

Projet EMACOP : mesures *in-situ* de houle *versus* le modèle numérique SWASH sur le site d'Esquibien (Finistère)

Bertrand MICHARD¹, Sébastien BOULAND², Marissa YATES-MICHELIN³,
Audrey VARING⁴, Jean-François FILIPOT⁴, Philippe SERGENT⁵

1. Cerema EMF, Technopôle Brest Iroise, BP 5, 29280 Plouzané, France.
bertrand.michard@cerema.fr
2. École Nationale des Travaux Publics de l'État, 3 rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin, France. *sebastien.bouland@entpe.fr*
3. Cerema EMF, 6 Quai Watier 78400 Chatou, France.
marissa.yates-michelin@cerema.fr
4. France Énergies Marines, Technopôle Brest Iroise, 525 avenue Alexis de Rochon, 29280 Plouzané, France. *audrey.varing@france-energies-marines.org* ;
jean.francois.filipot@france-energies-marines.org
5. Cerema EMF, 134 rue de Beauvais, CS 60039, 60280 Margny lès Compiègne Cedex, France. *phillipe.sergent@cerema.fr*

Résumé :

En tranche 3 de projet EMACOP, il s'agit de présenter les mesures *in-situ* de houle réalisées lors des campagnes hivernales 2014 et 2015 sur le site d'Esquibien (Finistère). Il est proposé de caractériser ces mesures *in-situ versus* le modèle numérique SWASH, qui a conduit, en tranche 2, à estimer le potentiel houlomoteur du site. La variabilité des données de houle apparaît importante aux différentes échelles spatio-temporelles, aussi bien mensuelle, annuelle ou inter-annuelle. Les résultats obtenus ont montré les limites de validité des mesures réalisées avec des capteurs de pression immergés positionnés en eaux peu profondes près de la digue. L'évaluation des incertitudes des mesures et des données disponibles reste donc délicate. Elle nécessite de réaliser des campagnes de mesures *in-situ* sur de longues périodes, en privilégiant plusieurs capteurs de pression, d'autres types d'instruments ou des méthodes de traitement de données de capteurs récentes, pour estimer précisément le potentiel houlomoteur aux abords du site.

Mots-clés : EMR, Mesures, Données, États de mer, Simulation numérique, SWASH, Variabilité, Incertitudes, Esquibien, Finistère, EMACOP.

1. Introduction

La Loi de transition énergétique de 2015, qui prévoit de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre en 2050 par rapport aux niveaux de l'année 1990, implique un développement important des énergies marines renouvelables en France dans les années à venir. Le Projet National de Recherche EMACOP (Énergies MARines, CÔtières et Portuaires) a pour objectifs d'étudier et de promouvoir le développement de systèmes de

Thème 5 – Énergies et ressources marines

récupération d'énergie marine adaptés aux structures côtières et portuaires le long des côtes françaises (www.emacop.fr). Le thème S2 intitulé « Systèmes houlomoteurs sur ouvrages anciens » s'attache à caractériser le potentiel énergétique des vagues près des structures existantes susceptibles d'être équipées. En tranche 3 de projet, le travail a porté sur la caractérisation des mesures *in-situ* de houle *versus* le modèle numérique de transformation de vagues SWASH (ZIJLEMA *et al.*, 2011), qui a conduit, en tranche 2, à estimer le potentiel houlomoteur du site d'Esquibien (MICHARD *et al.*, 2016). Les campagnes de mesures *in-situ* hivernales 2014 et 2015 et la méthodologie de traitement sont présentées dans un premier temps. Il s'agit d'analyser les données et d'interpréter les résultats, en montrant la variabilité spatio-temporelle sur le site et les limites de validité des mesures, en particulier en eaux peu profondes. La comparaison des mesures *in-situ* et des simulations numériques du modèle SWASH est ensuite présentée, suivie de propositions de mesures et de méthodes d'analyse de données complémentaires.

2. Instrumentation du site d'Esquibien

2.1 Présentation des campagnes de mesures

Des campagnes de mesures *in-situ* ont été réalisées sur le site d'Esquibien pour les périodes hivernales 2014 et 2015, par la mise en place d'une bouée directionnelle *Waverider* (société DATAWELL, NL, www.datawell.nl) et de trois capteurs de pression *Wave Gauge Blue OSSI* posés au fond (société *Ocean Sensor Systems, Inc*, USA, www.oceansensorsystems.com). Il est à noter que la bouée directionnelle a été déployée au large uniquement lors de la campagne de mesures 2014 (voir figure 1).



Figure 1. Bouée directionnelle DATAWELL positionnée au large par une profondeur de 20 m CM et capteurs de pression OSSI fixés sur un socle en béton, immergé à 3 m CM (capteur n° 2) et 8 m CM (capteur n° 3) et en pied de digue à -1 m CM (capteur n° 1).

