

Ilan ROBIN : ilan.robin@unicaen.fr

ÉTUDE EXPLORATOIRE DES EFFETS DU BIOFOULING SUR LES PERFORMANCES ET LE SILLAGE DES HYDROLIENNES

Auteurs : ROBIN Ilan¹, BENNIS Anne-Claire¹, DAUVIN Jean-Claude¹

¹ Normandie Université, UNICAEN, CNRS, Morphodynamique Continentale et Cotière (M2C), Caen, France. Contact : ilan.robin@unicaen.fr

RESUME : *La transition énergétique passe par une réorganisation de la répartition des sources d'énergies. La puissance totale des énergies renouvelables (ENRs) doit augmenter dans les prochaines années. La technologie hydrolienne marine a comme avantage de fournir une énergie faiblement carbonée prédictible. Mais son développement soulève des problématiques qui lui sont propres : dans l'eau, en milieu naturel, des organismes vivants colonisent les surfaces des turbines immergées, c'est le biofouling. Celui-ci induit des changements sur le comportement des hydroliennes que l'on cherche à décrire et quantifier à l'aide d'outils numériques. Plusieurs aspects sont abordés dans notre approche : d'abord dans le cas simplifié d'une pale droite dans un écoulement rectiligne uniforme permet de valider le modèle numérique. Puis une hydrolienne complète à axe horizontal dont les pales sont colonisées de façon réaliste est étudiée. La comparaison des données de la turbine propre à celle colonisée montre une réduction de la puissance de l'hydrolienne et une augmentation de sa traînée. Les effets de l'ajout de biomasse de faune sur le démarrage des machines sont ensuite étudiés à l'aide d'un système innovant d'Interaction Fluide-Structure (IFS) : le mouvement induit par le fluide. Le biofouling pourrait avoir un effet conséquent sur l'amorçage de la mise en rotation, et pourrait même bloquer les hydroliennes à axe vertical. Le couplage entre des code Eulérien et Lagrangien pourrait faciliter l'étude de problématiques fluides multi-échelles en réduisant les temps de calcul requis.*

MOTS CLEFS : Énergies marines renouvelables, Hydroliennes, Interaction fluide-structure, Biofouling, Turbulence

ABSTRACT (en anglais): *The energy transition requires a reorganization of the distribution of energy sources. The total power of renewable energies (ENRs) must increase in the future years. The advantage of marine tidal turbine technology is that it provides predictable, low-carbon energy. But its development has its own problems: in the water, in a natural environment, living organisms colonize the surfaces of submerged turbines, this is the biofouling. This involves changes in the behaviour of tidal turbines that we seek to describe and quantify using numerical tools. Several aspects are addressed: firstly in the simplified case of a straight blade in a uniform flow is used to validate the numerical model. Then a complete horizontal axis tidal turbine with realistically colonized blades is studied. Comparison of the data from the clean turbine to the colonized one shows a decrease in the power of the tidal turbine and an increase of its drag. The effects of the addition of biological biomass on the start-up of the machines are then investigated using an innovative Fluid-Structure Interaction (FSI) system: fluid-induced motion. The biofouling could have a significant effect on the initiation of the rotation especially for vertical axis turbines. The coupling between Eulerian and*

Lagrangian codes could simplify the study of multi-scale fluid problems by diminishing the required computation time.

KEYWORDS: Tidal turbine, CFD, Roughness, Fluid-Structure Interactions

1. Introduction

Alors que les énergies renouvelables terrestres, en particulier l'éolienne, sont fortement critiquées par les populations impactées, le déploiement des Énergies Marines Renouvelables (EMR) devient la stratégie privilégiée notamment en France. Leur potentiel est important, pouvant aller jusqu'à plusieurs TWh/mois simplement pour les éoliennes en mer. L'énergie hydrolienne a l'avantage d'être une énergie prédictible, ce qui facilite son intégration sur un réseau intelligent de l'énergie (Smart Grid).

L'état immergé des turbines soulève, par ailleurs, un certain nombre de problématiques relatifs à l'environnement marin comme la forte turbulence, l'étanchéité, la cavitation ou même le biofouling correspondant à une accumulation d'organismes biologiques à la surface des structures immergées.

Les effets du biofouling sont encore aujourd'hui peu connus, car peu étudiés. Les études expérimentales (Orme *et al.*, 2001 ; Walker *et al.*, 2020) montrent une détérioration de la portance sur les profils de pales mais l'approche est limitée par les difficultés à faire varier les configurations et le respect des principes de mise à l'échelle.

