



15^{ÈMES} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22 - 24 novembre 2016 - Brest

Contenu spectral des états de mer en profondeur intermédiaire lors d'épisodes de houles extrêmes

Spectral content of extreme sea states in intermediate water depths

Y. Perignon^{(1)*}, G. Ducrozet⁽¹⁾, M. Guoin^(1,2)

⁽¹⁾ Ecole Centrale Nantes, LHEEA Lab. (ECN, CNRS),
Nantes, France

⁽²⁾ Institut de Recherche Technologique Jules
Verne, Bouguenais, France

*yves.perignon@ec-nantes.fr

Résumé

Dans un contexte d'implantation programmée de structures variées dédiées aux énergies marines renouvelables (EMR) dans des zones d'intérêt inédites de par leurs conditions d'environnement, la mesure et la modélisation tant numérique qu'expérimentale des états de mer représentent un enjeu scientifique majeur tant pour le design de structures marines que pour la viabilité économique de celles qui visent une exploitation de la ressource houlomotrice.

Depuis sa mise en service en 2009, le site d'essai en mer SEMREV fournit une plateforme expérimentale particulièrement intéressante pour bon nombre d'applications EMR. Les mesures réalisées sur site viennent ainsi compléter les réseaux existants et abordent les questions d'adéquation des mesures et des représentations physiques de l'environnement dans le prisme de l'exploitation des EMR. Perignon et Le Crom (2015) ont notamment mis en lumière une différence notable sur le contenu spectral entre des mesures réalisées tant sur le site qu'à l'amont et les modèles spectraux à phase moyennée tout au long d'un épisode de houle extrême de l'hiver 2013-2014, spécifique par son contenu énergétique basse fréquence.

Cette étude vise à clarifier la récurrence de ce phénomène, et plus largement à fournir un diagnostic spectral de l'erreur d'estimation, tout comme à identifier des pistes d'amélioration de prise en compte de processus jusque là mal évalués dans l'évolution de ce type d'état de mer.

Summary

This paper presents the detailed assessment of the spectral content and accuracy between state of the art numerical estimations and measurements on the SEMREV French Atlantic test site. In a context of possible deployments of structures in such water depths and environmental conditions, the proper evaluation of sea states for the purpose of design as well as energetic resource is of great interest. This study follows Perignon & LeCrom (2015) diagnostic on the noticeable over-evaluation of the low frequency part of the sea state spectrum for a particular stormy event of the 2013-2014 winter period. The recurrence of the phenomena is diagnosed here and a first attempt is made to characterized the processes at stake and not properly accounted in spectral wave models.

1. Introduction

L'étude de conditions d'environnement en vue d'une exploitation de la ressource énergétique qu'elles représentent pose des questions cruciales en terme de prérequis de précision. Toute surestimation qui pouvait trouver son intérêt par le conservatisme qu'elle introduisait dans une chaîne de conception de structure devient ici préjudiciable par le biais qu'elle introduit dans l'évaluation d'un revenu et d'une rentabilité associée. En d'autres termes, les enjeux d'intégrité de structure deviennent antagonistes aux enjeux de rentabilité économique. Dans le domaine des énergies marines renouvelables, cela s'applique notamment aux structures visant à récupérer l'énergie des vagues.

Pour cette famille de structures, dont les degrés de liberté, les amplitudes de mouvement ou les accélérations dépassent bien souvent les standards usuels de l'ingénierie océanique, l'enjeu d'une connaissance adéquate des états de mer paraît central. Ces impératifs spécifiques ont récemment conduit le comité IEC à publier un guide technique [IEC/TS 62600-101 (2015)] visant à établir un standard de bonnes pratiques pour l'estimation de la ressource. Cette spécification reprend les pratiques usuelles des estimations conduites pour de nombreuses régions du globe [par ex. Stopa et al. (2011)] et notamment le SEMREV [Goncalves et al. (2014)], le site français d'expérimentation en mer des récupérateurs d'énergie des vagues et du vent [Mousslim et al. (2009)], et cela malgré les recherches limitées et le faible nombre de retours d'expérience issus de démonstrateurs industriels [Piche et al. (2015)].

Ce papier propose d'explorer le diagnostic fin, réalisé récemment pour le site SEMREV [Perignon (2016)] et rappelé ici, sur les capacités actuelles des outils de caractérisation de la ressource, et notamment de son contenu spectral qui semble revêtir une importance particulière pour ce domaine d'applications marines. La question semblait jusque là peu explorée, même si des productibles ont pu être comparés pour quelques machines données entre l'estimation faite de la ressource par modèle numérique et des mesures in situ [par ex. Saulnier et al. (2013)]. Du fait de la multiplicité de conceptions et de principes de fonctionnement [par ex. Babarit et al. (2012)] il a semblé intéressant d'étudier l'erreur associée à l'estimation afin de permettre l'évaluation de l'incertitude associée au productible houlomoteur pour un site donné.

Cette étude s'appuie principalement sur l'infrastructure de mesure et de modélisation mise en place dans le cadre du site d'essai SEMREV situé au large du Croisic. Elle s'inscrit en outre dans la démarche d'un site d'essai pour un effort de recherche appliquée dans un domaine émergent de l'ingénierie. L'évaluation de la ressource tire partie de la base de données publique HOMERE [Boudiere et al. (2013)] qui fournit des rejeux détaillés d'états de mer sur les 19 années de la période 1994-2012. Cette base de données constitue pour notre zone d'intérêt la chaîne de rejeu la plus précise jamais constituée, du fait notamment de la paramétrisation de la physique qu'elle inclut : les termes de forçage et dissipation [Arduin et al., (2009a) & (2010)] fournissent à ce jour les meilleures performances pour la région Nord-Est Atlantique [Rasclé & Arduin (2013), Haiden et al. (2015)]. Grâce à cette formulation, l'équilibre devient local dans l'espace spectral et il n'est plus une simple fonction de paramètres intégraux du spectre (par ex. pente moyenne). La configuration numérique avec couplage de différents rangs d'imbrications de grilles et des raffinements locaux par grilles déstructurées, la prise en compte de l'évolution temporelle de champs de courant et de hauteurs d'eau, et d'un terme de friction au fond lié à la nature du sédiment, combinent notamment la prise en compte à l'état de l'art d'une majorité des processus d'intérêt dans l'évolution des états de mer. Ceci en fait une chaîne de modélisation dont les raffinements dépassent sur un grand nombre d'aspects les recommandations du standard IEC class 3 (c.-à-d. la classe de rejeux dédiés à la phase de conception détaillée d'un système). Du fait du stockage inédit des spectres en omnidirectionnels (1D) et directionnels (2D) sur la durée du rejeu pour un nombre important de sites de la zone couverte, les grandeurs résolues explicitement par la modélisation sont disponibles pour inter-comparaison et validation, avant tout traitement synthétique usuel dans des chaînes de conception d'ingénierie. Même si ces quantités spectrales sont exploitées pour des études à but de recherche ou de détail dans un cadre industriel, elle ne sont que peu évaluées autrement que par les paramètres

intégraux qui en découlent, en général via leurs moments à différents ordres. Dans le contexte houlomoteur, ou un récupérateur d'énergie des vagues intervient comme un filtre mécanique voire un résonateur sur une quantité spectrale descriptive d'un état de mer, il semble opportun de s'intéresser à la précision de cette description spectrale exploitée en donnée d'entrée.

