HAL
open science

Impact environnemental d'un parc hydrolien : sensibilité des prédictions à la rugosité de fond.

Nicolas Guillou, J Thiébot

To cite this version:

Nicolas Guillou, J Thiébot. Impact environnemental d'un parc hydrolien : sensibilité des prédictions à la rugosité de fond.. 15èmes journées de l'hydrodynamique, Nov 2016, Brest, France. hal-01496792

HAL Id: hal-01496792

https://hal.science/hal-01496792v1

Submitted on 27 Mar 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UN PARC HYDROLIEN : SENSIBILITÉ DES PRÉDICTIONS À LA RUGOSITÉ DE FOND

ENVIRONMENTAL IMPACT OF A TIDAL STREAM FARM : PREDICTIONS SENSITIVITY TO BOTTOM ROUGHNESS.

N. Guillou[(1)], **J. Thiébot**[(2)]

1- Cerema/DTecEMF/DER/LGCE, 155 rue Pierre Bouguer, Technopôle Brest-Iroise, BP 5, 29280 Plouzané, France, *nicolas.guillou@cerema.fr*

2- UNICAEN, LUSAC, EA4253, site universitaire de Cherbourg, rue Louis Aragon, BP 78, F-50130 Cherbourg-Octeville, France, *jerome.thiebot@unicaen.fr*

Résumé

Cette étude analyse la sensibilité d'un modèle hydrodynamique de marée à la paramétrisation de la rugosité des fonds rocheux au niveau du Passage du Fromveur en pointe Bretagne. L'attention est portée sur les estimations des courants, de la puissance associée et de la contrainte de cisaillement de fond sans et avec la présence d'un parc hydrolien. Les prédictions de la puissance du courant disponible présentent des variations allant jusqu'à 30 % en fonction de la rugosité de fond retenue. L'extraction de cette puissance par un parc hydrolien induit une réduction substantielle des courants de marée et de la contrainte de cisaillement de fond associée à plus de 10 km du Passage du Fromveur. La rugosité de fond influe sur l'amplitude de cette réduction avec des variations de la contrainte de cisaillement comprises entre 9 et 17 % au niveau du banc sableux du Four.

Summary

This study analyses the sensitivity of a tidal hydrodynamic model to the parameterisation of rock bottom roughess in the Fromveur Strait off western Brittany. The attention is dedicated to estimations of currents, associated kinetic energy and bottom shear stress without and with a tidal stream farm. The available predicted tidal stream power shows variations up to 30 % in relation to the bottom roughness retained. Tidal stream power extraction with a tidal farm induces noticeable reductions of tidal currents and bottom shear stresses up to 10 km from the Strait. Bottom roughness impacts the amplitude of this reduction with variations of shear stresses from 9 to 17 % over the sandbank of the Four.

1 Introduction

L'exploitation de l'énergie cinétique des courants de marée est aujourd'hui considérée comme une solution prometteuse pour accroître la part des énergies marines renouvelables dans la production énergétique mondiale. Cependant, en raison de leur localisation préférentielle dans les eaux côtières peu profondes du plateau continental où les courants de marée sont exacerbés, les hydroliennes, isolées ou regroupées en parcs, sont susceptibles d'induire des modifications hydrodynamiques et sédimentaires notables à des emprises étendues à plusieurs kilomètres de leur site d'immersion (Neill *et al.*, 2009). L'évaluation de l'impact environnemental d'un parc hydrolien constitue donc une étape fondamentale au bon déploiement de ces dispositifs dans le milieu marin.

En raison du nombre réduit d'observations in-situ, ces évaluations reposent généralement sur des modélisations numériques régionales où les effets des hydroliennes sont paramétrés à partir d'un coefficient de frottement global, à l'échelle du parc, moyennant les forces de traînée et de poussée des dispositifs immergés (Sánchez *et al.*, 2014; Thiébot *et al.*, 2015). En dépit de leur niveau de simplification, ces paramétrisations restent particulièrement adaptées aux études d'avant-projet pour affiner, avec des temps de calcul limités, le dimensionnement des fermes hydroliennes (Vennell, 2011; Plew et Stevens, 2013).

Cependant, bien que ces simulations numériques reposent sur une modification locale du coefficient de frottement à l'échelle du parc hydrolien, aucune étude n'a jusqu'à présent analysé la sensibilité de ces prédictions à la rugosité de fond ambiante. En effet, les modélisations numériques régionales de l'effet des parcs hydroliens considèrent un frottement de fond uniforme, basé généralement sur des formulations de type (1) Manning-Strickler ou Chézy dans les modèles de circulation bidimensionnelle horizontale (2DH) (Ahmadian *et al.*, 2012; Thiébot *et al.*, 2015) ou (2) quadratique dans les modèles tridimensionnels (3D) (Neill *et al.*, 2014; Lewis *et al.*, 2015).