L'approche numérique a pour avantage de pouvoir passer outre ces contraintes, tout en donnant accès aux sillages des turbines. Qiuhaio *et al.* (2017) utilisent une condition uniforme de rugosité sur une hydrolienne à axe horizontal pour exploiter les avantages de l'approches numérique 3D. Les données *in-situ* montrent toutefois une hétérogénéité dans la répartition des individus colonisateurs. Rivier *et al.* (2018) choisissent donc une approche 2D pour représenter le biofouling de façon explicite. C'est pourquoi, le laboratoire UMR M2C Caen s'est donné pour objectif d'étudier les interactions entre biologie et physique (Raoux *et al.*, 2021) et d'investiguer les différentes approches novatrices possibles pour le modéliser dont un résumé est ici présenté.

La section 2 présente l'approche générale de modélisation numérique choisie dans les études suivantes (Robin *et al.*, 2021a). La section 3 s'intéresse aux effets d'un biofouling réaliste sur les performances et le sillage des hydroliennes (Robin *et al.* 2021a). La section 4 présente l'approche par rotation induite permettant d'introduire la notion de biomasse dans les modèles (Robin *et al.*, 2021b). Enfin, la section 5 constitue les discussions et la conclusion.

2. Méthodologie et validation

La méthode sélectionnée pour répondre au problème posé devait nécessairement permettre à la fois d'étudier les effets du biofouling sur les performances, mais également sur le sillage des hydroliennes.

L'analyse des contraintes de modélisations induites par le biofouling sont décrites par la Fig. 1. La modélisation explicite de la turbulence est jugée la plus adaptée.

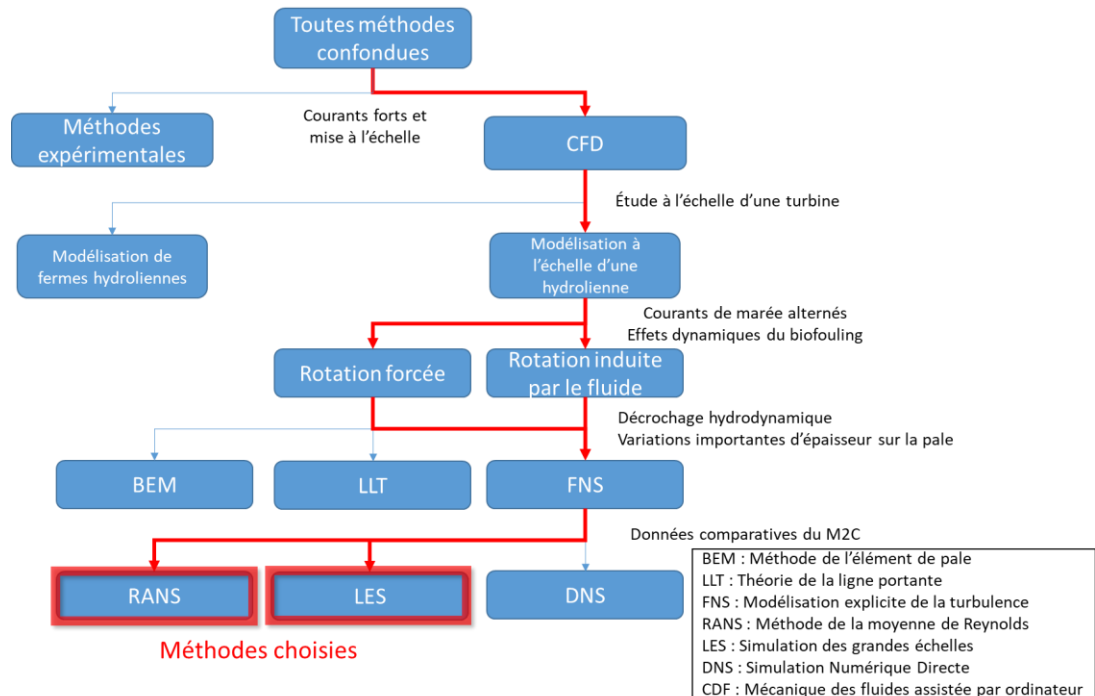


Figure 1: Arbre de décision de la méthode choisie pour étudier le biofouling. Les contraintes apparaissent en noir. Le choix suit le chemin rouge en conséquence (d'après Robin, 2021).

Les équations de continuité et de quantité de mouvement sont résolues sous leur forme incompressible grâce à l'algorithme pression-vitesse de pimpleFoam d'OpenFoam.