2. Propriétés du site

Le site d'essai en mer SEMREV, officiellement lancé en 2007 et équipé d'un premier capteur de houle en 2009 a rapidement pu bénéficier de mesures d'états de mer, aussi continues que possible (Fig. 1) et issues de trois bouées de type Datawell WaveRider Mk3. Deux bouées sont mouillées sur le site à proprement parler aux coins Est et Ouest, dans des profondeurs de 34 et 36m respectivement (référencées au zéro hydrographique), et séparées d'une distance d'à peu près 1km (Fig. 2). Une bouée est mouillée plus au large, dans l'ouest de Belle-Ile, par 56m de profondeur. La donnée mesurée à la bouée Belle-Ile, ainsi que la mesure d'une des bouées Est ou Ouest du site suivant leur disponibilité est intégrée au réseau Candhis opéré par le CEREMA. Pour les années 2010 à 2012 pour lesquelles une donnée HOMERE est accessible, la disponibilité de la donnée pour les trois bouées est comprise entre 65% et 70%. La marée astronomique, semi-diurne, atteint pour le port du Croisic, le port de référence le plus proche, une amplitude de 6.1m, mais son influence sur la mesure d'états de mer sur SEMREV ne semble pas significative [Perignon & Le Crom 2015].

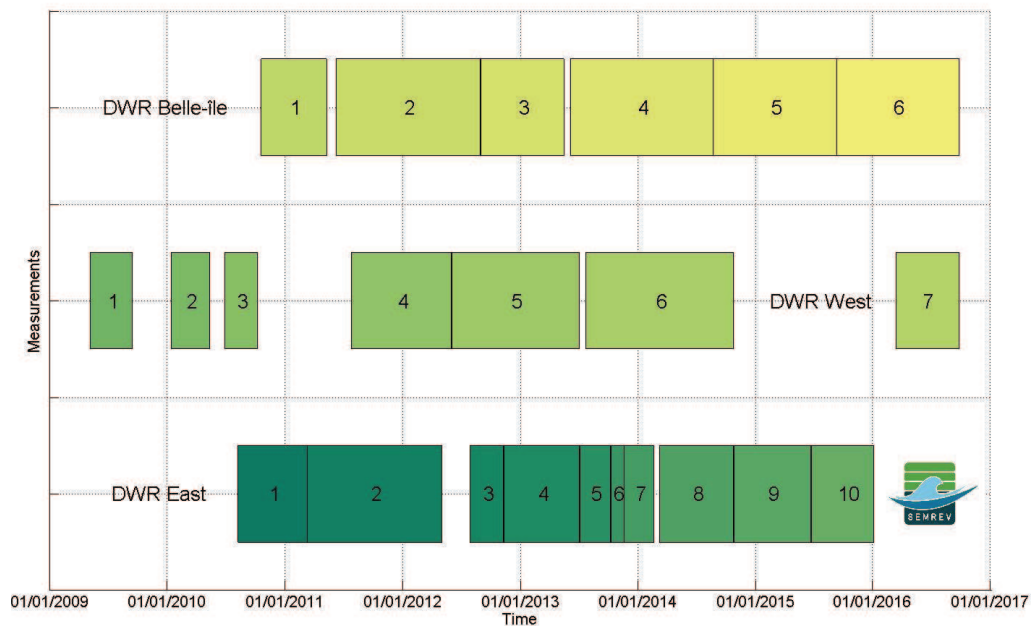


Fig. 1 – Diagramme de disponibilité des mesures de bouées houlographiques liées au site SEMREV

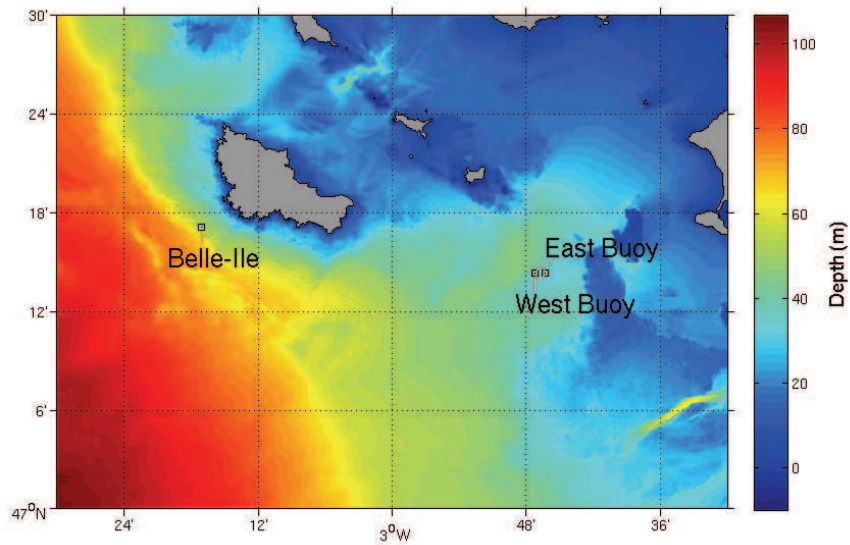


Fig. 2 – Localisation du site d’essai SEMREV et des trois mouillages de houlographes.

Pour une comparaison cohérente entre la donnée de rejeux HOMERE et la mesure de bouée, le calcul des spectres à partir de la mesure de pilonnement par les bouées est opéré sur le même pas de temps que les sorties modèle, c’est à dire 1h. Le traitement est effectué sur la donnée stockée en interne à la bouée plutôt que sur la donnée transmise en temps réel par HF du fait du meilleur taux de disponibilité de la donnée stockée.