La présente étude complète ces différentes simulations par une analyse de la sensibilité des prédictions numériques à la rugosité des fonds rocheux, très caractéristiques des zones identifiées pour l'implantation des fermes hydroliennes. Ce travail est appliqué au Passage du Fromveur (Fig. 1), en pointe Bretagne, l'un des deux sites pilotes retenus, avec le Raz Blanchard en Manche, pour le développement des parcs hydroliens en France métropolitaine. Balayé par des courants de vives-eaux susceptibles de dépasser 4 $\mathrm{m\,s^{-1}}$ (SHOM, 1994), ce site a fait l'objet au cours de la période 2015-2016 de l'immersion d'une hydrolienne, à axe horizontal, par la société Sabella. Les fonds sédimentaires présentent une hétérogénéité spatiale marquée par la succession de secteurs de cailloutis, graviers et sables dans les zones méridionales et septentrionales (Fig. 2, Armand, 2003; Raffin, 2003; Hamdi *et al.*, 2010). Les fonds rocheux occupent, quant à eux, les zones de faibles profondeurs de l'archipel de Molène et s'étendent à la partie occidentale de l'île de Ouessant à travers le Passage du Fromveur. Un modèle de circulation régionale de marée, à haute résolution spatiale, est mis en œuvre au niveau de la zone d'étude, intégrant l'hétérogénéité spatiale des fonds sédimentaires (section 2). Les prédictions numériques sont tout d'abord comparées à des mesures in-situ de courant à 10 m au-dessus du fond, corre-

spondant aux technologies des hydroliennes actuellement envisagées dans le Passage du Fromveur. La sensibilité des prédictions numériques à la rugosité retenue sur les fonds rocheux est ensuite analysée en situations non-perturbée et perturbée par la présence d'un parc hydrolien (section 3). L'attention est portée sur les modifications apportées aux estimations des courants, de la puissance associée et de la contrainte de cisaillement de fond.

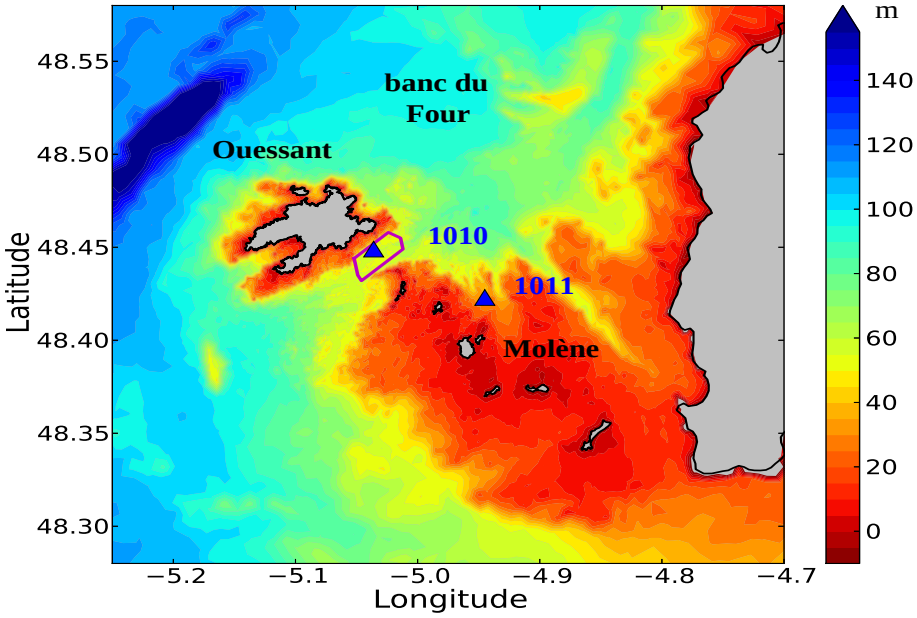

Figure 1 – Bathymétrie de la zone d'étude avec la localisation des points de mesure courantologique (▲). La ligne en magenta dans le Passage du Fromveur délimite la zone retenue pour l'implantation des hydroliennes.

2 Modèle numérique

Les simulations numériques sont basées sur l'utilisation du modèle TELEMAC 2D (version 6p3) qui résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions d'espace horizontales (2DH) (Hervouet, 2007). Dans le cadre de cette étude, ces équations ont été modifiées afin d'intégrer les effets associés à la présence d'hydroliennes au niveau de la zone retenue pour leur immersion dans le Passage du Fromveur (Fig. 1). Ces effets sont ici paramétrés à partir de la formulation proposée par Plew et Stevens (2013) où les forces individuelles de traînée et de poussée associées à chaque hydrolienne sont moyennées à l'échelle de la ferme. Ces hydroliennes, d'un diamètre de 18,6 m, fonctionnent à partir d'une vitesse d'écoulement supérieure à 1 $\mathrm{m\,s^{-1}}$ et atteignent une puissance maximale de 1 MW pour des vitesses supérieures à $2,8\ \mathrm{m\,s^{-1}}$. Considérant une densité spatiale de 50 machines par km^2 (Thiébot *et al.*, 2015), le parc testé dans cette étude se compose de 207 hydroliennes.