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\mathbf{U}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{f} \quad (2)$$

Où \mathbf{U} est la vitesse du fluide, p est sa pression, ρ sa masse volumique, t le temps et \mathbf{f} les forces extérieures qui s'appliquent sur le fluide.

Une condition de vitesse moyenne est appliquée à l'entrée du domaine et une condition de pression à sa sortie. Les bords du domaine sont associés d'une condition de glissement afin de limiter les effets de bords. Une condition de non-glissement est appliquée à la surface des hydroliennes, avec une vitesse nulle en paroi.

Les forces de pression et visqueuses sont directement calculées dans le référentiel inertiel en intégrant la pression et les contraintes de cisaillement sur la surface où elles s'appliquent.

Deux modèles de turbulence ont été testés et comparés sur un cas simplifié de pale en translation rectiligne uniforme, construit sur l'étude expérimentale de Walker *et al.* (2020). Une unique balane (crustacé se fixant sur tout support dur en mer) est positionnée sur l'extrados de la pale. Le modèle LES-Smagorinsky, amélioré par une équation de fermeture pour l'énergie cinétique de sous-maille, est retenu par rapport au modèle RANS-k-omega-SST pour ses capacités à bien reproduire l'écoulement turbulent aval des turbines.

La comparaison des données numériques aux données expérimentales montre une bonne concordance des résultats pour les champs de pression autour de la balane. En amont de celle-ci, le fluide s'accumule et génère une surpression sur la surface. Sur le dessus, le décrochage du fluide génère une forte dépression. Comme pour l'expérience, l'impact de la balane réduit quand l'angle d'incidence de la pale augmente. Ces simulations montrent un intérêt supplémentaire à l'utilisation de l'approche numérique. La discrétisation spatiale plus fine d'un maillage, permet de faire apparaître des phénomènes physiques qui auraient pu échapper aux sondes, peu nombreuses de l'expérience. Une faible dépression est ainsi observée en amont de la surpression principale pour les angles d'incidence de la pale les plus faibles (5° et 10°).

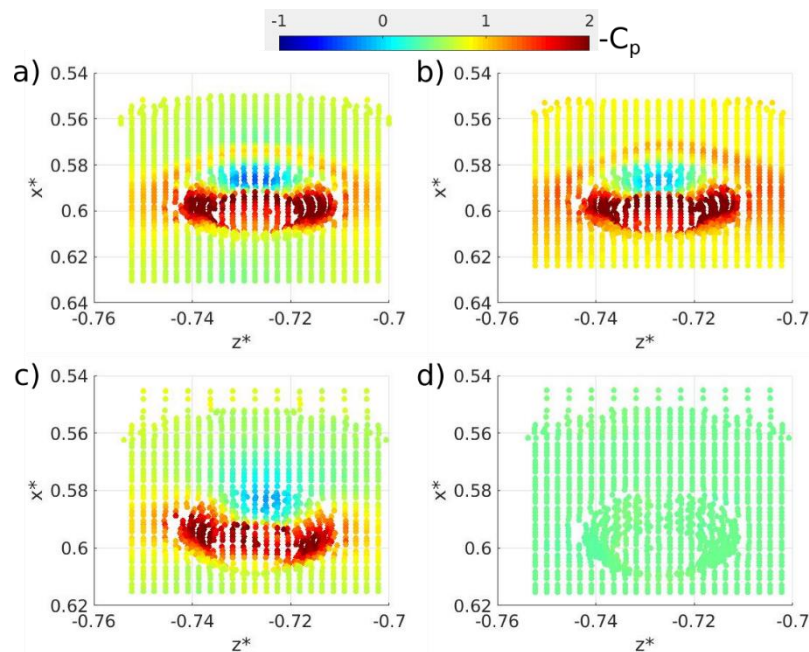


Figure 2: Opposé du coefficient de pression ($-C_p$) autour de la balane numérique (d'après Robin, 2021a).

Pour les angles d'incidence faibles, l'analyse du sillage montre que les allées de Von Karman, que l'on retrouve dans le cas des pales propres, sont perturbées en présence de la balane. L'étude de l'épaisseur du sillage donne une bonne appréciation des phénomènes qu'induit l'implantation d'une balane sur le sillage. La présence de la balane fait passer

l'évolution spatiale de l'épaisseur du sillage de parabolique à linéaire. Sur une courte distance (4 cordes en aval), la présence de biofouling induit donc une meilleure diffusion dans le sillage.