Grâce à une concertation préalable à la constitution de la base de données HOMERE, un certain nombre de points d’intérêt, incluant les trois mouillages de houlographes liés à SEMREV, ont été identifiés afin de fournir nativement les grandeurs de sorties à ces sites prescrits. Parmi les grandeurs qui présentent un intérêt lorsque l’on se penche sur la ressource houlomotrice, la valeur moyenne annuelle de puissance linéique J fournit des caractéristiques intéressantes pour l’estimation des propriétés d’un site

$$J_{1y} = \text{mean}_{1y} \left(\int \rho g C_g(f, h) E(f) df \right) \quad (1),$$

avec C_g et E les vitesses de groupe et densité spectrale d’une vague linéaire de fréquence f à une profondeur h . Extraite à la bouée ouest, la série temporelle sur 19 ans permet de calculer $\text{Moy}(J_{1y})=13.5$ kW/m (Fig. 3). L’écart type sur J_{1y} atteint 3.1 kW/m, et les variations sont comprises dans un intervalle de 7 kW/m à 20,7 kW/m. La variabilité interannuelle est donc particulièrement forte sur cette valeur. Cela est probablement à lier à la situation du site, relativement protégé par Belle-Île des houles Nord-Ouest et plus exposé sur les secteurs Sud-Ouest [Goncalves et al. (2014)].



Fig. 3 – Moyenne annuelle de puissance linéique estimée sur SEMREV à partir des 19 ans de rejeu HOMERE.

3. Evaluation de la précision des estimations

a. Paramètres intégraux

Des comparaisons entre mesures et estimations d'états de mer ont été conduites à plusieurs reprises dans le contexte du site d'essai SEMREV, que ce soit pour l'estimation et l'extrapolation de conditions extrêmes [Le Crom & Perignon (2013)], la production d'énergie via un houlomoteur générique [Saulnier et al. (2013)], ou l'estimation de propriétés du site [Perignon & Le Crom (2015)]. Dans ces travaux, la précision des outils numériques en général et des données issues d'HOMERE en particulier a été principalement évaluée à partir de séries temporelles de paramètres intégraux usuels. L'erreur entre une série temporelle d'observations et d'estimations est ainsi classiquement qualifiée à partir de différents estimateurs tels que l'erreur quadratique normalisée (*NRMSE*),

$$NRMSE(X) = \sqrt{\frac{\sum (X_{obs} - X_{mod})^2}{\sum X_{obs}^2}} \quad (2),$$

son biais normalisé (*NB*)

$$NB(X) = \frac{\sum (X_{obs} - X_{mod})}{\sum X_{obs}} \quad (3),$$

son coefficient de corrélation (*r*)

$$r(X) = \frac{\sum (X_{obs} - \bar{X}_{obs})(X_{mod} - \bar{X}_{mod})}{\sqrt{\sum (X_{obs} - \bar{X}_{obs})^2 \sum (X_{mod} - \bar{X}_{mod})^2}} \quad (4),$$

et son index de dispersion (*SI*) qui permet de corriger l'erreur quadratique de son biais

$$SI(X) = \sqrt{\frac{\sum [(X_{obs} - \bar{X}_{obs}) - (X_{mod} - \bar{X}_{mod})]^2}{\sum X_{obs}^2}} \quad (5).$$

Les comparaisons sont en général présentées en terme d'erreur sur l'estimation de la hauteur significative H_s et de la période d'énergie T_e (cf par ex. standard IEC), les deux quantités centrales dans l'estimation de la ressource. On complète ici ces comparaisons avec l'erreur sur la

variance de l'élévation E liée par une relation quadratique à H_s , et l'erreur sur l'estimation de la puissance omnidirectionnelle J . Le Tableau 1 récapitule ces performances aux trois points de mesure et d'estimation quand les données issues d'HOMERE sont concomitantes avec des mesures sur la période 2010-2012. Chacun des paramètres est calculé à partir de la même donnée de sortie, mais les relations non-linéaires entre les différents paramètres influent ici sur les estimateurs d'erreur. Ainsi, la hauteur significative est le paramètre intégral le mieux résolu pour les trois sites, avec une détérioration légère des performances entre Belle-Ile et les deux mouillages du site. La période d'énergie laisse apparaître le même accroissement de l'erreur entre le point du large et le site. Il est vraisemblable que la complexité des processus en jeu dans l'évolution des états de mer lorsque la profondeur diminue soit la raison principale de cette légère détérioration. La puissance linéique semble elle résolue de manière assez similaire entre la donnée à Belle-Ile et la donnée du site, avec des performances bien moindre et une erreur quadratique de près de 33%.

Aucun des paramètres intégraux ne semble à lui seul décrire la capacité d'estimation de la ressource par un modèle numérique et la précision varie grandement en fonction du paramètre étudié, reflétant autant les relations non-linéaires entre paramètres que la répartition de l'erreur dans les spectres. La caractérisation spectrale de cette ressource semble donc permettre de fournir un diagnostic intéressant qui explique certaines des tendances observées.

b. Contenu spectral

A ce jour, si l'intérêt d'une évaluation plus fine de la capacité des modèles à fournir des spectre 1D ou 2D semble indéniable, aucune méthode de comparaison pour ces quantités n'a vraiment émergé malgré les techniques évoquées [par ex. Allender et al. (1989) ; Krogstad et al. (1999) ; Collins et al. (2015a)].

Du point de vue de la conception, de l'étude des réponses hydrodynamiques ou de la production d'énergie de systèmes de type houlomoteur, l'utilisation des données est souvent limitée à celle de spectres 1D d'amplitude. Ces derniers fournissent une description linéaire de l'état de mer d'entrée aussi bien pour les modèles fréquentiels que pour ceux résolus en temporel. Ainsi, le contenu spectral peut être vu comme une somme de bandes de fréquences (ou nombres d'ondes) indépendantes les unes des autres et le contenu de chaque bande au cours du temps peut constituer une série temporelle indépendante des autres série des autres bandes. L'ensemble de ces séries temporelles de quantités spectrales (par ex. amplitude, puissance, énergie) peut donc être évalué par les 4 estimateurs d'erreur évoqués au point

| Quantity | Buoy | NRMSE | CORR | NB | SI |
|--------------------------|-------------|--------------|-------------|-----------|-----------|
| H_s [m] | Belle-Île | 0,12 | 0,97 | 0,00 | 0,12 |
| | West | 0,14 | 0,97 | -0,03 | 0,14 |
| | East | 0,14 | 0,97 | -0,02 | 0,14 |
| T_e [s] | Belle-Île | 0,13 | 0,89 | 0,05 | 0,12 |
| | West | 0,18 | 0,79 | 0,07 | 0,17 |
| | East | 0,17 | 0,80 | 0,05 | 0,16 |
| E [m ²] | Belle-Île | 0,21 | 0,96 | 0,02 | 0,21 |
| | West | 0,25 | 0,96 | -0,07 | 0,25 |
| | East | 0,25 | 0,96 | -0,06 | 0,24 |
| J [W.m ⁻¹] | Belle-Île | 0,33 | 0,93 | -0,04 | 0,33 |
| | West | 0,35 | 0,94 | -0,21 | 0,33 |
| | East | 0,33 | 0,94 | -0,18 | 0,32 |

Tableau 1 - Estimation de l'erreur sur différents paramètres usuels entre la donnée HOMERE et les observations in-situ pour le site d'essai SEMREV

précédent et constituer de manière simple mais efficace une signature spectrale de l'erreur [Perignon (2016)].