Reprenant les simulations effectuées par Guillou et Chapalain (2015a,b), le modèle numérique est mis en œuvre sur une zone couvrant la pointe Bretagne à partir d'une grille de calcul non-structurée composée de 37019 éléments triangulaires d'une

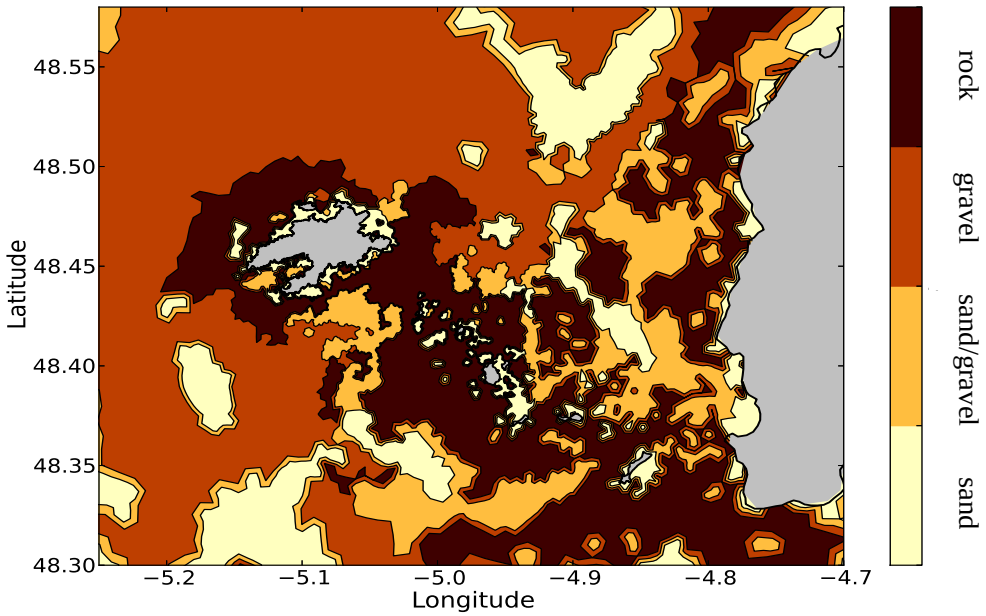

Figure 2 – Types de fonds sédimentaires dans la zone d'étude dérivée de Hamdi *et al.* (2010) (d'après Guillou et Thiébot, 2016).

résolution spatiale de l'ordre de 10 km aux limites du domaine à moins de 50 m au niveau de la zone d'étude. Le coefficient de frottement sur le fond est déterminé par une formulation quadratique dérivée d'une loi logarithmique sur le profil vertical de vitesse. La valeur de ce coefficient dépend ainsi du paramètre de rugosité z_0 estimé en fonction des différents types de fonds sédimentaires suivant la classification de Soulsby (1983). La répartition spatiale des fonds sédimentaires sur la zone d'étude est basée sur la cartographie établie par Hamdi *et al.* (2010) (Ifremer, Agence des Aires Marines Protégées) (Fig. 2) et s'accorde avec les évaluations de Armand (2003) et Raffin (2003). La sensibilité des prédictions à la rugosité des fonds rocheux est évaluée à partir de sept valeurs de ce paramètre : $z_0 = 3{,}5/5{,}0/10{,}0/15{,}0/20{,}0/30{,}0$ et $50,0$ mm. Reprenant les paramétrisations adoptées par différents modèles de circulation de marée en pointe Bretagne (Muller *et al.*, 2007; Guillou *et al.*, 2013a,b), la valeur de z_0 est fixée à $3,5$ mm dans les zones du large où la nature du fond n'est pas déterminée par Hamdi *et al.* (2010). Le modèle est finalement forcé par les données de marée issues de la base TPXO7.2 (Egbert *et al.*, 1994). Des informations complémentaires sur la mise en œuvre du modèle sont disponibles dans Guillou et Thiébot (2016).

Les prédictions, établies avec une valeur de $z_0 = 20$ mm sur les fonds rocheux, sont comparées avec les mesures in-situ de l'amplitude et de la direction du courant effectuées par le SHOM à 10 m au-dessus du fond aux points 1010 et 1011 (Figs. 1 et 3). Les périodes d'observations correspondent à différentes conditions de mortes-eaux et de vives-eaux (1) entre le 19 mars et le 2 avril 1993 au point 1010 et (2) entre le 14 mai et le 11 juin 1993 au point 1011. Les simulations reproduisent de manière remarquable l'amplitude du courant au point 1010 avec un indice d'accord de Willmott (1981) RE entre prédictions et observations de 0,98. En dépit d'un écart

plus prononcé pour l'amplitude du courant au point 1011 avec un indice RE=0,78, les simulations approchent de manière satisfaisante l'asymétrie du courant marquée par (1) une composante nord-est de très forte amplitude limitée dans le temps et (2) une composante sud-ouest plus réduite et plus étalée. Les changements rapides de direction sont également reproduits par le modèle aux deux points de mesure. Cette évaluation locale des performances du modèle est complétée par une comparaison synoptique des résultats numériques avec les prédictions établies par le SHOM (2016) en condition de vives-eaux moyennes (Guillou et Thiébot, 2016).

