. Pendant chaque intervalle de mesure, le navire a maintenu sa position dans un rayon de 15 mètres autour du point ciblé. En plus des emplacements T2xx, des mesures par ADCP mobile ont également été effectuées en continu pendant 12 heures au-dessus de l'ADCP posé (en T00), à des fins de validation.

Dans un premier temps, ce jeu de données de 12 heures obtenu en T00 a permis de valider le principe de la mesure semi-stationnaire par ADCP mobile, en comparant les données de vitesses ainsi collectées aux mesures de l'ADCP fixe en T00 sur la même période. Ensuite, en chaque emplacement T2xx, l'amplitude de la vitesse obtenue à partir des mesures semi-stationnaires a été corrélée avec l'amplitude de vitesse obtenue par l'ADCP posé en T00, aux mêmes instants de mesure. La corrélation est effectuée séparément pour les données de flot et de jusant, fournissant ainsi deux relations linéaires entre les mesures fixes en T00 et les mesures semi-stationnaires à l'emplacement T2xx considéré, en fonction de l'instant du cycle de marée. La variable utilisée pour la corrélation est la moyenne pondérée de la vitesse sur le disque du rotor, calculée selon la "méthode des *bins*" comme préconisé par l'IEC [1]. Dans la dernière étape, la série temporelle des 18,6 ans de prédiction en T00, établie à partir des 35 jours de données de l'ADCP fixe, a été combinée avec les valeurs de corrélation obtenues en chaque point T2xx, afin de produire des prédictions de vitesse sur 18,6 ans en chacun des emplacements T2xx.

La validation des mesures par ADCP mobile à l'aide de données d'ADCP fixe a montré que les vitesses moyennes obtenues par les deux méthodes de mesures concordaient étroitement, avec un coefficient de régression (pente) et un coefficient de corrélation (R^2) tous deux très proches de 1. Les résultats de la corrélation entre ADCP fixe et ADCP mobile en chaque emplacement ont produit des coefficients de régression variables d'un emplacement à l'autre, et qui diffèrent également entre le flot et le jusant pour un même point. Ceci est dû au fait que l'asymétrie de la marée n'est pas homogène sur tout le site d'étude : elle est très marquée autour de T00, mais plus faible au niveau de certains emplacements T2xx. L'utilisation de relations de corrélation différentes entre flot et jusant permet de prendre en compte cette variabilité spatiale et d'obtenir des prédictions plus fiables aux différents emplacements considérés.

La méthode MCP utilisée dans cette étude s'est avérée efficace, avec des coefficients R^2 élevés pour les corrélations analysées. À notre connaissance, c'est la première fois qu'une telle méthode est testée sur le terrain. Ces résultats pourraient s'avérer utiles pour compléter et améliorer les directives existantes sur l'évaluation de la ressource en site hydrolien.

Références

- [1] International Electrotechnical Commission, "Marine energy - Wave, tidal and other water current converters. Part 201 : Tidal energy resource assessment and characterization," tech. rep., 2015. OCLC : 9521615367.
- [2] T. Xu, K. A. Haas, and B. Gunawan, "Estimating annual energy production from short tidal current records," *Renewable Energy*, vol. 207, pp. 105–115, May 2023.



Tidal energy resource assessment combining seabed-mounted and vessel-mounted ADCP measurements

E. DRONIOU¹, M. HUCHET¹, L. PEREZ¹, F. JOHNSON², A. BALDOCK³ and C. BOAKE⁴.

- 1 DynamOcean, France
- 2 SAE Renewables, UK
- 3 Baldock Energy, UK
- 4 Applied Renewable Research, UK



INTRODUCTION

Assessment of tidal current velocities and its spatial variability across a candidate site is of utmost importance to optimize power extraction and tidal turbine layout. The International Electrotechnical Commission (IEC) provides well-established guidelines for assessing tidal energy resources [1].

Nonetheless, the potential deployment of multiple seabed-mounted Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs) may substantially increase costs associated with field campaigns and data collection.

Here, we introduce a technique that combines semi-stationary vessel-mounted VMADCP and seabed-mounted SMADCP data through correlation studies. The method is based on a measure-correlate-predict (MCP) method, which aims to provide predictions of conditions at sites of interest where only short-term measurements are available and is commonly applied in the wind energy sector. This technique was recently discussed for the tidal stream energy case on-a theoretical basis [2].

This work was part of the development of the MEYGEN Project, the largest tidal stream energy project in the globe, aiming to develop up to 398 MW of installed power in Pentland Firth, Scotland.

Fig. 1 shows 10 of the potential turbine locations T2XX as well as the reference station T00.



Figure 1: MEYGEN Project location within (a) the United Kingdom, (b) Pentland Firth, and (c) top view of measurement stations. The white circle indicates the location of the SMADCP (T00) and the red circles represent the locations of the VMADCP measurements (T2XX).

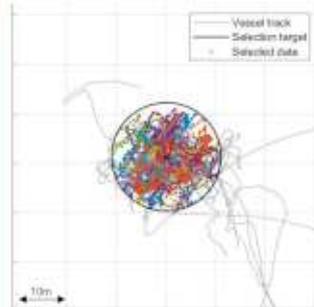


Figure 2: Example of selected VMADCP data throughout the multiple 5-minute steps over a T2XX station.

CORRELATION RESULTS

Fig. 3 shows the validation of the performance of VMADCP rotor disk averaged velocity estimates obtained at station T00 against co-located SMADCP measurements. The slope coefficients as well as the coefficients of determination R^2 computed during both flood and ebb tides show that the two measurement methods provided time-series of rotor disk averaged velocities that closely agree.

The investigation of correlations between SMADCP at T00 and VMADCP velocity estimates obtained at T2XX was conducted for 10 locations. Table 1 shows that slope coefficients differ between flood and ebb events. This is mostly due to the inhomogeneity of the tidal asymmetry between flood and ebb across the site (Fig 5). The example of T204, the furthest from T00 location, is shown in Fig. 4.