*XV^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil
La Rochelle, 29 au 31 mai 2018*

Pour la campagne 2014, les capteurs de pression immergés OSSI ont fonctionné du 7 décembre 2013 au 3 mars 2014 pour les capteurs n° 1 (profondeur de -1 m CM (Cote Marine)), et n° 2 (profondeur de 2 m CM) et du 1er mai à 30 juin 2014 pour le capteur n° 3 (profondeur de 8 m CM). La bouée directionnelle DATAWELL, positionnée à l'est de la bouée de signalisation Gamelle Ouest, a déradé lors de l'événement de tempête du 23 décembre 2013 et n'a donc pas pu fournir de mesures après cette date. Un focus est donc réalisé sur la période du 12 au 21 décembre 2013. L'implantation des dispositifs déployés par le Cerema et France Énergies Marines (FEM) est présentée (voir figure 2). Pour la campagne 2015, la mise en place de trois capteurs OSSI a été réalisée sur la période du 20 janvier au 20 avril 2015 aux positions et profondeurs similaires.

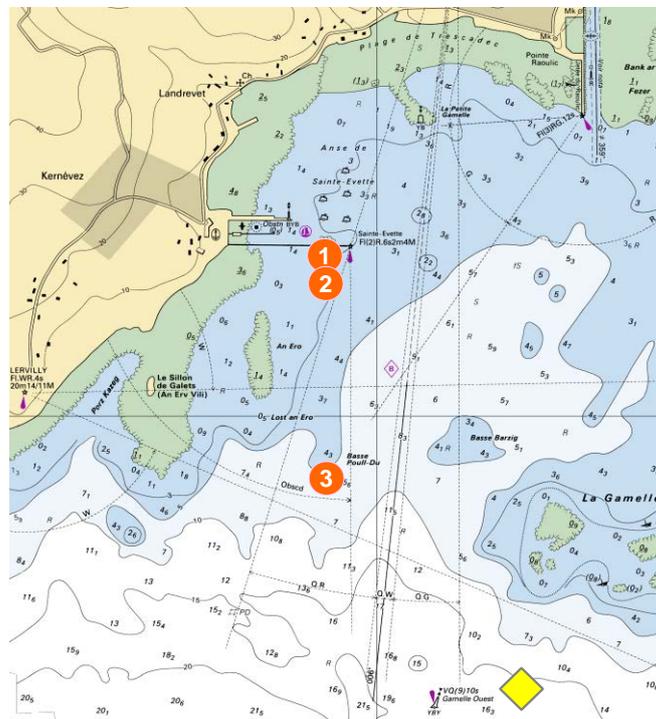


Figure 2. Positions des dispositifs (bouée directionnelle DATAWELL - losange jaune et trois capteurs de pression OSSI n° 1, 2 et 3 - cercles oranges) sur le site d'Esquibien - Campagnes de mesures in-situ (carte marine n° 7147 du Shom ; www.data.shom.fr).

Les opérations de récupération des capteurs ont nécessité l'intervention d'une équipe de plongeurs du Conseil Départemental du Finistère. L'exercice de plongée dans ce secteur exposé aux houles reste délicat et quelque peu aléatoire, dépendant des conditions de mer et de la visibilité des fonds les jours d'opération. Les capteurs OSSI de la campagne 2014 ont bien été récupérés tandis qu'en 2015, seuls les capteurs n° 1 et n° 3 ont été récupérés ; le dispositif de mesure n° 2, posé au fond par faible profondeur, n'a pas été retrouvé, malgré les efforts déployés par l'équipe. L'explication vient probablement du déplacement sur des dizaines de mètres du dispositif, d'un poids d'environ 60 kg avec le socle en béton, insuffisant pour qu'il reste en place durant les événements de tempêtes.

Thème 5 – Énergies et ressources marines

2.3 Méthodologie de traitement des mesures

Les capteurs de pression immergés OSSI ont fourni des mesures de pression au fond, qui ont été traitées sur des plages d'analyse pertinentes, à partir d'un script de calcul élaboré initialement par le Shom, suite aux campagnes de mesures *in-situ* PROTEVS Littoral (LECKLER *et al.*, 2016). Il permet de calculer, à partir des données de pression agrégées par pas de 30 minutes, les paramètres des états de mer suivants : hauteur de houle significative H_{m0} (en m), période de pic T_p (en s), niveau d'eau (en m) et puissance de houle P (en kW/m) calculée à partir de la formule de la densité de puissance de vagues (EPRI, 2011). Ces paramètres sont obtenus à partir de la relation qui relie la pression mesurée et la hauteur des vagues, qui est donnée pour la théorie linéaire de la houle par les équations (1 et 2) (BISHOP *et al.*, 1987 ; TSAI *et al.*, 2005) :

$$p_d(x, z, t) = \rho g K_{pL}(z)\eta(x, t) \quad (1)$$

$$K_{pL} = \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \quad (2)$$

avec K_{pL} , la fonction de transfert de pression linéaire ; k , le nombre d'onde ; h , la profondeur d'eau et z , la profondeur d'installation du capteur au fond.

Des paramètres statistiques des données de houle ont été calculés, permettant de définir les événements caractéristiques pour la comparaison des puissances de houle obtenus par mesures *in-situ* et par simulation numérique avec le modèle SWASH.