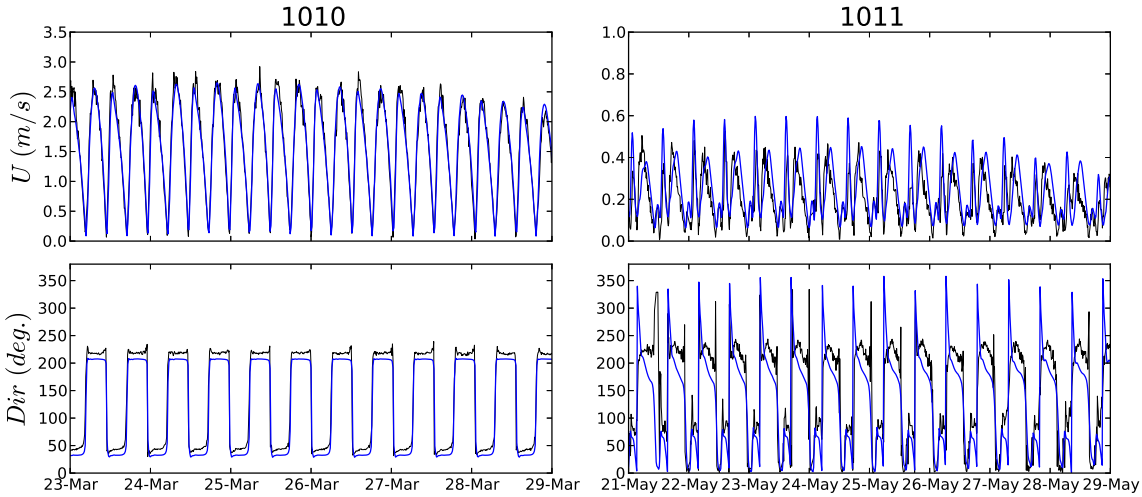

Figure 3 – Séries temporelles mesurées (ligne noire) et prédites (pour une valeur de $z_0 = 20$ mm sur les fonds rocheux) (ligne bleue) de l'amplitude et de la direction du courant à 10 m au-dessus du fond aux points 1010 et 1011.

3 Effets de la rugosité de fond

Les prédictions obtenues présentent cependant une certaine incertitude associée au choix du paramètre de rugosité z_0 sur les fonds rocheux. Si on se base uniquement sur les résultats au point 1010, on peut ainsi considérer une très faible sensibilité des prédictions à la rugosité de fond alors que des différences majeures sont obtenues au point 1011 (Fig. 4). Des observations complémentaires sont donc nécessaires pour affiner la valeur du paramètre z_0 sur les fonds rocheux. Dans cette perspective, une étude de sensibilité est conduite en condition de vives-eaux moyennes afin d'identifier les zones les plus impactées par le choix de ce paramètre. L'augmentation de la valeur de z_0 sur les fonds rocheux, de 3,5 à $20,0$ mm, entraîne ainsi une réduction significative de l'amplitude maximale du courant de marée, supérieure à 30 % dans les passes de l'archipel de Molène (Fig. 5). Des différences importantes sont également obtenues aux extrémités nord-est et sud-ouest du Passage du Fromveur avec une réduction de l'amplitude maximale du courant de plus de $0,6\ \mathrm{m\,s^{-1}}$. De telles évolutions contrastent avec les faibles modifications prédites dans la partie centrale du Passage du Fromveur, limitées à $0,2\ \mathrm{m\,s^{-1}}$, en accord avec les résultats numériques au point 1010. L'énergie cinétique du courant de marée étant associée au cube de l'amplitude du courant, des variations significatives sont également obtenues pour la prédiction

de cette variable sur la zone d'étude (Fig. 6). Au niveau du secteur identifié pour le développement des parcs hydroliens dans le Passage du Fromveur (Fig. 1), la moyenne de la puissance maximale du courant de marée chute ainsi de près de 30 % en augmentant z_0 de 3,5 à $50,0$ mm sur les fonds rocheux.

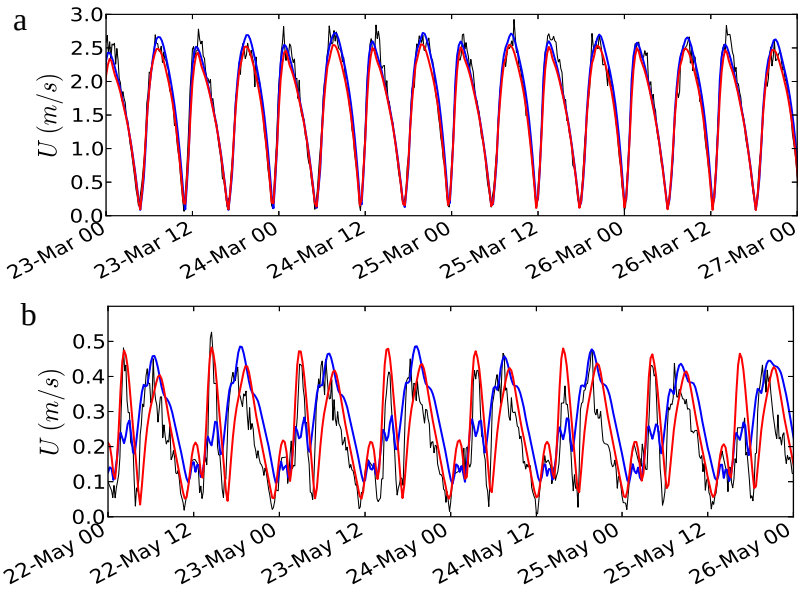

Figure 4 – Séries temporelles mesurées (ligne noire) et prédites (pour des valeurs de $z_0 = 3,5$ mm, ligne bleue et de $z_0 = 50,0$ mm, ligne rouge, sur les fonds rocheux) de l'amplitude du courant à 10 m au-dessus du fond aux points 1010 et 1011 aux conditions de vives-eaux de mars et mai 1993.