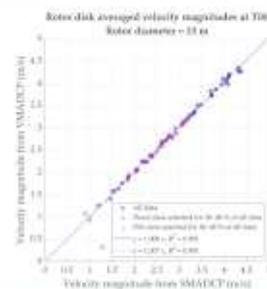


Figure 3: Validation of VMADCP against SMADCP both at T00

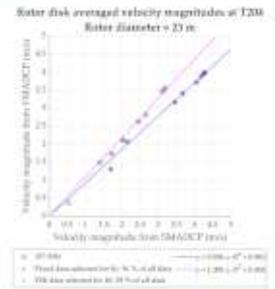


Figure 4: Correlation between vessel-mounted data of T204 and seabed-mounted data at T00

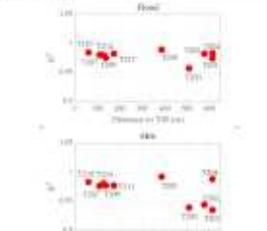


Figure 5: R^2 coefficients plotted against distance to T00 location for T2XX stations

Station	Distance to SMADCP T00 (m)	Flood		Ebb	
		α	R^2	α	R^2
T201	614	0.97	0.97	0.92	0.94
T202	577	0.97	0.98	0.92	0.94
T203	509	0.96	0.96	0.94	0.94
T204	614	0.93	0.98	1.00	0.99
T205	386	1.01	0.99	1.18	0.99
T207	137	1.01	0.98	0.96	0.98
T209	100	1.08	0.98	0.99	0.98
T210	28	1.04	0.98	0.97	0.98
T213	173	1.11	0.98	0.98	0.98
T214	126	1.04	0.98	0.99	0.99

Table 1: Results of correlation study between VMADCP at T2XX stations and SMADCP at T00.

MEASUREMENTS

- An SMADCP dataset over 37 days at T00 reference station.
- Several semi-stationary VMADCP datasets at T2XX potential turbine locations. Measurements were undertaken during spring tides at each location over ~5-minute intervals every hour, for 12 hours. During each interval, the vessel kept its position within a 11-meter radius around the nominal location (Fig. 2).
- For validation purposes, VMADCP measurements were also undertaken above the SMADCP, at T00, continuously for 12 hours.

METHOD

- Measure
- SMADCP at T00 and VMADCP at T2XX
 - Extend SMADCP T00 data to 18.6 years using harmonic analysis and prediction
- Correlate
- Validate VMADCP against SMADCP at T00
 - Correlate VMADCP at T2XX with SMADCP at T00
- Predict
- Apply the correlations to obtain 18.6 years timeseries at T2XX

CONCLUSIONS

The MCP method used in this study has proven to be effective, with high coefficients of determination R^2 . Our findings are expected to be useful in complementing and improving the existing guidelines for tidal energy resource assessments. To the authors' knowledge, this is the first time a method of this kind has been field tested and, therefore, this work may have a substantial impact on driving forward tidal stream power harvesting.

REFERENCES

- International Electrotechnical Commission, "Marine energy - Wave, tidal and other water current converters. Part 201: Tidal energy resource assessment and characterization," 2015.
- T. Xu, K. A. Haas, and B. Gunawan, "Estimating annual energy production from short tidal current records," *Renew. Energy*, vol. 207, pp. 105-115, May 2023.

CONTACT INFORMATION

Eloi Droniou
eloi.droniou@dynamocean.com

The FloWatt Project: the first commercial deployment of vertical axis tidal turbine in the Raz Blanchard

AC. Bennis^a, R. Coquet^b, G. Germain^{*,c}, S. Guillou^d, M. Lafosse^e et al.

a. M2C, Université Caen Normandie, b. HydroQuest, c. LHyMar, Ifremer, d. LUSAC, Université Cherbourg Normandie, e. Energies De la Lune

* Corresponding author: gregory.germain@ifremer.fr

Key words: Tidal turbines, FloWatt, HydroQuest, Raz-Blanchard

Summary: The FloWatt project aims to develop an innovative design of a tidal turbine for high energetic sites and to deploy seven vertical axis turbines in the Alderney Race site, in the English Channel. The project is dedicated to demonstrate the efficiency of the HydroQuest's 2.5 MW turbine for commercial farm deployment. These industrial developments (led by Qair, HydroQuest and CMN) are based on a scientific research project, knowing that industrial developments need specific study to take into account all site specificity. Indeed, tidal energy sites are characterized by strong currents disturbed by bathymetry variations, wave and coastal effects, increasing flow variations. The project is composed of two main tasks:

- the deployment of a pilot farm with the manufacture, installation and operation of 7 turbines on the Raz-Blanchard site;
- the scientific developments to accelerate implementation of large-scale farms.

The scientific tools developed by the FloWatt partners will be used to fully study the Alderney Race tidal site and to qualify the new 2.5 MW design of HydroQuest's vertical axis turbine at sea critical offshore. The tidal energy potential assessment of the Alderney Race and its optimization for a commercial deployment will be studied based on pilot farm data measurements, numerical simulations and experimental measurements. The environmental impact of a large-scale deployment will be analyzed, based on measurements of the initial state and the return pilot farm experience. Those tasks will be carried out by 4 complementary partners: Hydroquest, Energie De la Lune, Ifremer and University of Caen. A major part of the objective will be reached after the first demonstrator has been commissioned. Many tasks depend on the successful operation of the demonstrator. Indeed, the partners will use the first turbine to carry out in-situ measurements. An overall comparison between real and modeled data will be performed.

The preliminary developments have been validated from the successful deployment of a 1 MW turbine on the Paimpol-Bréhat test site (in Brittany, France) [1, 2]. Experimental and numerical tools are used, as well as in-situ measurements to help to the farm deployment. The experimental work is done in the Ifremer wave and current flume tank at a 1/20 scale [3, 4]. Local and regional numerical models are used to quantify the tidal potential of the site. The three-dimensional model Telemac3D with turbines represented as actuator disks is used to assess the efficiency of a tidal array in realistic flow conditions and for different operating scenarios [5].