3. Résultats des campagnes de mesures

3.1 Campagne de mesures hivernale 2014

a) Résultats du capteur de pression OSSI n° 1

Concernant la période du 7 au 21 décembre 2013, 90 % des hauteurs de houle ont été supérieures à 0,4 m pour une moyenne de 1,4 m. Ces hauteurs sont dispersées, avec un écart-type de 0,8 m. 80 % des périodes de pic sont comprises entre 10,2 et 17,1 s, avec un moyenne de 13,5 s. La puissance moyenne est de 6,9 kW/m, avec une médiane à 5,2 kW/m. La puissance varie de façon importante, avec un écart-type de 6,4 kW/m et des valeurs comprises, 80 % du temps, entre 0,5 et 15,5 kW/m (voir tableau 1). Cette variabilité reste cependant peu représentative de toute la période hivernale 2014.

Tableau 1. Paramètres statistiques du capteur de pression OSSI n° 1, calculés sur la plage d'analyse allant du 7 décembre au 21 décembre 2013, site d'Esquibien

Capteur de pression OSSI n° 1	H_{m0} (m)	T_p (s)	Niveau d'eau (m)	P (kW/m)
Moyenne / Médiane	1,4 / 1,4	13,5 / 13,7	2,6 / 2,7	6,9 / 5,2
Ecart-Type	0,8	3,2	1,1	6,4
Minimum / Maximum	0,3 / 3,2	3,4 / 20,5	0,5 / 4,7	0,2 / 31,8
D1 / D10 (déciles)	0,4 / 2,4	10,2 / 17,1	1,1 / 4,1	0,5 / 15,5

b) Comparaison des capteurs de pression OSSI n° 1, n° 2 et de la bouée DATAWELL

Deux forts événements de tempête sont survenus pour la période du 7 au 21 décembre, caractérisés par des hauteurs de houle dépassant les 4 mètres au niveau de la bouée DATAWELL les 14 et 15 décembre et du 19 au 21 décembre 2013 (voir figure 3). Les hauteurs et les puissances de houle correspondantes des capteurs OSSI atteignent, pendant ces événements, des valeurs importantes, avec des hauteurs H_{m0} de 3 m et des puissances de houle P pouvant dépassant les 25 kW/m, aussi bien pour le capteur OSSI n° 1 positionné en pied de digue (courbes en rose pour la hauteur H_{m0} et en rouge pour la puissance P) que pour le capteur OSSI n° 2 implanté à 100 m au sud (courbes en bleu pour H_{m0} et P). Les écarts de hauteurs de houle qui se produisent à la marée montante entre les deux capteurs de l'ordre de 0,5 m, résultent très probablement de l'action de la réflexion de la houle sur la digue, qui doit être amplifiée durant le flot de la marée.

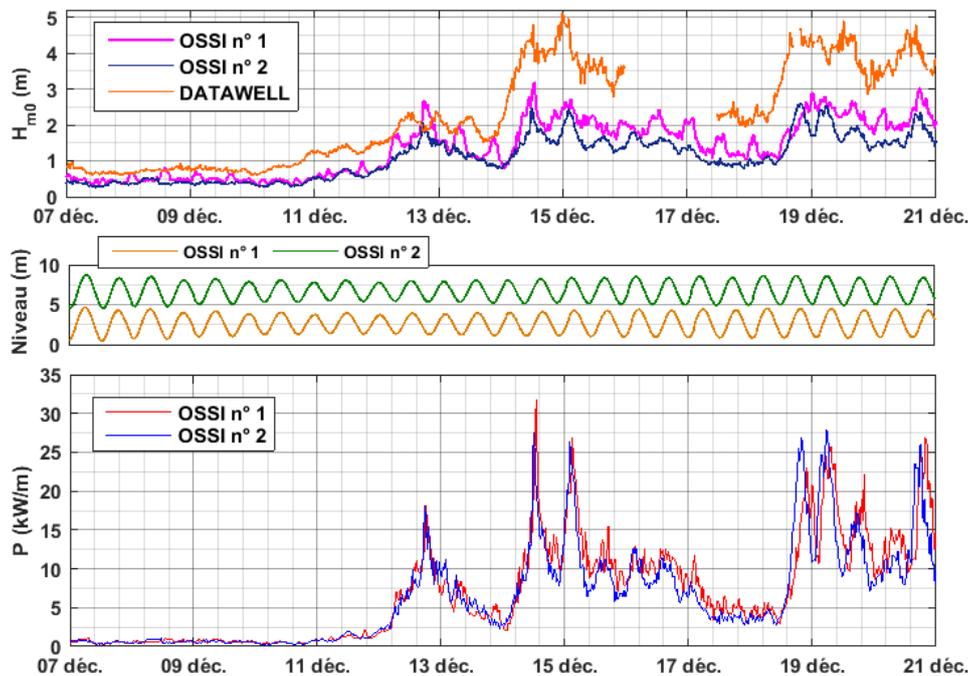


Figure 3. Comparaison des capteurs de pression OSSI n° 1, n° 2 et de la bouée DATAWELL du 7 décembre au 21 décembre 2013 sur le site d'Esquibien.

En résumé, les mesures acquises concordent sur l'ensemble de la plage d'analyse, avec une perte d'énergie entre le large et la côte, visible sur les courbes de hauteurs de houle (écart jusqu'à 2 m entre la bouée DATAWELL et les capteurs OSSI), qui provient des processus de réfraction par le fond, de dissipation et de déferlement bathymétrique des vagues entre le cap de Lervily situé à l'ouest, le Sillon de Galets au sud-ouest immédiat de la digue et les hauts fonds de La Gamelle à l'est. Concernant les deux capteurs, la puissance de houle en pied de digue (capteur n° 1) est en moyenne 10 % supérieure à celle observée 100 m au sud (capteur n° 2) dû à la réflexion de la houle sur la digue.