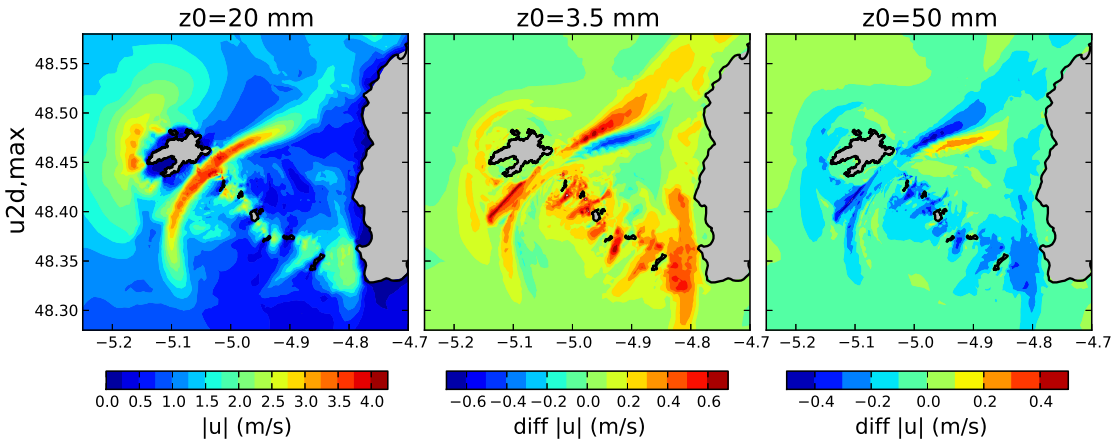

Figure 5 – (Gauche) Amplitude maximale de la vitesse du courant de marée moyennée selon la verticale (u2d,max) en condition de vives-eaux moyennes pour une valeur de $z_0 = 20,0$ mm sur les fonds rocheux. (Milieu et droit) Différences relatives par rapport à ces prédictions pour des simulations avec des valeurs de $z_0 = 3,5$ et $50,0$ mm sur les fonds rocheux.

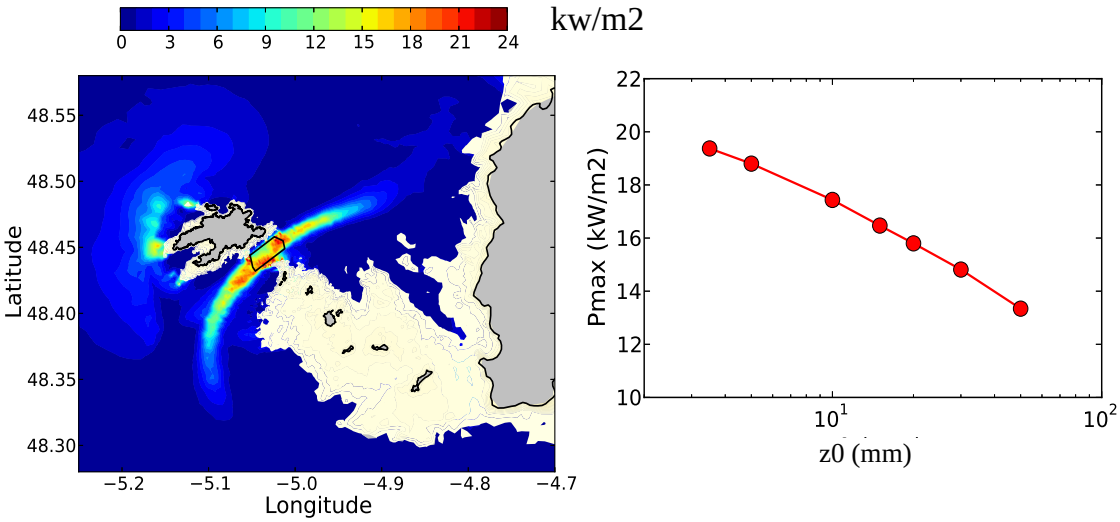

Figure 6 – (Gauche) Puissance maximale du courant de marée à 10 m au-dessus du fond en condition de vives-eaux moyennes pour une valeur de $z_0 = 20$ mm sur les fonds rocheux. (Droite) Evolution de la moyenne de cette puissance maximale au niveau de la zone identifiée pour l'implantation d'hydroliennes en fonction de différentes valeurs de z_0 sur les fonds rocheux.

La formulation retenue pour représenter le parc hydrolien dans le modèle fournit des résultats cohérents avec de précédentes études numériques (e.g., Ahmadian *et al.*, 2012; Myers et Bahaj, 2012; Ahmadian et Falconer, 2012) révélant (1) une zone de décélération au niveau de la ferme, en amont et en aval associée à (2) une accélération des courants de marée sur les côtés (Fig. 7). Ces prédictions confirment par ailleurs les investigations conduites par Ahmadian *et al.* (2012) et Neill *et al.* (2012) mettant en évidence des modifications des composantes hydrodynamiques à plusieurs kilomètres de la ferme d'hydroliennes. Dans le cas présent, l'extraction de la puissance du courant de marée, pour une valeur de $z_0 = 20$ mm sur les fonds rocheux, induit une réduction de près de 10 % de l'amplitude du courant à 10 km du site d'immersion des hydroliennes. Des modifications plus importantes sont obtenues pour la contrainte de cisaillement de fond et la puissance du courant de marée. L'extraction de l'énergie cinétique du courant par le parc hydrolien conduit ainsi à une réduction de la contrainte de cisaillement de fond maximale, $\tau_{b,max}$, de près de 10 $\mathrm{N\,m^{-2}}$, soit 30 % de sa valeur, dans le Passage du Fromveur pour une valeur de $z_0 = 20$ mm sur les fonds rocheux (Guillou et Thiébot, 2016). En dépit de modifications plus faibles en dehors de cette zone, les prédictions montrent une réduction de l'ordre de 12 % de $\tau_{b,max}$ au niveau du banc du Four, possiblement associée à une réduction de l'érosion et une augmentation du dépôt sédimentaire. La puissance du courant de marée décroît également dans des proportions significatives, de près de 30 % dans la partie centrale du Passage du Fromveur.