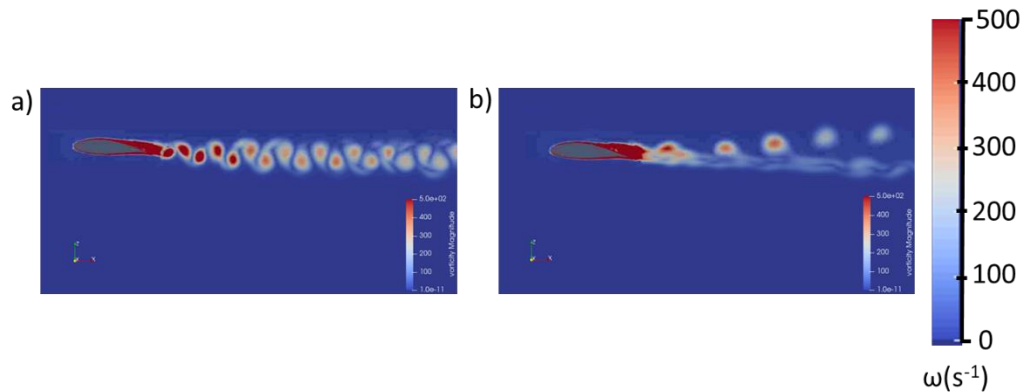


Figure 3: Vorticité derrière une pale propre (a) et une pale avec une balane (b) (d'après Robin, 2021a).

3. Étude hydrodynamique du biofouling sur un rotor tridimensionnel

Le modèle choisi, est appliqué à un cas plus complexe, celui d'un rotor tridimensionnel complet. Les données expérimentales ayant servi de validation pour cette partie sont issues d'une campagne expérimentale visant à étudier les effets de l'intensité turbulente sur le comportement des hydroliennes (Mycek, 2013). Une étude complète de convergence en maillage est réalisée pour s'assurer de l'indépendance des résultats par rapport au maillage. Le maillage final compte plus de 12 M de cellules de calcul. Le domaine est subdivisé en deux parties : une fixe, et une rotative simulant la rotation de la turbine. Les caractéristiques du fluide passent de l'une à l'autre au travers d'une AMI. La comparaison des résultats numériques de la turbine propre avec les données expérimentales montre une bonne cohérence à la fois pour le sillage aval et les coefficients de puissance (C_p) et de traînée (C_d).

Une implantation réaliste du biofouling sur les pales est ensuite réalisée à l'aide des données de Walker *et al.* (2020). Une meilleure dissipation de l'énergie dans le sillage marquée par une plus grande homogénéité dans le spectre fréquentiel de la vitesse en aval de l'hydrolienne est observée. Le coefficient de puissance diminue de 5,6% par rapport au cas propre tandis que le coefficient de traînée augmente de 7,5%.

Ces valeurs sont inférieures à celles trouvées in-situ, mais s'expliquent par plusieurs facteurs. La configuration réaliste choisie contient de nombreux individus sur la partie aval de la pale (à plus de 60% de la corde), ils sont donc souvent placés derrière le décrochage dynamique des pales. Ensuite, le biofouling réaliste est représentatif d'une zone très particulière : sans algue ni accumulation sédimentaire sur les pales. Les faibles densités et tailles des individus joue un rôle dans la sous-évaluation de l'impact du biofouling.

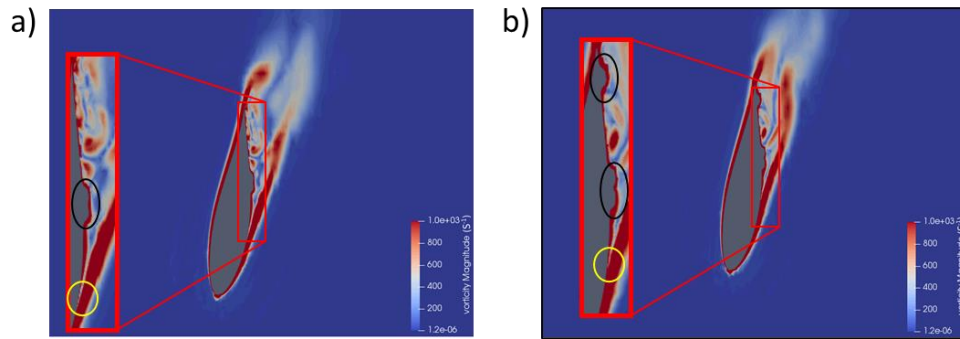


Figure 4: Vitesse de l'écoulement autour de deux transect de pales pour une turbine en rotation. Les cercles noirs identifient les balanes et les cercles jaunes la position du décrochage hydrodynamique. a) cas avec une balane b) cas avec deux balanes (d'après Robin, 2021a).