En utilisant la puissance linéique J [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$] évoquée précédemment, définie à partir de la variance de l'élévation E et la vitesse de groupe associée C_g , la quantité spectrale associée à une fréquence centrale f_i et une largeur de bande $2\Delta f_i$ peut être définie telle que

$$J(f_i, \Delta f_i) = \int_{f_i - \Delta f_i}^{f_i + \Delta f_i} \rho g C_g(f) E(f) df \quad (6)$$

Les mêmes comparaisons que celle présentée dans le **Tableau 1** entre données de modèle et mesure peuvent être conduites pour les périodes communes aux trois mouillages. Les quatre signatures spectrales des estimateurs sont tracées dans les figures 4 à 7. En dépit de la discrétisation fréquentielle adoptée, calquée sur celle du modèle numérique, les trois signatures présentent une très forte cohérence fréquentielle sur l'ensemble du domaine. Conformément à ce que les comparaisons entre paramètres intégraux laissaient supposer dans la section précédente, la signature de l'erreur porte en outre un fort caractère non-linéaire en fréquence. Si la comparaison à la bouée Belle-Île fournit une erreur bien distincte des deux erreurs évaluées sur le site, ces deux erreurs sont elles particulièrement similaires comme on pouvait l'attendre. Les différences, qui restent mineures, sont vraisemblablement l'effet de comparaison menées sur des périodes parfois disjointes en fonction de la disponibilité des mesures entre 2010 et 2012, en chacun ces deux sites de mouillage (Fig. 1).

Pour chacun des trois sites, trois secteurs fréquentiels se distinguent qualitativement. Le premier, pour des fréquences inférieures à 0.1Hz, montre une erreur particulièrement significative entre mesures et modèle. L'erreur spectrale maximale, en termes de NRMSE, biais, corrélation (et par conséquent également SI) apparaît dans ce domaine. Cette erreur maximale en terme de RMSE est atteinte à la plus basse bande de fréquence résolue dans le spectre à Belle-Île, quand elle apparaît au dessus de 0.05Hz sur le site SEMREV. Cette erreur dépasse la barre des 100% et le modèle surestime la ressource avec un biais également au dessus de 100%, et une perte de corrélation significative dans ces gammes de fréquences. Il semble donc qu'un ou plusieurs processus influencent de manière significative l'estimation d'états de mer entre un site relativement exposé par $\sim 60\text{m}$ de profondeur et une zone plus protégée par $\sim 35\text{m}$, avec une dégradation significative des performances en arrivant à la côte. D'après ce diagnostic spectral, il sera donc intéressant d'évaluer quels processus participent à cette dégradation parmi la réfraction, les différentes formes de dissipation, les transferts non-linéaires ou autres à ces profondeurs intermédiaires pour des houles longues.

Le second secteur fréquentiel montre les meilleures performances du domaine spectral. Ainsi, la plus basse erreur quadratique, la plus haute corrélation et le biais le plus contenu sont rencontrés entre 0.1 et 0.2 Hz pour les trois bouées. Dans cette bande, l'erreur NRMSE est significativement inférieure à celle obtenue sur le paramètre intégral de puissance dans la section précédente (Tableau 1) et établi à 33%.

Dans le troisième secteur, au dessus de 0.2Hz, la signature spectrale de l'erreur est un peu plus différenciée entre le mouillage de Belle-Île et les deux bouées du site. Quand les performances se dégradent assez linéairement avec l'augmentation de fréquence à Belle-Île, les deux bouées du site voient une dégradation particulière centrée à $\sim 0.25\text{Hz}$ ($T=4\text{s}$) en terme de NRMSE. A ces fréquences, cela montre que pour la zone plus côtière SEMREV n'est pas aussi bien résolue qu'en mer en terme de mer du vent. Au moins un processus ou une grandeur d'entrée n'est pas aussi bien résolue sur le site que plus au large.

L'évaluation de la signature spectrale de l'erreur sur la puissance peut être complétée par l'estimation sur la production afin d'évaluer comment l'erreur instantanée sur la puissance disponible se traduit au cours du temps par une erreur d'estimation sur l'énergie disponible. Grace aux presque 3 années de mesure disponible, un productible annuel moyen est déduit et comparé aux estimations HOMERE (Fig. 8 et Fig. 9). Les résultats sont identiques au point Est et au point Ouest. Si l'estimation de l'énergie moyenne par bandes de fréquences semble bien résolue à Belle-Île, avec une surestimation de 4.5% au global de l'énergie moyenne annuelle par le modèle, l'influence de l'erreur sur le site est beaucoup plus significative. Cette erreur spectrale

se traduit par une surestimation globale de 18% et 20.6% aux bouées Est et Ouest respectivement. A ces endroits, le biais est bien systématique et particulièrement sensible pour les composantes basse fréquence. Ceci confirme le diagnostic initial fait sur la signature spectrale de l'erreur.

4. Conclusions et discussions

Cette étude a présenté une évaluation des capacités d'estimation fine des états de mer, spécifique au site d'essai SEMREV par comparaison entre des sorties de la base de données HOMERE et des mesures de bouées in-situ concomitantes sur la période 2010-2012.

Après une comparaison classique de paramètres intégraux standards, dont les performances d'estimation diffèrent suivant les lieux de comparaison et les grandeurs comparées, une méthode simple mais efficace de caractérisation de l'erreur spectrale 1D d'estimation est appliquée. La signature de cette erreur apparaît particulièrement cohérente tant dans l'espace spectral qu'entre les différents sites de mesure. Elle met en évidence des spécificités de caractérisation d'état de mer par les modèles spectraux et clarifie leurs capacités actuelles de précision. Si la gamme de périodes [5s, 10s] semble la mieux résolue tant pour la bouée au large que pour les bouées du site, les bandes moyennes mettent en lumière une dégradation dans l'estimation de la ressource. Pour la partie basse fréquence, les plus faibles performances sont observées au dessus de 20s de période. Par des profondeurs intermédiaires et pour un site moins exposé, l'erreur est maximale dans la gamme de périodes [12s, 20s] avec une erreur quadratique dépassant la barre des 100% et une surestimation nette par les modèles. Avec une dégradation des performances pour les quatre estimateurs d'erreurs exploités, il semble qu'un ou plusieurs processus tenant un rôle principal dans l'évolution des états de mer du large à la côte ne soit à ce jour pas pris en compte de manière satisfaisante. Si cette surestimation contribue à sa manière aux méthodes de dimensionnement de structures, l'évaluation de la ressource pâtit elle de ce manque de précision. A l'autre bout du spectre, l'erreur présente un pic secondaire aux deux mouillages du site dans la gamme de période inférieure à 5s quand l'estimation au large ne présente pas de tels artéfacts. Il est donc probable que les données et paramètres d'entrée dans cette zone de profondeur intermédiaire ne soient pas suffisamment précis pour rendre compte de l'évolution des mers de vent locales.