The deep assessment of Raz Blanchard will allow to deliver a numerical model of this site based on both measurements and modeling. This tool will be an added value for future assessment of other tidal sites in the world. Such achievement has never been performed at a whole tide site's scale before. It will require many different measurements and an accurate analysis of data. Such innovation will lead to a better theoretical understanding of oceans and therefore, it will permit accurate and reliable forecasts of tidal power exploitation. The partners will also work together to optimize exploitation farms features, especially regarding the implementation of turbines [6, 7]. Gathering all these results will ensure the consortium to accurately assess the output power of large tidal farms. Specific in-situ measurements are also done in order to improve environmental and operational condition assessment [8]. High technology tools will be used to qualify as accurately as possible a theoretical evaluation of the Alderney Race. Practical measurements of Raz Blanchard will be performed from the start of the project to get an accurate knowledge of the bathymetry and of hydrodynamical features at different water depth. These measurements will be performed with ADCP, x-Band radars and High Frequency radars. Different tide and offshore conditions will be considered in order to anticipate all possible scenarios. The final results will be the subject of an in-depth analysis and will then be integrated in the numerical modeling of the site. In this way, the hind-cast database ResourceCode will also be used to provide a relevant estimation of the power potential in the Alderney Race. Afterwards, combined turbine and site numerical models will provide a relevant estimation of power potential on Raz Blanchard, the model being validated from in-situ and experimental measurements (in a wave and current flume tank). The final objective of this part is to identify the most performing way to exploit the site.

References

- [1] M. Moreau, G. Germain, G. Maurice, and A. Richard, "Sea states influence on the behavior of bottom mounted full-scale twin vertical axis tidal turbine," *Ocean Engineering*, 2022.
- [2] M. Moreau, G. Germain, G. Maurice, A. Richard, and R. Coquet, "HydroQuest : Feedback from Paimpol-Bréhat and validation of the design method," in *14th European Wave and Tidal Energy Conference*, (Plymouth), pp. 2229–1–8, 2021.
- [3] M. Moreau, G. Germain, and G. Maurice, "Experimental performance and wake study of a ducted twin vertical axis turbine in ebb and flood tide currents at a 1/20th scale," *Renewable Energy*, 2023.
- [4] M. Moreau, G. Germain, and G. Maurice, "Experimental study of misaligned sheared flows effect on a ducted twin vertical axis turbine," *Applied Ocean Research*, 2023.
- [5] L. Jégo and S. Guillou, "Study of a Bi-Vertical Axis Turbines Farm Using the Actuator Cylinder Method," *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 5199, 2021.
- [6] M. Grondeau, S. Guillou, P. Mercier, and E. Poizot, "Wake of a ducted vertical axis tidal turbine in turbulent flows, LBM actuator-line approach," *Energies*, vol. 12, no. 22, p. 4273, 2019.
- [7] N. Dirieh, J. Thiébot, S. Guillou, and N. Guillou, "Blockage corrections for tidal turbines, application to an array of turbines in the alderney race," *Energies*, 2022.
- [8] A.-C. Bennis, L. Furgerot, P. Bailly Du Bois, E. Poizot, Y. Méar, and F. Dumas, "A winter storm in alderney race: Impacts of 3d wave–current interactions on the hydrodynamic and tidal stream energy," *Applied Ocean Research*, vol. 120, p. 103009, 2022.

The FloWatt Project

G. GERMAIN¹, AC. BENNIS², R. COQUET¹, S. GUILLOU², M. LAFOSSE⁴ et al.

¹ IFREMER, Boulogne sur Mer, France

² Université de Caen Normandie, France

³ HydroQuest, Grenoble, France

⁴ Energie De la Lune, Bordeaux, France

FLOWATT

HydroQuest

Ifremer



Introduction & Aim

The FloWatt project aims to develop an innovative design of a tidal turbine for high energetic sites and to deploy seven vertical axis turbines in the Alderney Race site, in the English Channel. The project is dedicated to demonstrate the efficiency of the HydroQuest's 2.5 MW turbine for commercial farm deployment. These industrial developments (led by Qair, HydroQuest and CMN) are based on a scientific research project presented here, knowing that industrial developments need specific study to take into account all site specificity. Indeed, tidal energy sites are characterized by strong currents disturbed by bathymetry variations, wave and coastal effects, increasing flow variations.

Method

The tidal energy potential assessment of the Alderney Race and its optimization for a commercial deployment is studied based on pilot farm data measurements, numerical simulations and experimental measurements. The environmental impact of a large-scale deployment is analyzed, based on measurements of the initial state and the return pilot farm experience. Those tasks are carried out by 4 complementary partners: Hydroquest, Energie De la Lune, Ifremer and University of Caen. A major part of the objective will be reached after the first demonstrator has been commissioned. Many tasks depend on the successful operation of the demonstrator. Indeed, the partners use the turbine to carry out in-situ measurements. An overall comparison between real and modeled data will be performed.

Experimental, numerical and in-situ tools

The scientific tools developed by the FloWatt partners are used to fully study the Alderney Race tidal site and to qualify the new 2.5 MW design of HydroQuest's vertical axis turbine at sea critical offshore. The preliminary developments have been validated from the successful deployment of a 1 MW turbine on the Paimpol-Bréhat test site (in Brittany, France).

Experimental and numerical tools are used, as well as in-situ measurements to help to the farm deployment. The experimental work is done in the Ifremer wave and current flume tank at a 1/20 scale. Local and regional numerical models are used to quantify the tidal potential of the site. The three-dimensional model Telemac3D with turbines represented as actuator disks is used to assess the efficiency of a tidal array in realistic flow conditions and for different operating scenarios.

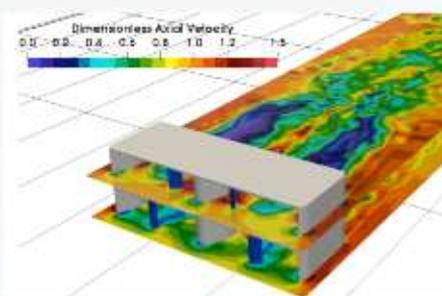
Specific in-situ measurements are also done in order to improve environmental and operational condition assessment. High technology tools (for instance High Frequency and X-band radars) are used to qualify as accurately as possible a theoretical evaluation of the Alderney Race. The hind-cast database ResourceCode is used to provide a relevant estimation of the power potential in the Alderney Race.