La valeur du paramètre de rugosité sur les fonds rocheux a un effet limité sur la répartition spatiale des différences induites par la présence des hydroliennes (Fig. 8). Les modifications des composantes hydrodynamiques restent ainsi principalement localisées dans le prolongement du Passage du Fromveur avec de sensibles déflexions des zones de décélération du courant de marée à ses extrémités septen-

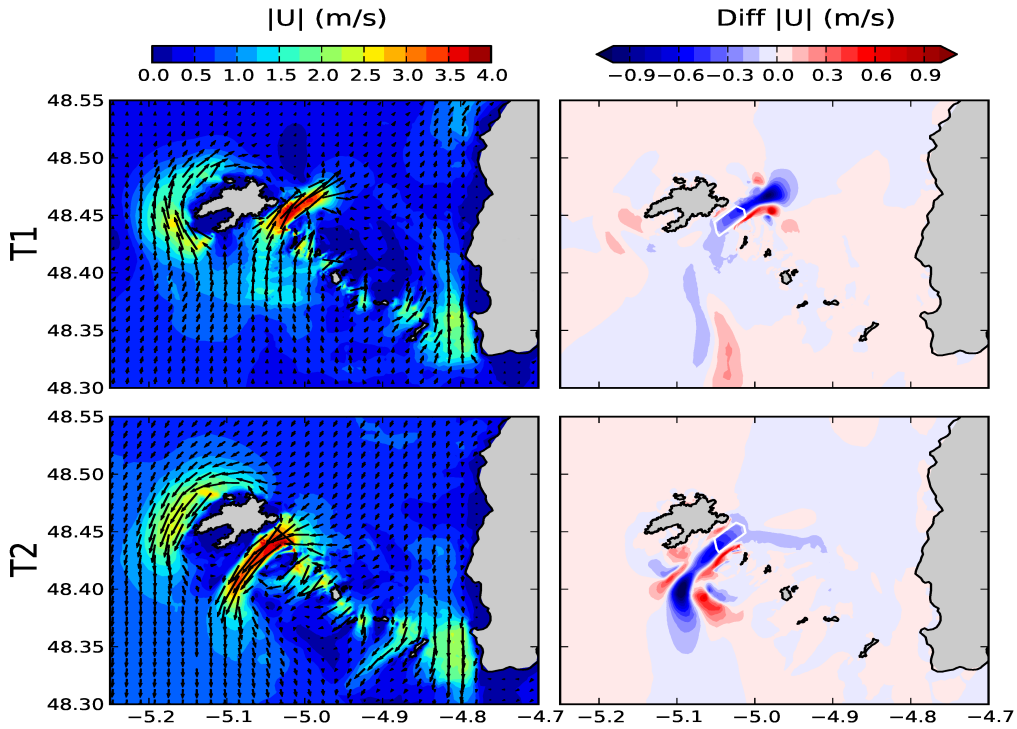

Figure 7 – (Gauche) Courants moyennés sur la verticale (pour une valeur de $z_0 = 20$ mm sur les fonds rocheux) sans la présence de la ferme hydrolienne et (Droite) différences obtenues en intégrant la ferme aux pics de flot (T1) et de jusant (T2) d'une marée de vives-eaux moyennes dans le Passage du Fromveur (d'après Guillou et Thiébot, 2016).

trionale et méridionale. La rugosité retenue sur les fonds rocheux a cependant un effet significatif sur l'amplitude des différences prédites dans la partie centrale du Fromveur comme en témoignent les évolutions prédites de la puissance du courant de marée au niveau de la ferme d'hydroliennes (Fig. 9). La réduction de la contrainte de cisaillement de fond maximale en vives-eaux est par ailleurs estimée à 9 $\mathrm{N\,m^{-2}}$ pour une valeur de $z_0 = 3,5$ mm sur les fonds rocheux contre 14 $\mathrm{N\,m^{-2}}$ pour une valeur de $z_0 = 50,0$ mm. Des différences secondaires sont également obtenues au niveau du banc du Four (point #2, Fig. 1) avec une réduction de la contrainte de cisaillement de fond maximale variant de 9 à 17 % en fonction de la rugosité retenue sur les fonds rocheux, l'amplitude de cette réduction diminuant avec la rugosité.