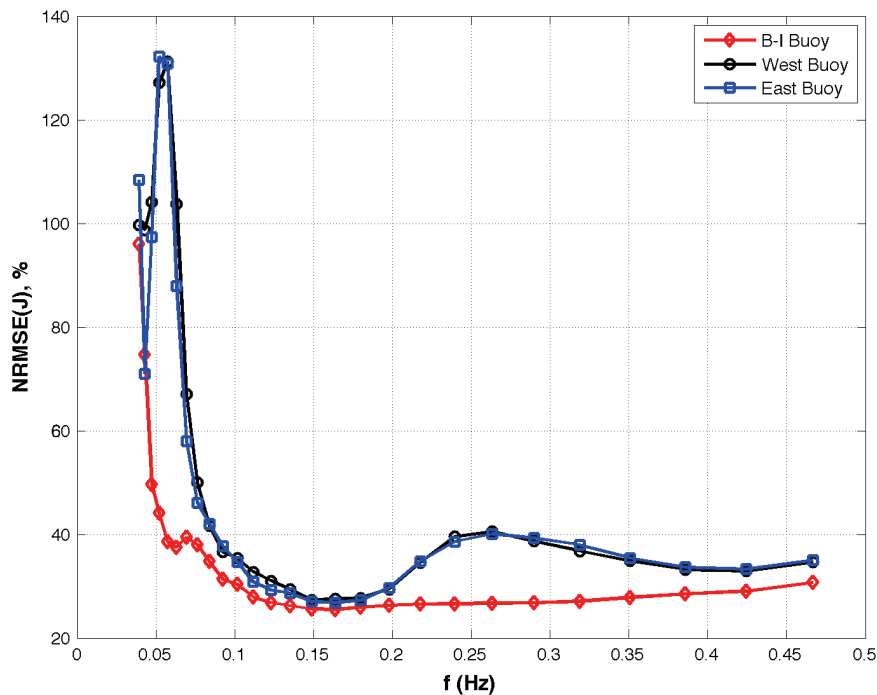


Fig. 4 – Erreur NRMSE de la puissance linéique par bande de fréquences entre mesures et estimation HOMERE

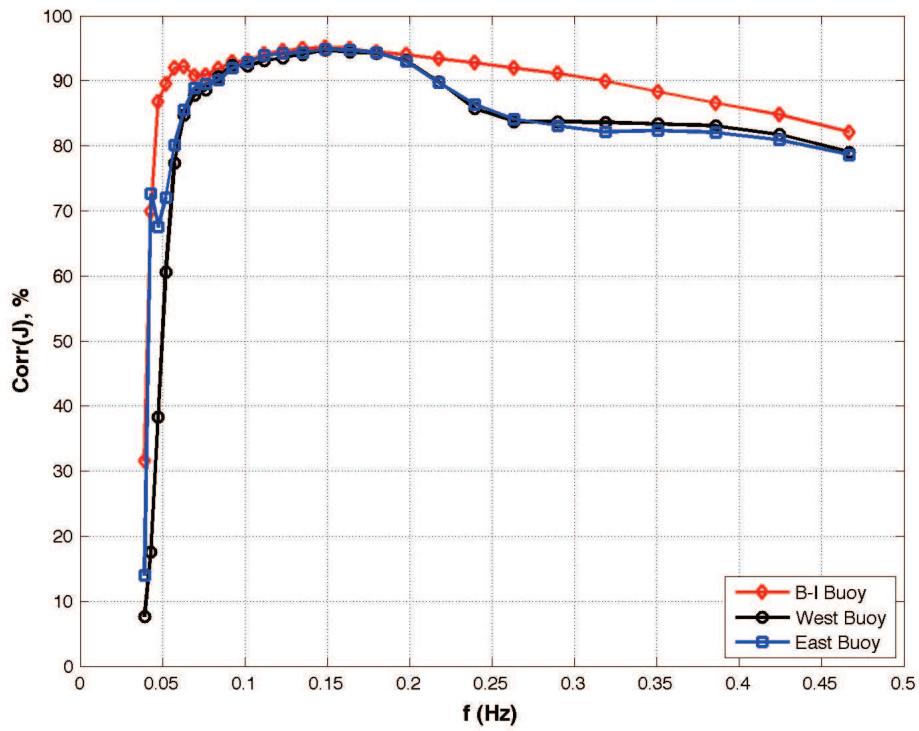


Fig. 5 – Corrélation de la puissance linéique par bande de fréquences entre mesures et estimation HOMERE

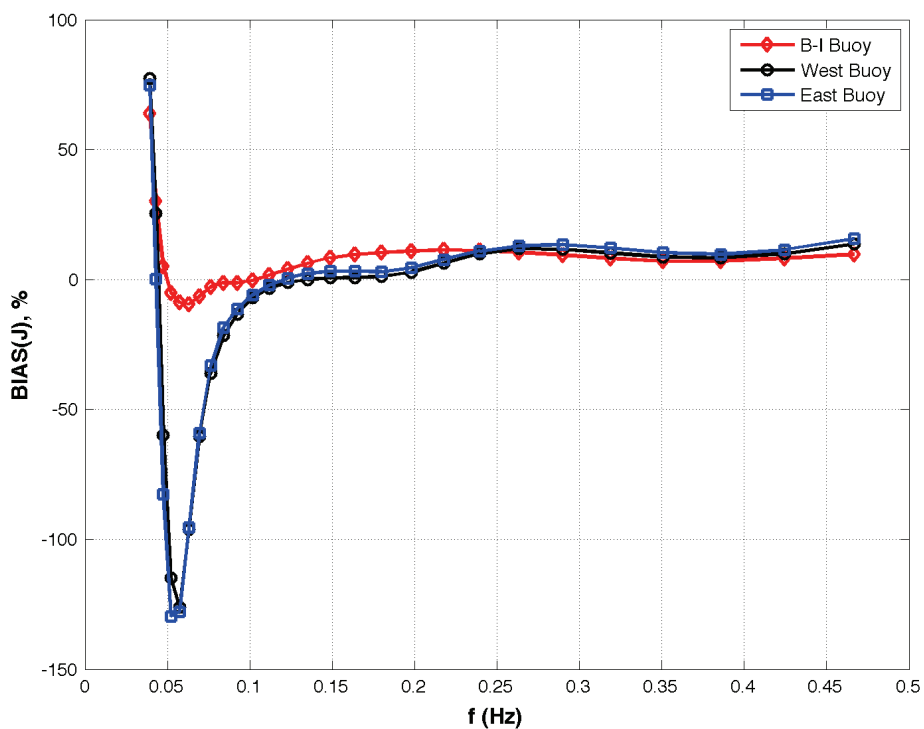


Fig. 6 – Biais normalisé de la puissance linéique par bande de fréquences entre mesures et estimation HOMERE