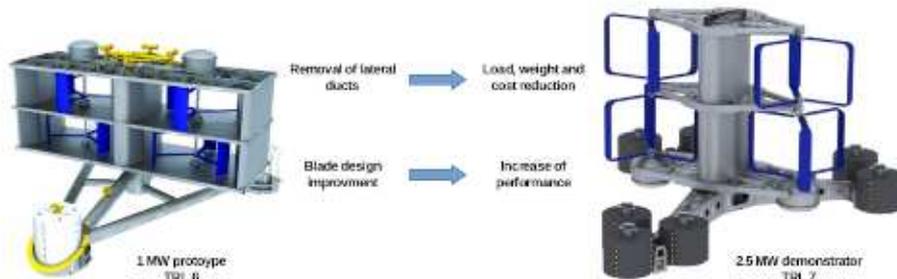
Experimental turbine performance evaluation at 1/20 scale [Moreau et al.]



In-situ measurement points in the Alderney Race pilot farm site [Bennis et al.]



Local simulation of 1 MW turbine tested in Paimpol-Brehat (Brittany, France) [Grondiau et al.]



Design evolution of HydroQuest's tidal turbine: from the 1 MW to the 2.5 MW capacity bottom mounted twin vertical axis tidal turbine.



Artist's rendering of the pilot farm FloWatt project based on 2.5 MW capacity turbines deployment in the Alderney Race (English channel, France).

References

- M. Moreau et al., Sea states influence on the behavior of bottom mounted full-scale twin vertical axis tidal turbine, Ocean Eng. 2022
- N.D. Dirieh et al., Blockage Corrections for Tidal Turbines, Application to an Array of Turbines in the Alderney Race, Energies 2022
- A.C. Bennis et al., A winter storm in Alderney Race: Impacts of 3D wave-current interactions on tidal stream energy, ApOR 2022
- M. Moreau et al., HydroQuest: Feedback from Paimpol-Bréhat and validation of the design method, EWTEC 2021
- L. Jégo, S. Guillou, Study of a Bi-Vertical Axis Turbines Farm Using the Actuator Cylinder Method, Energies, 2021
- M. Grondiau et al., Wake of a ducted vertical axis tidal turbine in turbulent flows, LBM actuator-line approach, Energies, 2019

Contact information

Raphaël COQUET :
raphael.coquet@hydroquest.net
Grégory GERMAIN :
gregory.germain@ifremer.fr

Effet du biofouling sur le comportement hydrodynamique de structures marines

JV. Facq, G. Germain*, G. Gaurier, et al.

Laboratoire d'Hydrodynamique Marine, Ifremer

* Corresponding author: gregory.germain@ifremer.fr

Key words: Cable, biofouling, hydrodynamique, colonisation.

Résumé : Les liaisons fond/surface utilisées pour le déploiement des éoliennes flottantes et des hydroliennes sont soumis à des sollicitations particulièrement sévères : mouvements de plateforme, interaction houle / courant, biofouling. Une bonne connaissance de leur comportement est donc nécessaire pour garantir leur durée de vie. L'objectif des travaux présentés ici est de quantifier expérimentalement les effets du macro-fouling sur le comportement dynamique de structures cylindriques (câbles d'export, ligne d'ancrage, élément de jacket) en présence de courant et de houle à partir de l'analyse des coefficients hydrodynamiques de traînée, de portance et de masse ajoutée, en pleine eau et près du fond.

Les structures étudiées étant de section relativement faible par rapport à leur longueur, il est nécessaire d'étudier le comportement hydrodynamique d'une portion limitée de ces structures à l'échelle 1 ou 1/2. Les capacités de génération de houle du bassin d'essais étant limitées, nous devons recourir à une modélisation des sollicitations de la houle sur les structures. La fixation des maquettes sous un hexapode positionné à la verticale de la section d'essais permet de reproduire ce type de sollicitation. Il est ainsi possible de réaliser des essais en courant seul, en mouvements imposés et en mouvements imposés avec courant. L'instrumentation utilisée permet de mesurer les efforts s'exerçant sur la structure, d'estimer les chargements subis en présence de houle et de courant et de caractériser l'écoulement autour des structures. Les techniques de fabrication (moulage, impression 3D) permettent de reproduire finement

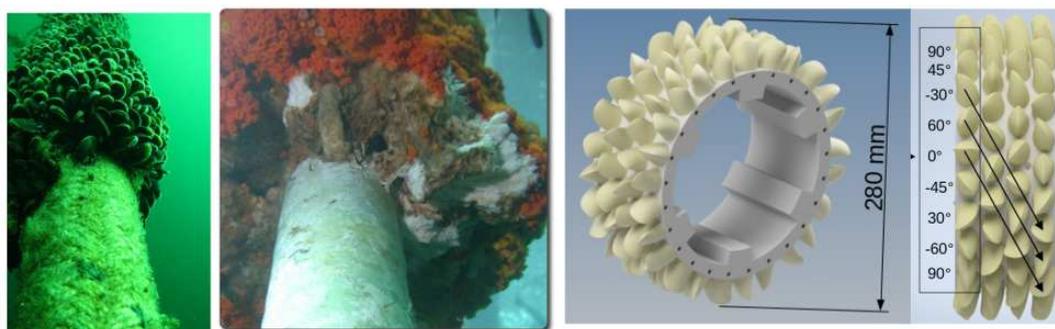


Figure 1: Illustration de colonisation par des moules sur une ligne d'ancrage et par des coraux sur un pied de plateforme et modélisation de la colonisation par des moules au stade adulte par impression 3D.

les caractéristiques géométriques du macro-fouling (balanes, moules, coraux) et d'étudier expérimentalement leurs effets sur le comportement hydrodynamique de structures allongées [1, 2]. Ces structures étant soumises à l'action combinées de la houle et du courant, il est également nécessaire d'étudier leurs effets sur le comportement dynamique des structures. Les capacités d'essais des infrastructures expérimentales disponibles étant limitées, nous devons recourir à une modélisation simplifiée où l'action de la