Thème 5 – Énergies et ressources marines

3.2 Campagne de mesures hivernale 2015

a) Résultats du capteur de pression OSSI n° 1

Sur la période du 15 février au 16 avril 2015, la variabilité de la ressource énergétique est apparente : l'événement de tempête de plus grande intensité est intervenu les 24 et 25 février, générant une puissance de houle maximale près de 53 kW/m ; alors que la puissance moyenne sur la période n'est que de 3,1 kW/m, avec 80 % de la puissance de houle comprise entre 0,4 et 6,2 kW/m . La puissance disponible est très dispersée, avec un écart-type de 3,9 supérieur à la puissance moyenne de 3,1 kW/m (voir tableau 2).

Tableau 2. Paramètres statistiques du capteur de pression OSSI n° 1, calculés sur la plage d'analyse allant du 15 février au 16 avril 2015, site d'Esquibien

Capteur de pression OSSI n° 1	H_{m0} (m)	T_p (s)	Niveau d'eau (m)	P (kW/m)
Moyenne / Médiane	0,9 / 0,8	13,9 / 13,7	3,3 / 3,3	3,1 / 2
Ecart-Type	0,5	2,6	1,2	3,9
Minimum / Maximum	0,0 / 3,8	3,4 / 30,3	1,0 / 6,1	0,0 / 52,9
D1 / D10 (déciles)	0,4 / 1,4	11,4 / 17,1	1,6 / 4,9	0,4 / 6,2

b) Comparaison des capteurs de pression OSSI n° 1 et n° 3

En comparant les mesures des deux capteurs de pression, l'ensemble des événements de la période allant du 15 février au 16 mars 2015, coïncide (voir figure 4). Un décalage sensible apparaît entre les séries de mesures sur la période allant du 17 mars au 16 avril 2015 (voir figure 5), avec un retard de phase du capteur n° 3, résultant sans doute d'un défaut d'étalonnage de la fréquence d'acquisition. Il est à noter que, sur le capteur n° 1, positionné en pied de digue, des pics de hauteurs et de puissances de houle apparaissent pour les niveaux de basse mer, principalement en période de vive eau, caractéristique d'un niveau d'eau très faible, comme pour les dates voisines des 27 février et 23 mars. En résumé, il est à remarquer que la hauteur significative et la puissance de houle associée sont plus importantes au large. La puissance obtenue au capteur n° 3, qui est situé à 800 mètres de la digue à une profondeur de 8 m CM, est en moyenne trois fois supérieure à celle obtenue au capteur n° 1 positionné en pied de digue à une profondeur de -1 m CM ; ce qui s'explique par les profondeurs d'eau distinctes et les processus de dissipation d'énergie et de déferlement bathymétrique des vagues, associés aux effets non-linéaires des vagues et de turbulence prépondérants à proximité de la digue.

3.3 Variabilité entre les campagnes de mesures

Les résultats des campagnes de mesures hivernales 2014 et 2015 n'apparaissent pas très représentatifs du climat de houle du site. En effet, la comparaison avec les données des bases numériques pour les périodes de 1979 à 2003 pour ANEMOC et de 1994 à 2012 pour HOMERE (MICHARD *et al.*, 2014), permet d'indiquer que l'hiver 2014 a été plus énergétique que la moyenne des hivers des dernières décennies, et que l'hiver 2015 l'a

été moins. Il est à noter que les campagnes de mesures ont été réalisées à des périodes distinctes, de début décembre 2013 à la mi-janvier 2014 pour l'une et de la mi-février à la mi-avril 2015 pour l'autre. La variabilité mensuelle apparaît liée à la saisonnalité des évènements, avec bien souvent une succession d'évènements forts en pleine période hivernale, à savoir de décembre à février, plutôt qu'à la sortie de l'hiver en mars.