4. Démarrage des hydroliennes : rotation induite par le fluide

L'étude du biofouling introduit également des problèmes inédits à l'étude des turbines, en particulier celui de la variation temporelle de la masse des pales. Au fur et à mesure de la colonisation, la biomasse augmente, modifiant la dynamique de démarrage des hydroliennes.

Le plus souvent, pour leur étude, les turbines sont mises en rotation par un moteur (expérimental) ou ont une vitesse de rotation forcée par le code (numérique) afin de réguler facilement le Tip Speed Ratio (TSR). Or cette méthode a deux inconvénients. Elle ne permet pas de prendre en compte des variations de masse qui pourraient impacter le démarrage des turbines et elle introduit dans le système une énergie supplémentaire (celle du moteur) qui n'existe pas dans le cas d'un fonctionnement réel d'hydrolienne (Fig.5). Étudier le biofouling permet donc de s'intéresser à la dynamique de démarrage des turbines avec une approche qui respecte la chaîne énergétique : la rotation induite. Dans ce cas, les pales sont mises en mouvement par le fluide lui-même en prenant en compte la masse propre à celles-ci.

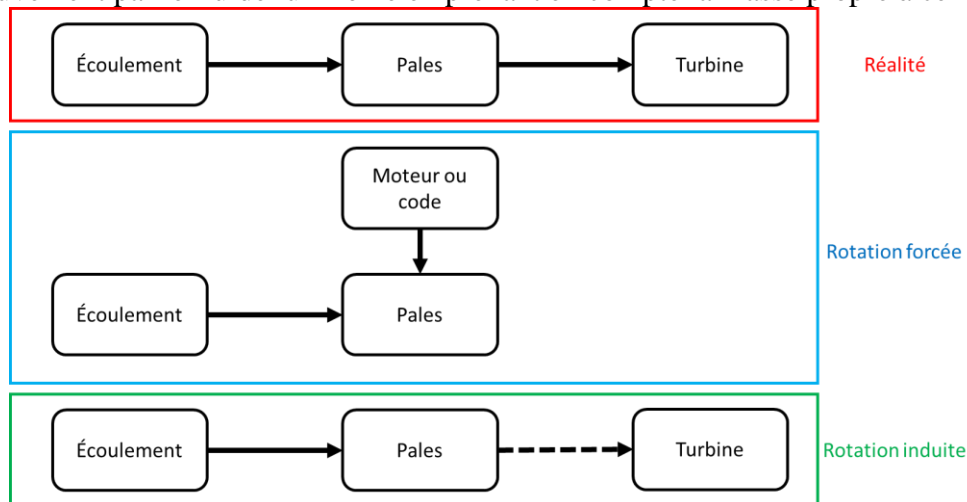


Figure 5: Différentes chaînes de transmission énergétique selon l'approche choisie. En rouge, le fonctionnement réel. En bleu, l'approche habituelle de rotation forcée. En vert, l'approche par rotation induite par le fluide (d'après Robin, 2021).

Cette approche est appliquée à une turbine à axe vertical qui a une dynamique de démarrage différente d'une turbine à axe horizontal car elle possède un point de stabilité propre à sa géométrie.

Les calculs en rotation induite montrent une forte sensibilité des résultats au maillage. En effet, plus le raffinement autour des pales est élevé, moins la diffusion numérique est forte et plus la turbine accélère. En rotation libre, la turbine peut ainsi atteindre de très hautes vitesses de rotation. On peut séparer les effets de biofouling en deux catégories. L'effet inertiel uniquement dû à la variation de masse génère un léger retard (0,1 s en 4 s de simulation) dans la mise en rotation de la turbine. La perturbation de l'écoulement a un impact beaucoup plus fort. Elle peut fortement accélérer (implantation d'individus sur l'intrados) ou ralentir (implantation sur l'extrados) l'hydrolienne.

5. Discussions et conclusion

L'étude de l'impact du biofouling à la fois sur le sillage et les performances des hydroliennes est plus complexe qu'il n'y paraît. La colonisation induit des effets de décrochages dynamiques très localisés qui empêchent une résolution grossière. Les études tridimensionnelles par résolution de la turbulence semblent être une bonne approche pour répondre aux problématiques fixées. Elles sont toutefois limitées par les importants coûts de calcul qu'elles impliquent.