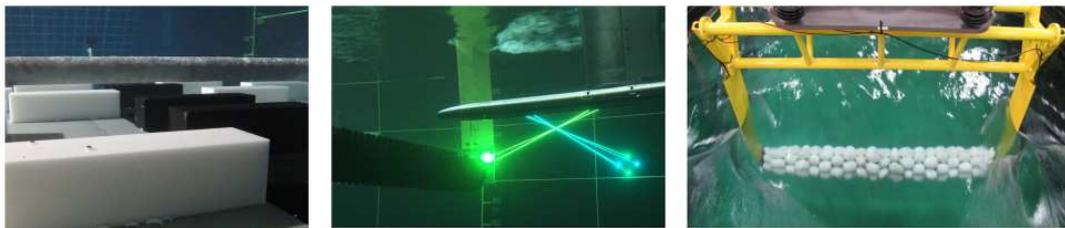


Figure 2: Modélisation d'une portion de câble sur un fond rugueux (à gauche), en pleine eau et colonisée par des moules (au centre) et par des coraux (à droite). L'hexapode permet d'imposer des mouvements aux maquettes. Illustration de la caractérisation du sillage par mesures LDV au centre.

houle est reproduite en imposant des mouvements périodiques imposés à des portions rigides de structure. Les résultats obtenus montrent qu'il est nécessaire d'avoir une parfaite estimation du recouvrement du macro-fouling pour estimer les chargements subis par la structure. Comme le montrent les figures ci-dessous, la connaissance de la répartition surfacique de la colonisation permet d'utiliser un coefficient de traînée unique, quelque soit le type d'espèce (moules ou coraux). Il en est de même pour le coefficient de masse ajoutée à condition de connaître la répartition volumique du fouling le long de la structure [3].

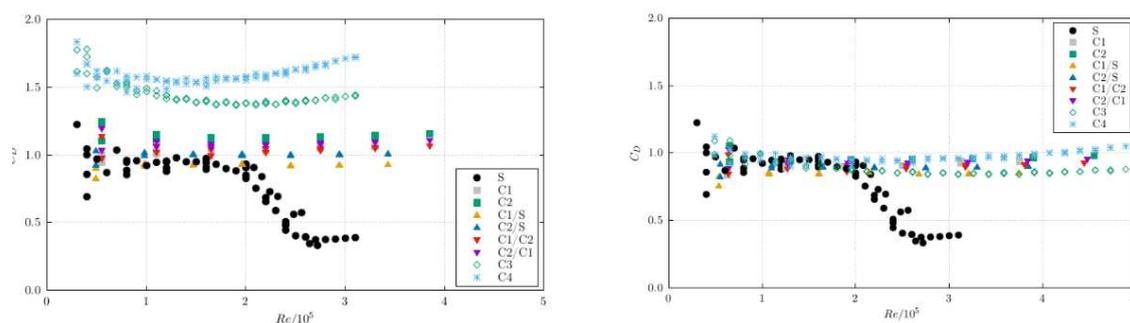


Figure 3: Evolution du coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds, calculés à partir du diamètre moyen (sans rugosité de surface, à gauche) et du diamètre avec rugosité (déterminé à partir de la surface projetée, à droite) pour les différents types de rugosité testés (S : cylindre lisse ; C1 et C2 colonisation homogène par des moules ; Cx/Y colonisation irrégulière par des moules ; C3 et C4 colonisation homogène par des coraux)

References

- [1] A. Marty, C. Berhault, G. Damblans, J.-V. Facq, B. Gaurier, G. Germain, T. Soulard, and F. Schoefs, "Experimental study of hard marine growth effect on the hydrodynamical behaviour of a submarine cable," *Applied Ocean Research*, vol. 114, p. 102810, 2021.
- [2] A. Marty, F. Schoefs, T. Soulard, C. Berhault, J.-V. Facq, B. Gaurier, and G. Germain, "Effect of roughness of mussels on cylinder forces from a realistic shape modelling," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 6, 2021.
- [3] A. Marty, F. Schoefs, G. Damblans, J.-V. Facq, B. Gaurier, and G. Germain, "Experimental study of two kinds of hard marine growth effects on the hydrodynamic behavior of a cylinder submitted to wave and current loading," *Ocean Engineering*, vol. 263, p. 112194, 2022.

Effet du biofouling sur le comportement hydrodynamique de structures marines

JV. FACQ, B. GAURIER, G. GERMAIN et al. ; IFREMER, Laboratoire d'HYdrodynamique MARine - LHYMAR, Boulogne sur Mer, France

Contexte et objectifs

Les liaisons fond/surface utilisées pour le déploiement des éoliennes flottantes et des hydroliennes sont soumis à des sollicitations particulièrement sévères : mouvements de plateforme, interaction houle / courant, biofouling. Une bonne connaissance de leur comportement est donc nécessaire pour garantir leur durée de vie.

L'objectif des travaux présentés ici est de quantifier expérimentalement les effets du macro-fouling sur le comportement dynamique de structures cylindriques (câbles d'export, ligne d'ancrage, élément de jacket) en présence de courant et de houle à partir de l'analyse des coefficients hydrodynamiques de traînée, de portance et de masse ajoutée, en pleine eau et près du fond.

Méthode

Les structures étudiées étant de section relativement faible par rapport à leur longueur, il est nécessaire d'étudier le comportement hydrodynamique d'une portion limitée de ces structures à l'échelle 1 ou 1/2. Les capacités de génération de houle du bassin d'essais étant limitées, nous devons recourir à une modélisation des sollicitations de la houle sur les structures. La fixation des maquettes sous un hexapode positionné à la verticale de la section d'essais permet de reproduire ce type de sollicitation. Il est ainsi possible de réaliser des essais en courant seul, en mouvements imposés et en mouvements imposés avec courant. L'instrumentation utilisée permet de mesurer les efforts s'exerçant sur la structure, d'estimer les chargements subis en présence de houle et de courant et de caractériser l'écoulement autour des structures.

Dispositif expérimental

Les techniques de fabrication (moulage, impression 3D) permettent de reproduire finement les caractéristiques géométriques du macro-fouling (balanes, moules, coraux) et d'étudier expérimentalement leurs effets sur le comportement hydrodynamique de structures allongées. Ces structures étant soumises à l'action combinées de la houle et du courant, il est également nécessaire d'étudier leurs effets sur le comportement dynamique des structures. Les capacités d'essais des infrastructures expérimentales disponibles étant limitées, nous devons recourir à une modélisation simplifiée où l'action de la houle est reproduite en imposant des mouvements périodiques imposés à des portions rigides de structure.