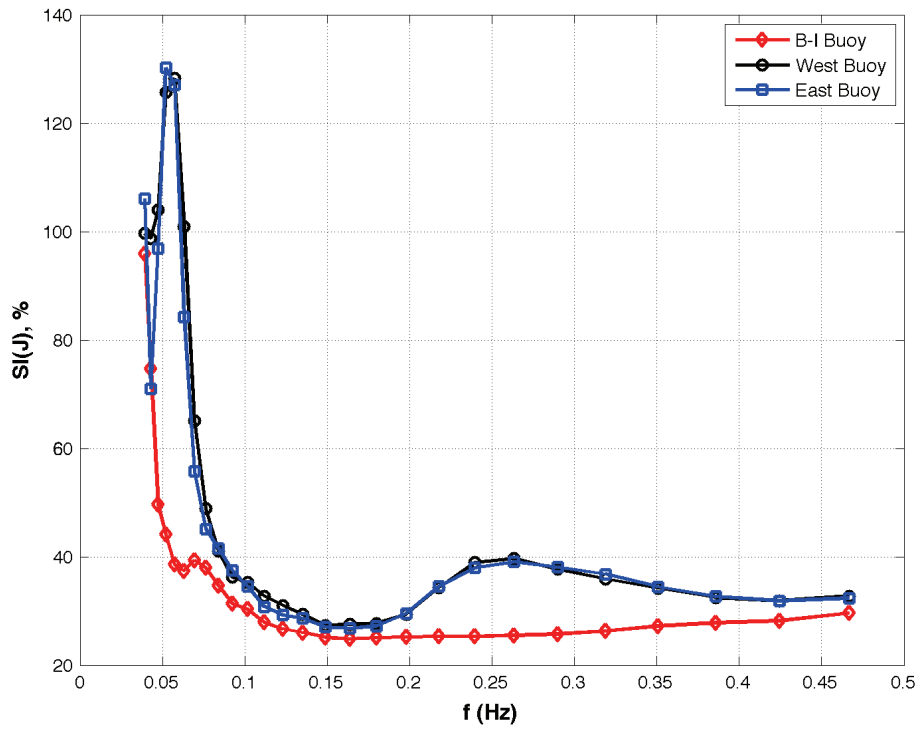


Fig. 7 –Indice de dispersion de la puissance linéique par bande de fréquences entre mesures et estimation HOMERE

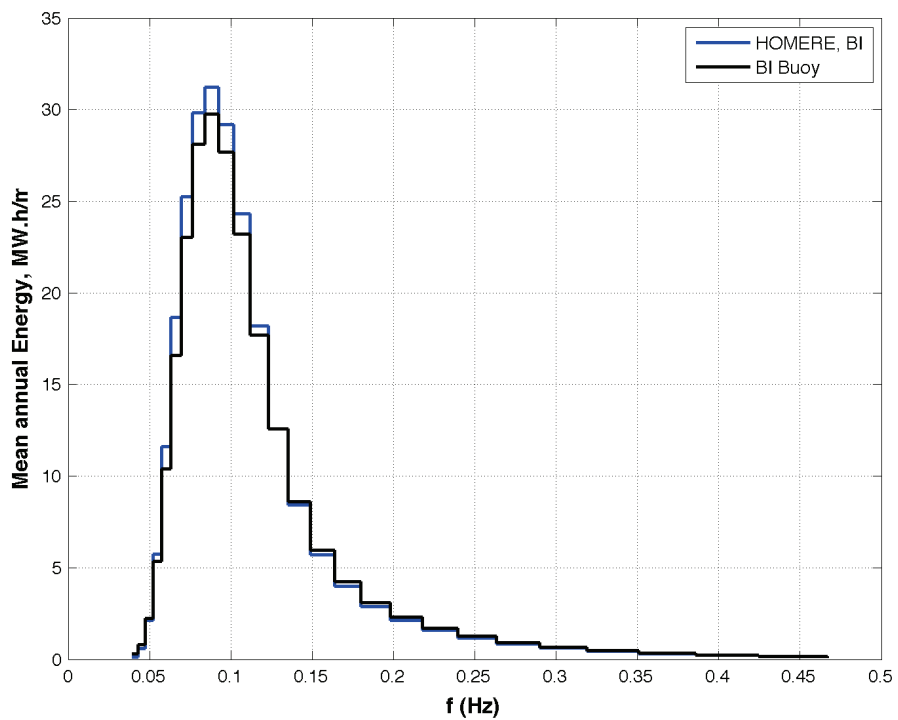


Fig. 8 – Energie moyenne annuelle disponible par bande de fréquence comparée entre HOMERE et mesure à Belle-Île

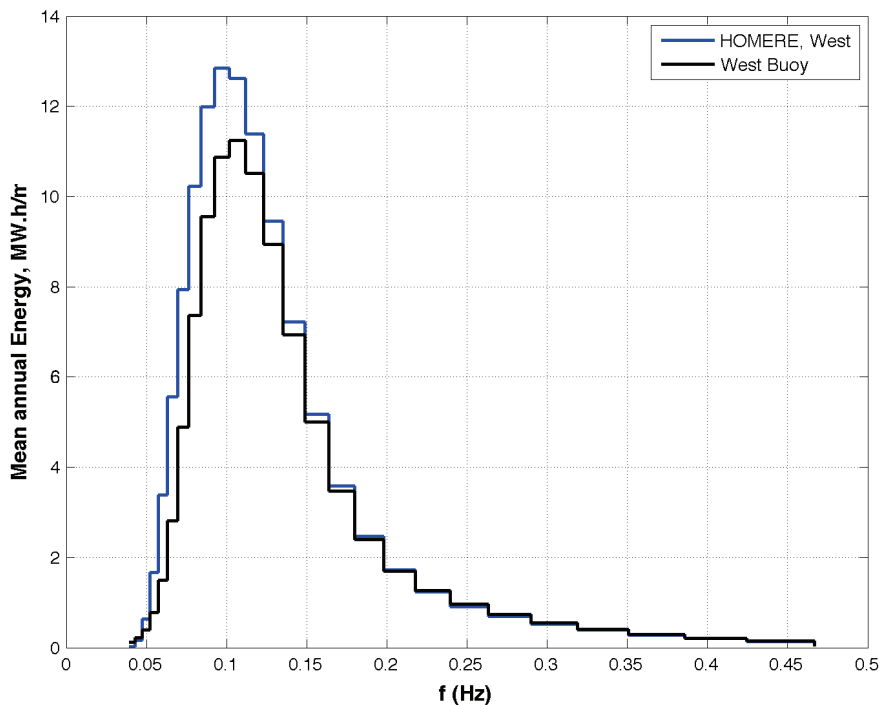


Fig. 9 – Energie moyenne annuelle disponible par bande de fréquence comparée entre HOMERE et mesure à la bouée SEMREV Ouest.