En théorie, les approches lagrangiennes permettent de réduire ces temps de calcul. Elles sont toutefois mal adaptées aux problèmes d'interactions fluide-structure. Lorsqu'une particule s'approche trop d'une structure, elle peut être "éjectée" du domaine de calcul, générant de fortes instabilités numériques. C'est la raison pour laquelle une méthode de couplage conservant les avantages des deux approches semble appropriée. Un script shell a donc été développé au sein du laboratoire M2C pour coupler OpenFoam (Eulérien) et Dorothy (Lagrangien)(Fig. 6). Le couplage est actuellement en cours de développement mais les premiers résultats sont encourageants (Robin *et al.*, 2021c). Une fois cette phase terminée, le code couplé pourrait permettre l'étude paramétrée complète de l'impact du biofouling à moindre coût en faisant varier le type, la taille, la rugosité, la densité d'implantation des espèces colonisatrices. Il pourrait également permettre d'introduire les effets de cavitation aux calculs.

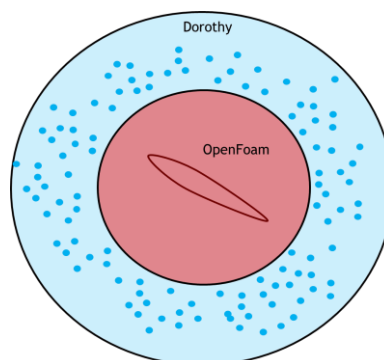


Figure 6: Répartition des domaines de calcul entre OpenFoam (en rouge) et Dorothy (en bleu) (d'après Robin, 2021c).

L'étude du biofouling offre l'opportunité de faire considérablement évoluer les techniques de modélisation des turbines. L'introduction de la rotation induite pourrait permettre une modélisation complète du système de récupération, introduisant des pertes mécaniques, magnétiques et la production d'électricité elle-même.

7. REFERENCES

- Mycek, P. 2013. *Numerical and Experimental Study of the Behaviour of Marine Current Turbines*. Thèse, Université Le Havre Normandie, Le Havre, France.
- Orme, J.; Masters, I.; Griffiths, R. 2001. *Investigation of the effects of the biofouling on the efficiency of marine current turbines*. In Proceedings of the MAREC 2001, International Conference of Marine Renewable Energies, London, UK, 27–28 March 2001; pp. 91–99.
- Qiuhao, H., li, y., Di, Y. et Chen, J. 2017. *A large-eddy simulation study of horizontal axis tidal turbine in different in flow conditions*. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 9:064501.
- Raoux, A., Robin, I., Pezy, J.-P., Bennis, A.-C. et Dauvin, J.-C. (2021). *Multi-Disciplinary and Multi-Scale Assessment of Marine Renewable Energy Structure in a Tidal System*, *Journal of Energy and Power Technology*. Journal of Energy and Power Technology, 3 : 1-16.
- Robin, I., Bennis, A.-C. et Dauvin, J.-C. 2021a. *3D numerical study of the impact of macro-roughnesses on a tidal turbine, on its performances and hydrodynamic wake*. Journal of Marine Science and Engineering, 9(11), 1288.
- Robin, I., Bennis, A.-C. et Dauvin, J.-C. 2021b. *3D simulation with flow-induced rotation for non-deformable tidal turbines*. Journal of Marine Science and Engineering, 9(3) : 1-26.
- Robin, I., Bennis, A.-C. et Dauvin, J.-C. (2021c). *Eulerian pressure-velocity/lagrangian vorticity-velocity coupling applied to wake and forces calculation for biofouled tidal turbines*. 4th WCCM-ECCOMAS Congress 2020, 4127 : 1-12
- Robin, I. 2021. *Impact du biofouling sur les performances et le sillage des hydroliennes : une étude exploratoire 3D*. Thèse, Université de Caen Normandie, Caen, France.
- Rivier, A.; Bennis, A.-C.; Jean, G.; Dauvin, J.-C. 2018. *Numerical simulations of biofouling effects on the tidal turbine hydrodynamic*. Int. Mar. Energy J., 1, 101–109.
- Walker, J.; Green, R.; Gillies, E.; Phillips, C. 2020. *The effect of a barnacle-shaped excrescence on the hydrodynamic performance of a tidal turbine blade section*. Ocean Eng, 217, 107849.