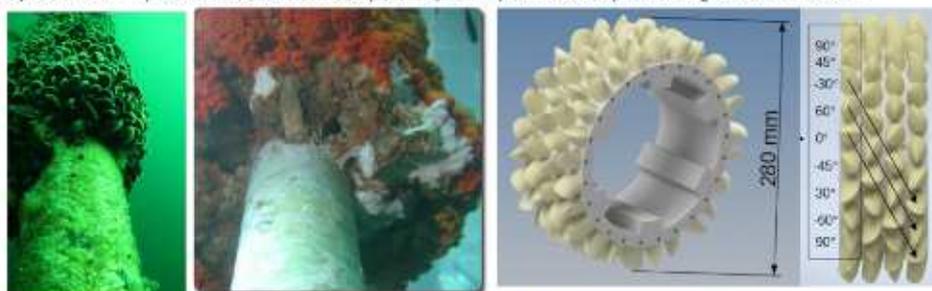


Illustration de colonisation par des moules sur une ligne d'ancrage et par des coraux sur un pied de plateforme (photos de gauche). Modélisation de la colonisation par des moules au stade adulte par impression 3D (figures de droite).

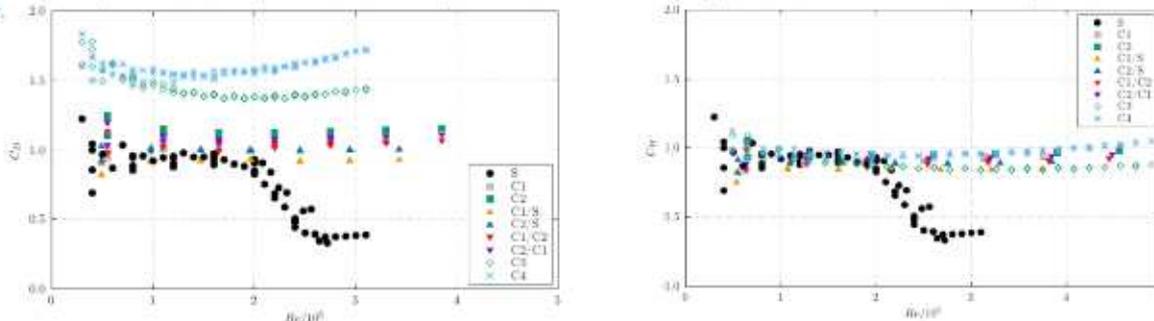
L'étude du comportement dans la colonne d'eau ou proche de la surface s'effectue au centre de la section d'essais. Pour la modélisation des effets du fond, un plateau à rugosité variable peut être déployé à proximité plus ou moins proche du cylindre.



Modélisation d'une portion de câble sur un fond rugueux (à gauche), en pleine eau et colonisée par des moules (au centre) et par des coraux (à droite). L'hexapode permet d'imposer des mouvements aux maquettes. Illustration de la caractérisation du siège par mesures LDV au centre.

Principaux résultats

Les résultats obtenus montrent qu'il est nécessaire d'avoir une parfaite estimation du recouvrement du macro-fouling pour estimer les chargements subis par la structure. Comme le montrent les figures ci-dessous, la connaissance de la répartition surfacique de la colonisation permet d'utiliser un coefficient de traînée unique, quelque soit le type d'espèce (moules ou coraux). Il en est de même pour le coefficient de masse ajoutée à condition de connaître la répartition volumique du fouling le long de la structure.



Evolution du coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds, calculés à partir du diamètre moyen (sans rugosité de surface, à gauche) et du diamètre avec rugosité (déterminé à partir de la surface projetée, à droite) pour les différents types de rugosité testés (S : cylindre lisse ; C1 et C2 colonisation homogène par des moules ; Cx/Y colonisation irrégulière par des moules ; C3 et C4 colonisation homogène par des coraux).

Références

- A. Marty et al. Experimental comparative study of two kinds of hard marine growth effects on the hydrodynamical behaviour of a cylinder submitted to wave and current solicitations, Ocean Engineering, 2022
- A. Marty et al. Effect of roughness of mussels on cylinder forces from a realistic shape modelling, JMSE, 2021
- A. Marty et al. Experimental study of hard marine growth effect on the hydrodynamical behaviour of a submarine cable, Applied Ocean Research, 2021

Contacts

- Benoit GAURIER :
benoit.gaurier@ifremer.fr
- Grégory GERMAIN :
gregory.germain@ifremer.fr

Modélisation physique de l'impact d'un câble d'export d'énergie sur la dynamique sédimentaire

Mélanie Vah^{*,a}, Armelle Jarno^a, François Marin^a

a. Laboratoire LOMC, UMR 6294 CNRS, Université Le Havre Normandie, France

* Corresponding author: melanie.vah@univ-lehavre.fr

Key words ou Mots clés: Seuil de mise en mouvement, sable, modélisation physique, câble d'export, pré-excitation

Summary ou Résumé:

Comprendre l'impact d'un câble d'export d'énergie sur la dynamique sédimentaire est essentiel afin de limiter les risques de dommage sur celui-ci (ensouillage, mise en suspension du câble, ...) mais aussi de limiter son impact environnemental. Dans le cadre des parcs hydroliens, les câbles sont le plus souvent posés sur le fond que ce soit au niveau du parc mais aussi loin de la côte pour le câble d'atterrage [1]. Le seuil de mise en mouvement des sédiments joue un rôle important dans la quantification du transport par charriage des grains. Une modification de ce seuil due à la présence d'un câble peut aussi augmenter le risque d'affouillement sous celui-ci. De plus, parmi les nombreux paramètres pouvant affecter la valeur du seuil de mise en mouvement, les conditions hydrodynamiques antérieures peuvent avoir un effet important [2].