Etant données les performances en précision et le haut niveau de description de la donnée exploitée dans cette étude, et le diagnostic qu'elles permettent sur la signature des erreurs dans le spectre, il semble que tout raccourci technique visant à synthétiser de la donnée pour des besoins d'ingénierie de structures aux propriétés inédites dans des zones potentiellement énergétiques mais ne bénéficiant que d'un faible retour d'expérience soit à proscrire.

La surestimation par le modèle spectral aux basses fréquences ainsi que l'erreur commise, particulièrement importantes, pose par ailleurs la question de la prise en compte adéquate des processus et des forçages dans l'évolution de ces états de mer. Une étude est donc en cours pour évaluer si un transfert non-linéaire lié aux effets de bathymétrie peut être à l'origine de l'erreur de modélisation observée. Un événement extrême présentant les caractéristiques basse fréquence ainsi qu'une signature de l'erreur spectrale compatible a été sélectionné : lors de l'hiver 2013-2014, la tempête Hercules du 06/01 et 07/01/2014 a notamment produit des états de mer dont le pic d'énergie a été enregistré sur site à plus de 22s, pour une hauteur significative de plus de 4m (Fig. 10) [Perignon & Le Crom (2015)]. Un calcul de tracé de rayon inverse a été appliqué afin de déterminer le trajet de la composante principale du spectre et le profil de bathymétrie associé. Cette étude 1D tenant compte de la directionnalité de la composante principale du spectre vise à évaluer de manière déterministe si de telles conditions d'états de mer se rapprochent du cas d'une marche immergée précédemment étudié par une méthode potentielle non-linéaire (Fig. 12) [Gouin et al. (2016)]. En particulier, la signature spectrale des transferts non-linéaires associés à la propagation du large jusqu'au site SEMREV sera caractérisée.

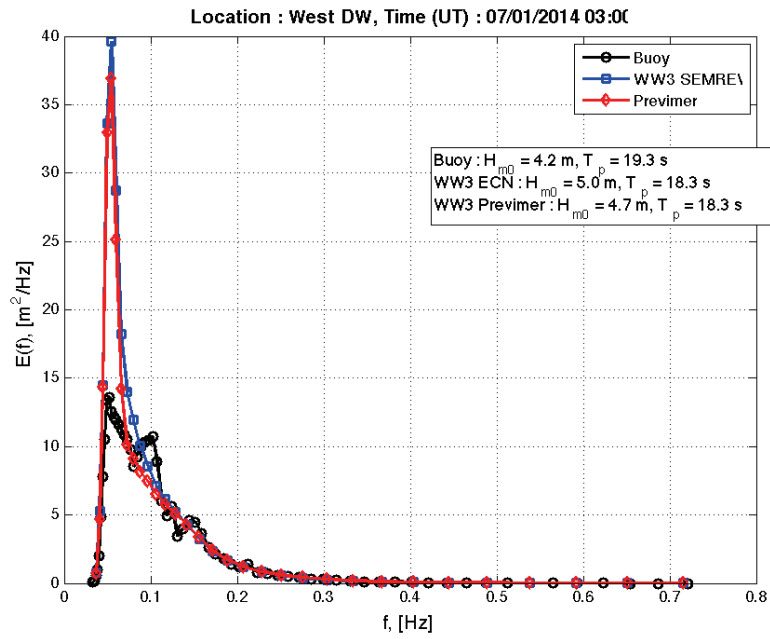


Fig. 10 - Comparaison de mesure de houle par houlographe Datawell à différentes chaînes de modélisation sur le site SEMREV lors de la tempête Hercules (2014)