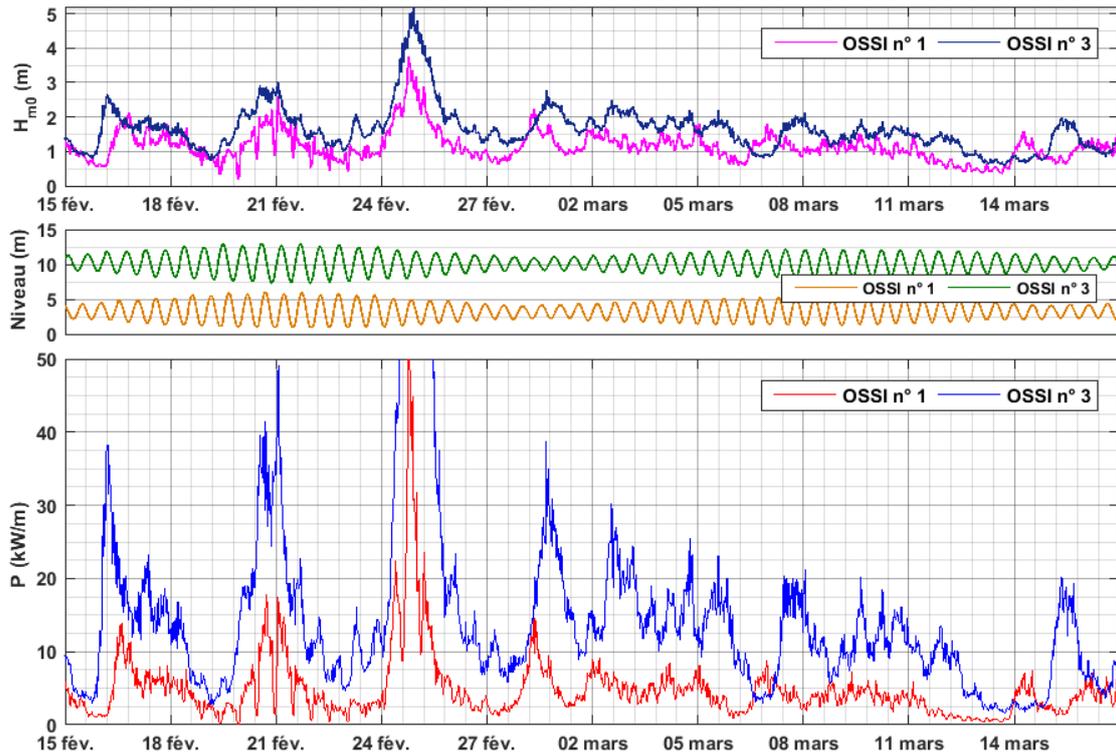


Figure 4. Comparaison des capteurs OSSI n° 1 et n° 3 du 15 février au 16 mars 2015.

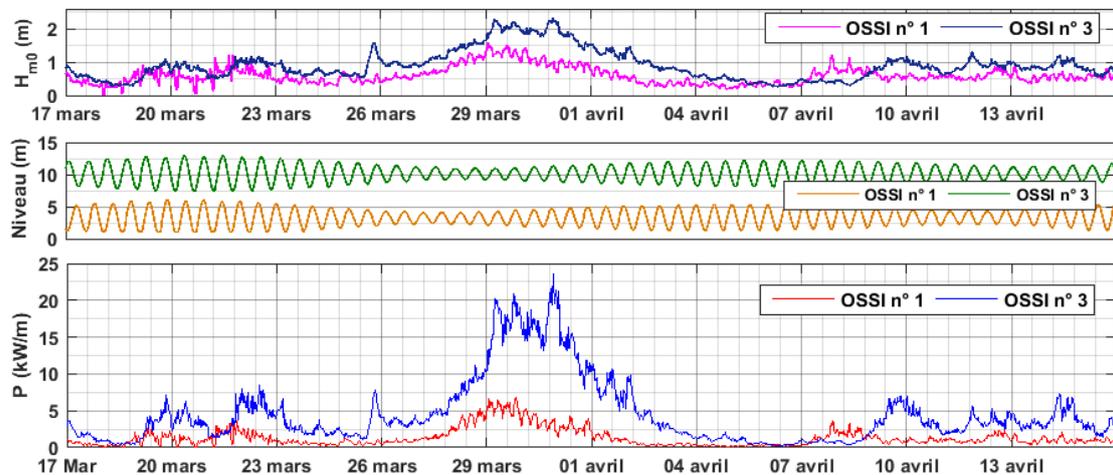


Figure 5. Comparaison des capteurs OSSI n° 1 et n° 3 du 17 mars au 16 avril 2015.

Thème 5 – Énergies et ressources marines

4. Limites de validité des mesures *in-situ* réalisées

Les capteurs de pression immergés sont employés pour les mesures de vagues depuis les années 1960. Pour convertir les données de pression mesurées en informations de houle en surface, une fonction de transfert de pression dérivée de la théorie linéaire de la houle a longtemps été utilisée ; il s'agit des équations (1) et (2). Cependant, il subsiste des interrogations sur la précision de la fonction de transfert employée pour obtenir les paramètres d'états de mer en surface en eaux peu profondes. Ainsi, une vaste expérience de laboratoire a montré dans les années 1980 que la hauteur de la houle de surface pouvait être obtenue de manière satisfaisante en eaux profondes, avec une précision de $\pm 5\%$, en utilisant la fonction de transfert de houle linéaire, mais qu'en eaux peu profondes, une modification de la fonction de transfert semblait nécessaire pour prendre en compte les effets non-linéaires de la houle (BISHOP *et al.*, 1987). C'est pourquoi, le problème de l'adéquation de la fonction de transfert de pression linéaire est resté ouvert jusque ces dernières années et des recherches ont continué sur ce sujet. Les travaux réalisés ensuite ont montré une cohérence de la fonction de transfert linéaire pour les eaux profondes et intermédiaires (TSAI *et al.*, 2005 ; HUANG *et al.*, 2008), mais toujours pas pour les eaux peu profondes, qui correspondent aux profondeurs des capteurs n° 1 et n° 2 immergés près de la digue. En effet, par faibles profondeurs, la forme des vagues devient de plus en plus non-linéaire dans la zone de levage (*shoaling zone*), puis zone de déferlement (*surf zone*), où l'asymétrie verticale des vagues devient très importante. Elle peut conduire à une sous-estimation des hauteurs et puissances de houle associées, comme le montrent les résultats présentés dans la partie suivante.