Une modélisation physique en canal à courant est réalisée. Le canal est équipé d'une pompe permettant de générer une rampe d'accélération constante de $1,3\text{mm/s}^2$ dans le cas présent entre 0 et $0,6\text{m/s}$ de vitesse débitante. Les dimensions du canal sont les suivantes : largeur de $0,49\text{m}$, longueur de 10m avec une hauteur d'eau de $0,25\text{m}$ au dessus du lit sableux. Le lit sableux d'une épaisseur de $0,01\text{m}$ est composé d'un sable moyen bien trié de diamètre médian $D_{50}=328\mu\text{m}$. Un câble cylindrique de diamètre $D=1,2\text{cm}$ est posé sur le lit sableux à une distance de 6m à l'aval du nid d'abeille lors de la réalisation des mesures du seuil de mise en mouvement. L'écoulement est turbulent. Le seuil de mise en mouvement des sédiments en fonction de la distance au câble, x , est mesuré en utilisant la méthode proposée par Vah et al. 2022 [3]. Cette méthode permet de mesurer le seuil de mise en mouvement par charriage à partir de la visualisation d'une surface équivalente à 3000 grains soit dans le cas présent de l'ordre de $2,5\text{cm}^2$. Une comparaison est effectuée entre un cas sans cylindre et un cas où le lit sédimentaire a subi une pré-excitation pendant 1h à 80% de la valeur du seuil mesuré sans le câble. La pré-excitation s'effectue sans le câble au fond.

Le nombre de Shields $\theta = \frac{u_*^2}{(s-1)gD_{50}}$ (u_* la vitesse de frottement au fond, s la densité des sédiments ($s=2,65$) et g l'accélération de la gravité) correspondant à la contrainte adimensionnelle permettant le mouvement des sédiments est calculé à partir de la vitesse de l'écoulement au seuil de mise en mouvement par charriage [3].

Les résultats de la figure 1A montre que la zone à l'aval du câble, jusqu'à environ 20 diamètres de celui-ci, nécessite une contrainte au fond plus faible pour que le sable se mette en mouvement. Il y a donc un risque accru d'érosion à l'aval du câble. Concernant l'impact de la pré-excitation, les résultats

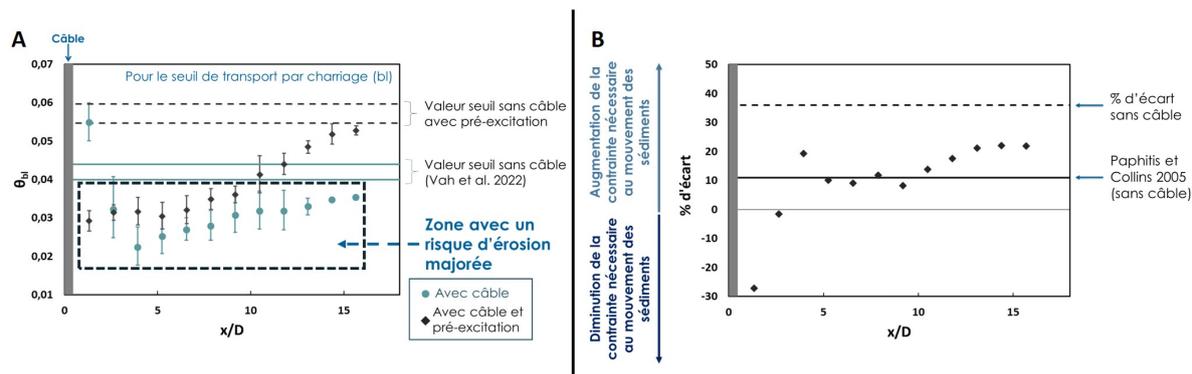


Figure 1: A : Initiation du mouvement des sédiments en courant unidirectionnel en fonction de x/D . Comparaison avec les valeurs sans câble. B : Pourcentage d'écart de la vitesse, en présence du câble, sur le seuil en fonction de x/D induit par une pré-excitation.

sans câble montre que celle-ci a un effet stabilisateur sur le lit sableux avec une nette augmentation de la contrainte nécessaire à sa mise en mouvement d'environ 35% (Fig. 1B). En présence du câble et entre environ 3 et 12 D à l'aval du câble, la pré-excitation entraîne une augmentation de la contrainte nécessaire par rapport au cas où le câble est présent sans pré-excitation du fond. Elle reste néanmoins inférieure à la valeur seuil sans câble ni pré-excitation. En revanche à partir de 12 D à l'aval du câble, la pré-excitation a un effet stabilisateur sur le lit sédimentaire avec une diminution du risque d'érosion. Très proche du câble (distance inférieure à 3 diamètres), l'augmentation de la contrainte obtenue lors du test avec câble sans pré-excitation n'est plus détectable avec, dans le cas d'une pré-excitation, une contrainte proche de celle trouvée entre 3 et 12 D. Il y a alors un risque très important d'affouillement sous le câble.

Une bonne connaissance des conditions hydrodynamiques antérieures est donc nécessaire afin de prévoir les risques de dommage sur les câbles d'export posés sur le fond.

References

- [1] B. Taormina, J. Bald, A. Want, G. Thouzeau, M. Lejart, N. Desroy, and A. Carlier, "A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, pp. 380–391, 2018.
- [2] D. Paphitis and M. Collins, "Sand grain threshold, in relation to bed 'stress history': an experimental study," *Sedimentology*, vol. 52, no. 4, pp. 827–838, 2005.
- [3] M. Vah, A. Khoury, A. Jarno, and F. Marin, "A visual method for threshold detection of sediment motion in a flume experiment without human interference," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 47, no. 7, pp. 1778–1789, 2022.

Remerciements:

Les auteurs remercient le programme Interreg VA France (Manche) Angleterre via le projet TIGER qui a permis le financement de cette étude.



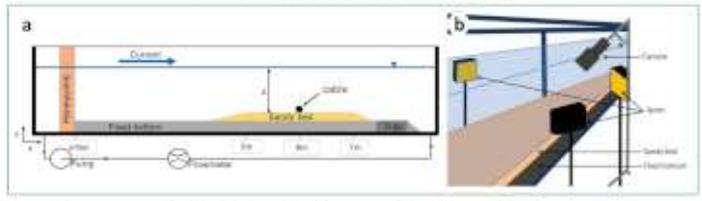
Modélisation physique de l'impact d'un câble d'export d'énergie sur la dynamique sédimentaire

VAH M., JARNO A. and MARIN F. Laboratoire LOMC, UMR 6294 CNRS, Université Le Havre Normandie, France
melanie.vah@univ-lehavre.fr

Contexte

Comprendre l'impact d'un câble d'export d'énergie sur la dynamique sédimentaire est essentiel pour prédire les dommages sur le câble. Les modifications environnementales induites par l'Homme doivent aussi être comprises.