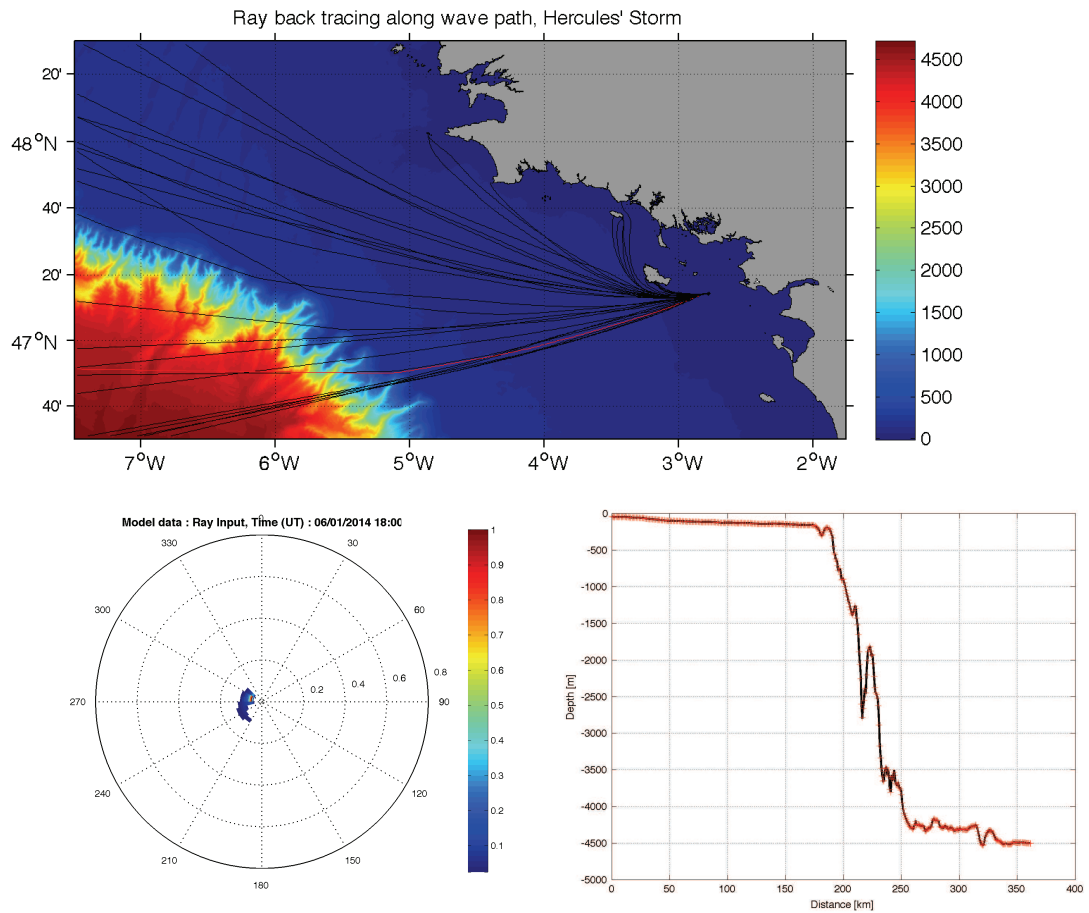


Fig. 11 – a) Extraction par tracé de rayon inverse du trajet de la composante principale de l'état de mer de la tempête Hercules. b) Spectre estimé au large permettant d'identifier la direction de rayon à sélectionner. c) Profil bathymétrique associé pour le rayon sélectionné

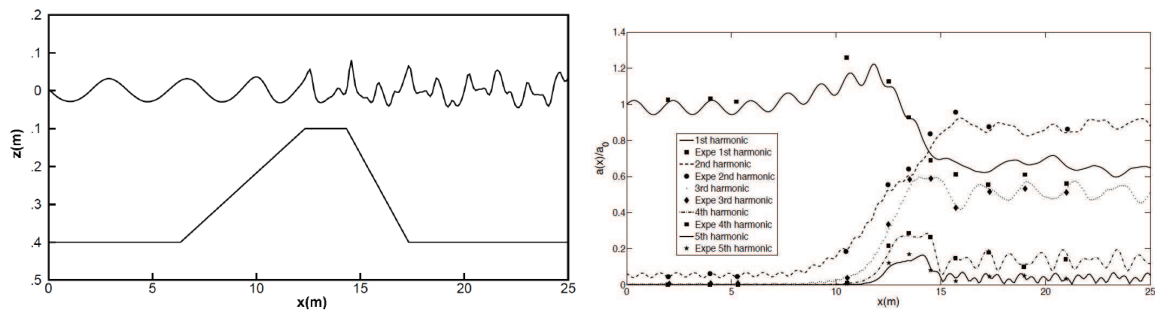


Fig. 12 – Propagation d’une houle régulière au-dessus d’une marche immergée. Déformée de surface libre (gauche) et analyse harmonique correspondante (droite)

Remerciements

Le travail présenté ici a pu profiter du soutien du Labex Mer (Programme d’Investissements d’Avenir ANR-10-LABX-19-01), de l’IRT Jules Vernes et du SEMREV.

Références

- [1] Allender, J. A. (1989). The WADIC project: a comprehensive field evaluation of directional wave instrumentation. *Ocean Engineering*, 16 (5), 505-536.
- [2] Ardhuin, F. R. (2010). Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves: Part I, definition, calibration and validation. *Journal of Physical Oceanography*, 40 (9), 1917-1941.
- [3] Ardhuin, F., Chapron, B., & Collard, F. (2009). Observation of swell dissipation across oceans. *Geophysical Research Letters*, 36 (6).
- [4] Babarit, A., Hals, J., Muliawan, M., Kurniawan, A., Moan, T., & Krogstad, J. (2012). Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. *Renewable Energy*, 41, 44-63.
- [5] Boudiere, E., Maisondieu, C., Ardhuin, F., Accensi, M., Pineau-Guillou, L., & Lepasqueur, J. (2013). A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters. *International Journal of Marine Energy*, 3-4, e40-e52.
- [6] Collins III, C. O. (2015). A Statistical Method for Correlating Paired Wave Spectra. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32 (11), 2130-2146.
- [7] Foley, M., Cornett, A., Holmes, B., Lenée-Bluhm, P., & Liria, P. (2012). Standardising resource assessment for wave energy converters. *The 4th International Conference on Ocean Energy*, (p. 10).
- [8] Goncalves, M., Martinho, P., & Guedes Soares, C. (2014). Wave energy conditions in the western French coast. *Renewable Energy*, 62, 155-163.
- [9] Gouin, M., G. Ducrozet, P. Ferrant, Development and validation of a non-linear spectral model for water waves over variable depth, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, Volume 57, May–June 2016, Pages 115-128, <http://dx.doi.org/10.1016/j.euromechflu.2015.12.004>.
- [10] Haiden, T. J. (2015). Evaluation of ECMWF forecasts, including 2014-2015 upgrades. Technical Report, ECMWF.
- [11] IEC/TS 62600-101. (2015). Wave energy resource characterization and assessment.
- [12] Krogstad, H. E. (1999). Methods for intercomparison of wave measurements. *Coastal Engineering*, 37 (3), 235-257.
- [13] Le Crom, I., Perignon, Y., Saulnier, J. B., & Berhault, C. (2013). Extreme Sea Conditions in Shallow Water: Estimations Based on In-Situ Measurements. *ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers.
- [14] Mouslim, H. B. (2009). Development of the french wave energy test site SEM-REV. *Proceedings of the 8th European wave and tidal energy conference*, (pp. 31-35). Uppsala, Sweden.
- [15] Noad, I. &. (2015). Wave Energy Absorption by Submerged Flap-type Oscillating Wave Surge Converters. *Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference*. Nantes, France.
- [16] Perignon, Y., & Le Crom, I. (2015). Challenging best knowledge to real conditions on the SEMREV marine test site. Nantes: EWTEC.

- [17] Perignon, Y. (2016). Assessing Accuracy in the estimation of spectral wave energy resource on the French Atlantic test site SEMREV Submitted to *Renewable Energy*.
- [18] Piche, S., Cornett, A., Baker, S., & Nistor, I. Validation of the IEC Technical Specification for Wave Energy Resource Assessment. *11th European Wave and Tidal Energy Conference*. Nantes, France.
- [19] Rasche, N. &. (2013). A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: Model validation with improved source term parameterization. . *Ocean Modelling* , 70, 174-188.
- [20] Saulnier, J., Soulard, T., Perignon, Y., Le Crom, I., & Babarit, A. (2013). About the Use of 3rd Generation Wave Prediction Models for Estimating the Performance of Wave Energy Converters in Coastal Regions. *EWTEC*. Aalborg.
- [21] Stopa, J., Cheung, K., & Chen, Y.-L. (2011). Assessment of wave energy resources in Hawaii. *Renewable Energy*, 36, 554-567.