4 Conclusions

Le modèle de circulation de marée TELEMAC 2D a été mis en œuvre au niveau du Passage du Fromveur, en pointe Bretagne, afin d'évaluer l'impact de la rugosité des fonds rocheux sur les prédictions des courants, de la contrainte de cisaillement de fond et de la puissance associées sans et avec la présence d'un parc hydrolien. Les simulations numériques sont comparées à des observations in-situ du courant à 10 m au-dessus du fond, correspondant aux technologies des hydroliennes à axe horizontal actuellement envisagées dans le Passage du Fromveur. Les principaux résultats de

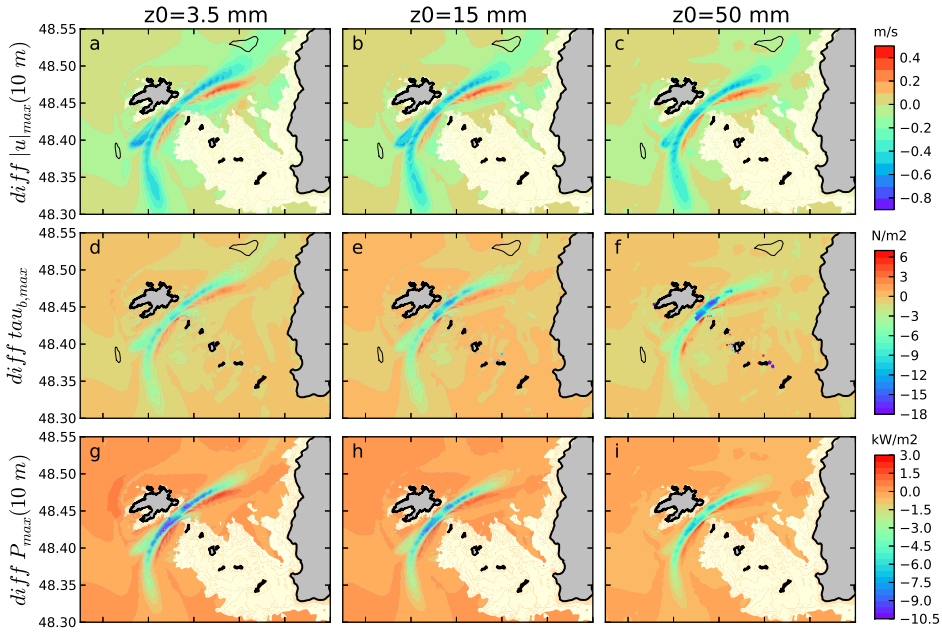

Figure 8 – Différences de (haut) l'amplitude maximale du courant de marée à 10 m au-dessus du fond, (milieu) contrainte de cisaillement de fond maximale et (bas) puissance maximale du courant à 10 m au-dessus du fond au cours d'un cycle de vives-eaux moyennes entre les simulations intégrant et négligeant la présence des hydroliennes pour trois valeurs du paramètre de rugosité sur les fonds rocheux ($z_0 = 3, 5$, 15,0 et $50, 0$ mm).

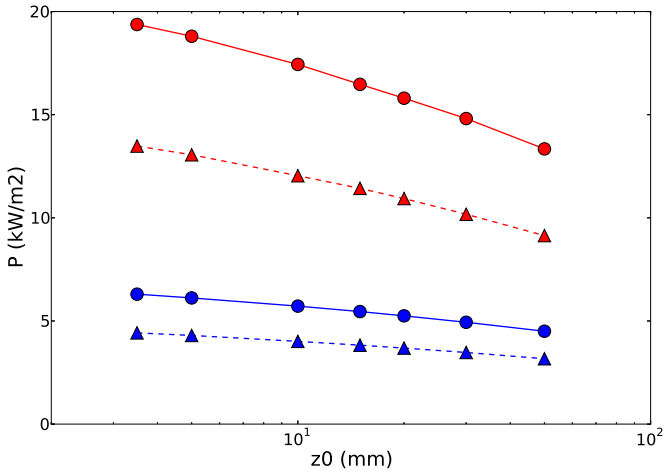

Figure 9 – Valeurs, moyennées sur la zone d'implantation des hydroliennes dans le Passage du Fromveur, des puissances (rouge) maximales et (bleu) moyennes du courant à 10 m au-dessus du fond au cours d'une cycle de marée de vives-eaux moyennes (ligne continue, ▲) sans et (ligne en pointillés, ●) avec les hydroliennes pour différentes valeurs du paramètre de rugosité z_0 sur les fonds rocheux.

cette application numérique sont les suivants :

1. Les prédictions obtenues dans l'état initial non perturbé par les hydroliennes présentent des évolutions significatives en fonction de la rugosité retenue sur les fonds rocheux. L'amplitude maximale du courant de marée est ainsi réduite de plus de 30 % dans les passes de l'archipel de Molène en augmentant la valeur de z_0 de 3,5 à $20,0$ mm. Des variations comparables sont obtenues pour les estimations numériques de la puissance du courant disponible dans la partie centrale du Passage du Fromveur.
2. L'extraction de l'énergie cinétique du courant de marée induit une réduction notable de son amplitude à plus de 10 km du parc hydrolien affectant les prédictions de la contrainte de cisaillement de fond au niveau du banc du Four.
3. La rugosité des fonds rocheux ne modifie que très sensiblement la répartition spatiale des différences induites par les hydroliennes (amplitude maximale du courant, de la contrainte de cisaillement de fond et de la puissance associées). L'intensité de ces différences dépend cependant de la rugosité retenue sur les fonds rocheux avec une réduction de la contrainte de cisaillement de fond maximale en vives-eaux moyennes variant entre 9 et 17 % au niveau du banc du Four.

De telles études de sensibilité des prédictions numériques à la rugosité des fonds rocheux sont donc recommandées en préalable d'études approfondies de l'impact environnemental d'un parc hydrolien. Dans le cas du Passage du Fromveur, des observations complémentaires sont requises pour affiner le calage des prédictions numériques en fonction de la rugosité des fonds rocheux. Ces futures campagnes d'observations doivent plus spécifiquement viser les zones les plus impactées par le choix de ce paramètre.