5. Comparaisons des résultats de puissances de houle

5.1 Mesures *in-situ* versus simulations numériques SWASH

Les puissances de houle obtenues par mesures *in-situ*, à partir des capteurs de pression OSSI, et calculées par simulations numériques, sont présentées pour le couple de houle (3 m, 14 s) relatif à l'événement du 15 décembre 2013, à 20 heures. Il est précisé que SWASH, un acronyme de *Simulating WAVes till SHore*, est un modèle numérique de transformation de vagues en proche côtier développé par l'Université de Technologie de Delft (NL), offrant la possibilité d'étudier la propagation des vagues du large à la côte de façon déterministe (ZIJLEMA *et al.*, 2011). Le modèle résout les équations non-linéaires en faible profondeur en y ajoutant un terme de pression non-hydrostatique. Une description du modèle, du schéma numérique explicite, des conditions aux limites de forçage et des applications sont présentés sur le site dédié (swash.sourceforge.net). Les résultats de simulations numériques ont été traités avec le logiciel de calcul MATLAB et les boîtes à outils WAFO (*Wave Analysis for Fatigue and Oceanography* ; www.maths.lth.se/matstat/wafo) et DIWASP (*DIrectional WAVE SPectra toolbox* ; www.metocean.co.nz). Les résultats exploités en sortie de modèle numérique sont

l'élévation de la surface libre, la hauteur de houle et les spectres directionnels correspondants aux emplacements des capteurs de pression n° 1, en pied de digue et n° 2, positionné à 100 m au sud de la digue (voir figures 2, 6 et 7). La puissance de houle est calculée à partir de la formule de densité de puissance de vagues de l'EPRI présentée en tranche 2 (MICHARD *et al.*, 2016). Les résultats de puissance de houle montrent des écarts relatifs très significatifs de 86 % entre les mesures *in-situ* et les calculs de simulations numériques à l'emplacement du capteur de pression n° 1 et de 265 % à l'emplacement du capteur de pression n° 2 (voir tableau 3).

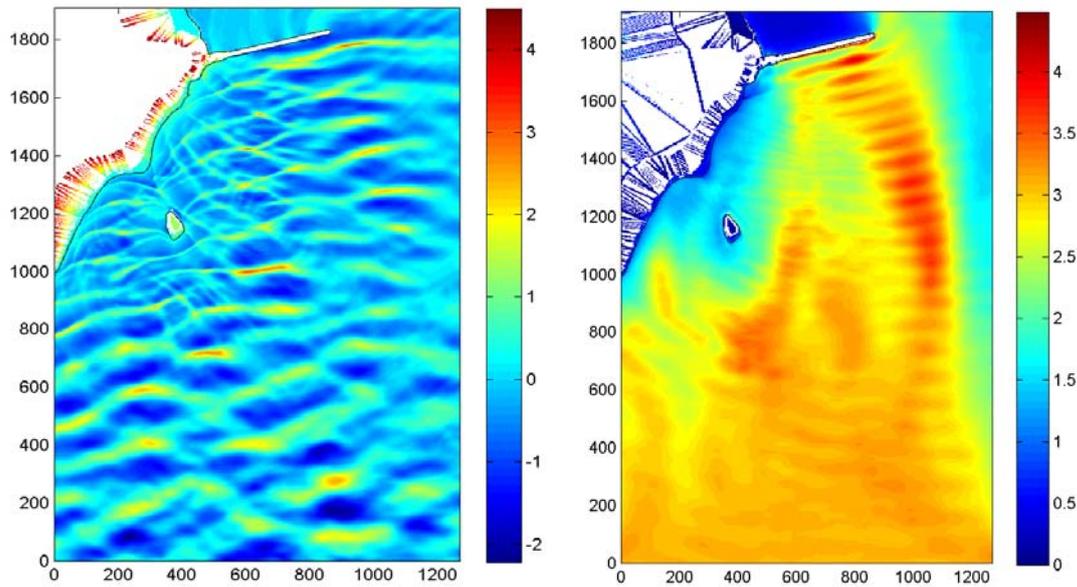


Figure 6. Résultats de l'élévation de la surface libre et de la hauteur de houle pour la simulation ($H_{m0} : 3 \text{ m}$, $T_p : 14 \text{ s}$, $\text{dir.} : 220^\circ$, niveau de pleine mer : 4,75 m).