Dispositif expérimental



- Canal à courant de 10 m de long et 0,49 m de large
- Débitmètre acoustique (f=1Hz)
- Caméra haute résolution placée en x=6m
- Fréquence d'acquisition des images = 2 Hz
- 3 spots LED : 20 W/spot
- Résolution des images : ≈ 100 μm/pixel
- d=0,25 m / α=40°
- Épaisseur sédimentaire = 1 cm



Paramètres

Câble

Diamètre du câble : D = 1,2 cm
Posé sur le lit sableux en contact avec celui-ci
Fixé aux parois latérales du canal

Sédiments

Sable médian bien trié : D₅₀ = 328 μm

Écoulement pour la mesure du seuil

Vitesse débitante (U) : entre 0 et 0,6 m/s
Nombre de Reynolds R = $\frac{Ud}{\nu}$ entre 0 et 150 000
Accélération constante : 1,3 mm/s²

Pré-excitation

Vitesse débitante constante pendant 1h
Valeur de la vitesse = 80% de la vitesse au seuil bl sans le câble (Vah et al. 2022)
La pré-excitation s'effectue sans le câble

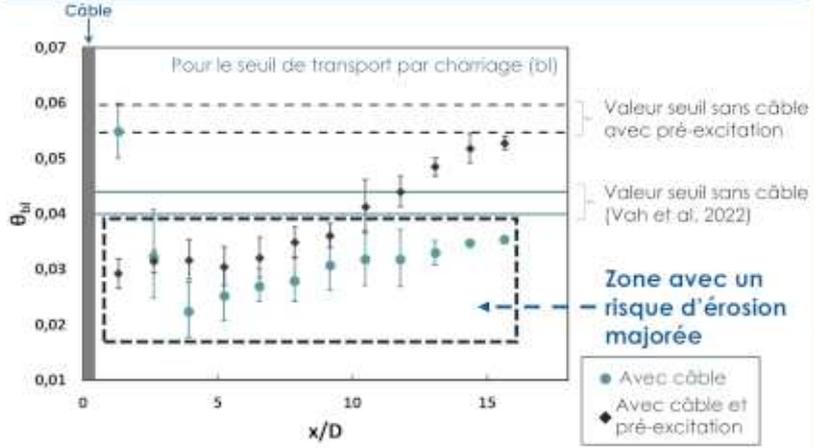
Tests

Tests réalisés avec et sans pré-excitation en présence du câble lors de la mesure du seuil
Comparaison avec des tests sans câble

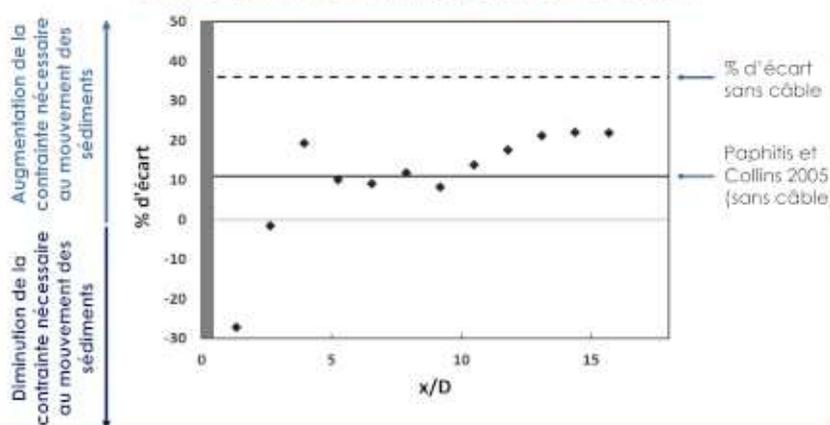
Impact du câble sur le seuil de mise en mouvement des sédiments par charriage

Initiation du mouvement des sédiments en courant unidirectionnel :

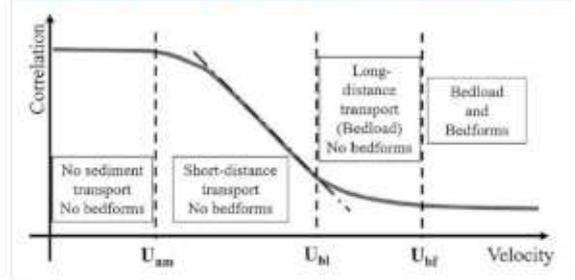
Nombre de Shields : $\theta = \frac{u_*^2}{(\frac{\rho_s - \rho}{\rho})g D_{50}}$ — Vitesse de frottement au fond
— Gravité réduite



Pourcentage d'écart de la vitesse, en présence du câble, sur le seuil bl en fonction de x/D induit par une pré-excitation :



Méthode de mesure des seuils de mise en mouvement par corrélation d'image



Voir Vah et al. 2022 pour plus de détails

Détection automatique des différents seuils de mise en mouvement des sédiments à l'aide d'une caméra haute résolution et des vitesses de courant instantanées.

La surface minimale permettant la détection des seuils est équivalente à 3 000 grains.

nm = mouvement du premier grain
bl = seuil du transport par charriage
bf = seuil du formation des structures sédimentaires

Conclusions

Impact du câble d'export d'énergie sur une distance de l'ordre de 20 diamètres à l'aval de celui-ci avec une zone à fort risque d'érosion.

La pré-excitation du fond induit une augmentation de la contrainte nécessaire à la mobilisation des sédiments sauf très proche du câble jusqu'à 3 diamètres environ.

Bibliographie

Paphitis, D., and Collins, M. B. (2005). Sand grain threshold, in relation to bed 'stress history': an experimental study. *Sedimentology*, 52(4), 827-838.
Vah M., Khoury A., Jarno A., and Marin F. (2022). A visual method for threshold detection of sediment motion in a flume experiment without human interference. *Earth Surface Processes and Landforms*.



Les auteurs remercient le programme Interreg VA France (Manche) Angleterre via le projet TIGER qui a financé cette étude.