Remerciements

Les auteurs remercient M. André Simon (Cerema) pour le traitement des données sédimentologiques sur la zone d'étude. Les mesures de courant ont été mises à disposition par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine. Les modélisations ont été effectuées grâce aux ressources informatiques du centre de calcul pour la mer CAPARMOR. Cet article est une contribution aux projets de recherche DIADEMS et FLUSED du Laboratoire de Génie Côtier et Environnement (Cerema, http://www.cerema.fr, http://memphys-lgce.fr.ht).

Références

Ahmadian, R. et R. Falconer. 2012, «Assessment of array shape of tidal stream turbines on hydro-environmental impacts and power output», *Renewable Energy*, vol. 44, p. 318–327.

Ahmadian, R., R. Falconer et B. Bockelmann-Evans. 2012, «Far-field modelling of the hydro-environmental impact of tidal stream turbines», *Renewable Energy*, vol. 38, n° 1, p. 107–116.

Armand, J. C. 2003, «Carte sédimentologique 7149G. Natures de fond du Goulet de Brest à Portsall», 7149 g, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

Egbert, G., A. Bennett et M. Foreman. 1994, «TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model», *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, p. 24 821–24 852.

Guillou, N. et G. Chapalain. 2015a, «Numerical modelling of nearshore wave energy resource in the Sea of Iroise», *Renewable Energy*, vol. 83, p. 942–953.

Guillou, N. et G. Chapalain. 2015b, «Wave energy potential in the Sea of Iroise», dans *11th European Wave and Tidal Energy Conference Series*, Nantes, France.

Guillou, N., G. Chapalain et E. Duvieilbourg. 2013a, «Modelling impact of bottom roughness on sea surface temperature in the Sea of Iroise», *Continental Shelf Research*, vol. 54, p. 80–92.

Guillou, N., G. Chapalain et E. Duvieilbourg. 2013b, «Sea surface temperature modelling in the Sea of Iroise : assessment of boundary conditions», *Ocean Dynamics*, vol. 63, p. 849–863.

Guillou, N. et J. Thiébot. 2016, «The impact of seabed rock roughness on tidal stream power extraction», *Energy*, vol. 112, p. 762–773.

Hamdi, A., M. Vasquez et J. Populus. 2010, «Cartographie des habitats physiques Eunis - Côtes de France», Technical Report DYNECO/AG/10-26/JP, Ifremer.

Hervouet, J. 2007, *Hydrodynamics of free surface flows, modelling with the finite element method*, Cambridge University Press, Cambridge.

Lewis, M., S. Neill, P. Robins et M. Hashemi. 2015, «Resource assessment for future generations of tidal-stream energy arrays», *Energy*, vol. 83, p. 403–415.

Muller, H., F. Dumas, B. Blanke et V. Mariette. 2007, «High-resolution atmospheric forcing for regional oceanic model : the Iroise Sea», *Ocean Dynamics*, vol. 57, n° 4-5, p. 375–400.

Myers, L. et A. Bahaj. 2012, «An experimental investigation simulating flow effects in first generation marine current energy converter arrays», *Renewable Energy*, vol. 37, p. 28–36.

Neill, S., M. Hashemi et M. Lewis. 2014, «The role of tidal asymmetry in characterizing the tidal energy resource of Orkney», *Renewable Energy*, vol. 68, p. 337–350.

Neill, S., J. Jordan et S. Couch. 2012, «Impact of tidal energy convertor (TEC) arrays on the dynamics of headland sand banks», *Renewable Energy*, vol. 37, p. 387–397.

Neill, S., E. Litt, S. Couch et A. Davies. 2009, «The impact of tidal stream turbines on large-scale sediment dynamics», *Renewable Energy*, vol. 34, p. 2803–2812.

Plew, D. et C. Stevens. 2013, «Numerical modelling of the effects of turbines on currents in a tidal channel - Tory Channel, New Zealand», *Renewable Energy*, vol. 57, p. 269–282.

Raffin, C. 2003, *Bases biologiques et écologiques de la conservation du milieu marin en mer d'Iroise.*, thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale.

Sánchez, M., R. Carballo, V. Ramos et G. Iglesias. 2014, «Tidal stream energy impact on the transient and residual flow in an estuary : A 3D analysis», *Applied Energy*, vol. 116, p. 167–177.

SHOM. 1994, «Courants de marée - Côte Ouest de Bretagne», Technical Report, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

SHOM. 2016, http://datashom.fr.

Soulsby, R. 1983, «The bottom boundary layer of shelf seas», dans *Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas*, édité par B. E. Johns, Elsevier, Amsterdam, p. 189–266.

Thiébot, J., P. Bailly du Bois et S. Guillou. 2015, «Numerical modeling of the effect of tidal stream turbines on the hydrodynamics and the sediment transport - Application to the Alderney Race (Raz Blanchard), France», *Renewable Energy*, vol. 75, p. 356–365.

Vennell, R. 2011, «Tuning tidal turbines in-concert to maximise farm efficiency.», *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 671, p. 587–604.

Willmott, C. 1981, «On the validation of models», *Physical Geography*, vol. 2, n° 2, p. 219–232.

The author has requested enhancement of the downloaded file. All in-text references underlined in blue are linked to publications on ResearchGate.