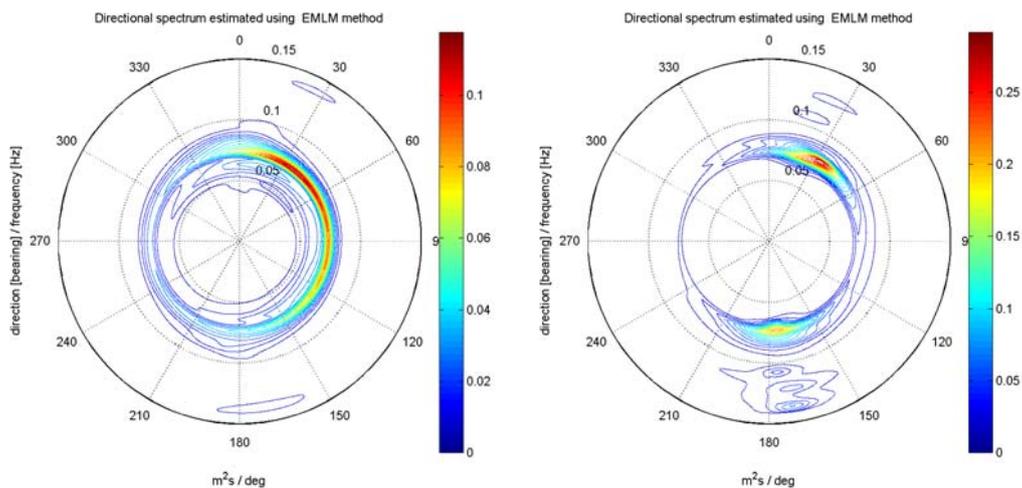


Figure 7. Résultats de spectres directionnels aux points de sortie n° 1 (à gauche) et n° 2 (à droite) pour la simulation ($H_{m0} : 3 \text{ m}$, $T_p : 14 \text{ s}$, $\text{dir.} : 220^\circ$, niveau de pleine mer).

Thème 5 – Énergies et ressources marines

Tableau 3. Comparaison des puissances de houle P obtenues par mesure *in-situ* et calculée par simulation numérique ; couple de houle (3 m, 14 s) relatif à l'événement du 15 décembre 2013 à 20 heures, niveau de pleine mer.

Campagne 2014 : emplacement du capteur de pression (point de sortie de simulation numérique)	n° 1 (pied de digue ; à -1 m CM)	n° 2 (100 m au sud ; à 3 m CM)
P mesurée obtenue par mesure <i>in-situ</i> (kW/m)	15	12
P simulée calculée par simulation numérique (kW/m)	27,9	43,8
Écart relatif : P mesurée (versus) P simulée	86 %	265 %

Cinq autres comparaisons réalisées pour des événements caractéristiques de la même période, à savoir des couples de houle de (2 m, 12 s) et (3 m, 14 s) associés aux niveaux de basse mer, de mi-marée et de pleine mer (mais non présentées ici) viennent confirmer dans l'ensemble ces écarts relatifs importants. L'interprétation de ces résultats reste néanmoins délicate, avec des écarts assez significatifs, variant de 30 à 60 % pour les niveaux de basse mer, et très significatifs, variant de 74 à 285 % pour les niveaux de mi-marée et de pleine mer. L'hypothèse d'une sous-estimation de la puissance de houle mesurée *in-situ* est avancée, en particulier pour les niveaux de mi-marée et de pleine mer, qui serait liée aux limites de validité de la mesure *in-situ* en eaux peu profondes, c'est-à-dire à la fonction de transfert linéaire employée, car les interactions non-linéaires des vagues y deviennent importantes et même prépondérantes. Il est à noter que des écarts significatifs ont été observés pour l'événement du 18 décembre 2013 entre les mesures *in-situ* et les simulations numériques réalisées avec le modèle à résolution de phase BOSZ (ROEBER *et al.*, 2012) sur le même site (VARING *et al.*, 2017).

5.2 Proposition envisagée de mesures complémentaires

Il a été ainsi remarqué que la fonction de transfert de pression linéaire reste insuffisante pour restituer le spectre dans le cas d'une houle réelle en eaux peu profondes, rendant très difficile l'utilisation d'un seul capteur de pression en un unique point de mesure. Cela pourrait être compensé en utilisant plusieurs capteurs (trois à six idéalement) en un même point de mesure afin de déduire la pression au fond et les composantes de la vitesse $U(x)$ et $V(y)$, et d'obtenir ainsi les spectres d'élévation correspondants (C_{xx} , C_{yy} et C_{zz}), et les co-spectres (C_{xy} , C_{xz} et C_{yz}), qui permettraient de calculer, via un estimateur statistique, comme la méthode de l'entropie maximale, par exemple, utilisée en tranche 2 de projet, le spectre directionnel en ce point, mais sans la prise en compte des courants de houle. Il est également envisageable d'utiliser d'autres types d'instruments, comme le profileur acoustique à effet Doppler (*Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP*) qui permet d'obtenir les données nécessaires à ce calcul de spectre avec un seul instrument. La comparaison des mesures *in-situ* et des calculs issus des modèles numériques à résolution de phase comme SWASH ou BOSZ, serait ainsi

plus pertinente pour calibrer les modèles, valider les résultats de simulations et analyser les spectres directionnels obtenus en eaux peu profondes.

5.3 Proposition envisagée de méthodes de reconstruction non-linéaire

Il est proposé de recourir aux méthodes récentes de traitement de données de capteurs de pression, qui prennent en compte les effets non-linéaires en eaux peu profondes. Ainsi, la résolution d'une formulation qui fournit une relation implicite entre la hauteur de houle et la pression mesurée au fond, avec l'existence de solutions, est proposée utilisant le théorème des fonctions implicites (OLIVERAS *et al.*, 2014). Une méthode d'implémentation de formule de reconstruction non-linéaire de l'élévation de la surface libre à partir des mesures de pression au fond est aussi recommandée pour des états de mer réels. Cette proposition de reconstruction non-linéaire, efficace et économique en temps de calcul, basée sur des transformations de Fourier directe et inverse, vient d'être réalisée pour intégrer la non-linéarité des vagues (BONNETON *et al.*, 2017). Ces méthodes semblent montrer de bons résultats pour les états de mer réels, mais leur mise en œuvre et l'interprétation des résultats, comme celle des formes des spectres directionnels, obtenues aux points de sorties des simulations SWASH, requièrent une attention et des compétences toutes particulières.

6. Conclusion

Le travail réalisé en tranche 3 de projet EMACOP a permis de présenter les mesures *in-situ* de houle des campagnes hivernales 2014 et 2015 et de caractériser ces mesures *versus* les simulations numériques, qui ont conduit à l'estimation du potentiel houlomoteur sur le site d'Esquibien. La variabilité spatio-temporelle étudiée apparaît également importante aux échelles mensuelle, annuelle et inter-annuelle. Les limites de validité des mesures réalisées avec des capteurs de pression OSSI proviennent de la non-prise en compte, par la fonction de transfert de pression employée, des processus non-linéaires des vagues en eaux peu profondes. Les simulations numériques réalisées avec le modèle SWASH, apportent des résultats qui diffèrent des mesures *in-situ*, et les comparaisons des puissances de houle conduisent à des écarts relatifs très significatifs, qui varient suivant les capteurs de pression (86 % pour le n° 1 et de 265 % pour le n° 2) pour l'événement de tempête présenté du 15 décembre 2013. Les cinq autres simulations réalisées pour des événements caractéristiques de la même période, du 7 au 21 décembre 2013, viennent confirmer dans l'ensemble ces écarts relatifs importants. L'évaluation des incertitudes des mesures et des données disponibles reste donc délicate pour estimer précisément le potentiel houlomoteur aux abords du site. C'est pourquoi, des propositions de mesures *in-situ* complémentaires sur de plus longues périodes avec d'autres types d'instruments ou le recours à des méthodes de traitement des données, comme la reconstruction non-linéaire, sont présentées comme perspectives de recherche intéressantes.

Thème 5 – Énergies et ressources marines

7. Références bibliographiques

- BISHOP C.T., DONELAN M.-A. (1987). *Measuring waves with pressure transducers*. Coastal Engineering, Vol. 11, pp 309-328. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(87\)90031-7](https://doi.org/10.1016/0378-3839(87)90031-7)
- BONNETON P., LANNES D. (2017). *Recovering water wave elevation from pressure measurements*. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 833, pp 399-429. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.666>
- EPRI (2011). *Mapping and assessment of the United States Ocean Wave Energy Resource*. EPRI Technical report, Palo Alto, CA: 2011.1024637. 176 p.
- HUANG M.-C., TSAI C.-H. (2008). *Pressure transfer function in time and time-frequency domains*. Journal of Ocean Engineering, Vol. 35, pp 1203-1210. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.04.005>
- LECKLER F., HUCHET M., DODET G., VARING A., FILIPOT J.-F. (2016). *Modélisation des vagues à haute résolution*. Séminaire National Litto3D, Sea Tech Week, Brest, 12 octobre
- MICHARD B., COSQUER E., DUFOUR G. (2014). *Projet EMACOP : évaluation du potentiel houlomoteur de 22 sites français*. XIIIèmes JNGCGC, Dunkerque, pp 751-758. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2014.082>
- MICHARD B., COSQUER E., MALLÉGOL A., COIGNARD J., FILIPOT J.F., KPOGO-NUWOKLO K.A., OLAGNON M., SERGENT P. (2016). *Projet EMACOP : Caractérisation des vagues et du potentiel houlomoteur des sites d'Esquibien et de Saint-Guérolé par simulation numérique*. XIVèmes JNGCGC, Toulon, pp 497-508. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2016.056>
- OLIVERAS K.L., VASAN V., DECONINCK B., HENDERSON D. (2012). *Recovering the water-wave profile from pressure measurements*. SIAM Journal on Applied Mathematics, 72(3), pp 897-918. <https://doi.org/10.1137/110853285>
- ROEBER V., CHEUNG K. F. (2012). *Boussinesq-type model for energetic breaking waves in fringing reef environments*. Coastal Engineering, Vol. 70, pp 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.06.001>
- TSAI C.-H., HUANG M.-C., YOUNG F.-J., LIN Y.-C., LI H.-W. (2005). *On the recovery of surface wave by pressure transfer function*. Ocean Engineering, Vol. 32, pp 1247–1259. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.10.020>
- VARING A., FILIPOT J.-F., ROEBER V., LECKLER F., DUARTE R., MICHARD B., DELPEY M. (2017). *Phase-resolving wave modeling for Marine Renewable Energy sites characterization*. Proceedings of the 12th European Wave and Tidal Energy Conference, Cork, Ireland, 27 August - 1 September 2017.
- ZIJLEMA M., STELLING G., SMIT P. (2011). *SWASH: an operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal water*. Coastal Engineering, Vol. 58, pp 992-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015>