



Ifremer

15^{ÈMES} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22 - 24 novembre 2016 - Brest

CARACTERISATION STATISTIQUE DES CONDITIONS D'ETATS DE MER MULTIMODALES DANS LE GOLFE DE GASCOGNE POUR LE DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES EN MER.

STATISTICAL CHARACTERISATION OF COMPLEX SEA-STATES IN THE BAY OF BISCAY FOR THE DESIGN OF MARINE STRUCTURES

Christophe Maisondieu

IFREMER ZI Pointe du Diable - CS 10070 - 29280 Plouzané – France

Christophe.maisondieu@ifremer.fr

Résumé

La caractérisation de la réponse de structures placées en mer et soumises à l'action des vagues passe le plus souvent par des approches fréquentielles nécessitant de fait une bonne description du contenu spectral du chargement. Le contenu fréquentiel de l'état de mer constituant l'excitation est le plus souvent modélisé par une fonction analytique, spectre de densité d'énergie de type JONSWAP ou Pierson-Moskowitz par exemple, fonction dont la forme unimodale ne permet pas de représenter correctement la distribution spectrale de l'énergie au sein d'un état de mer complexe constitué de la superposition de plusieurs systèmes de vagues, houle et mer du vent. Une telle approximation de la distribution de l'énergie peut conduire à des biais importants dans l'évaluation de la réponse d'une structure. S'appuyant sur le jeu de données de partitionnement issu de la base de données HOMERE, une cartographie des statistiques d'occurrence des états de mer complexes est réalisée. Ces statistiques montrent la prévalence des états de mer multimodaux sur la zone Mache-Gascogne considérée et confirment l'importance et la nécessité de prendre en compte une description plus fine de la distribution spectrale de l'énergie au sein des états de mer. Ces cartographies font également apparaître une variabilité tant saisonnière que spatiale de ce caractère multimodal des états de mer qu'il sera également important de prendre en compte dans les études de climatologies pour le dimensionnement des structures en mer.

Summary

Response of marine structures undergoing wave action is generally assessed in the frequency domain hence requiring an accurate spectral description of the loading. Sea-states are generally modeled by means of analytical functions such as JONSWAP or Pierson-Moskowitz spectra which are not well suited for a proper description of complex sea-states hence can induce a bias in the assessment of the response of the structure. Taking advantage of the existing partitioning data available in the HOMERE database, a mapping of the occurrences of multimodal sea-states over the Channel-Biscay area is completed, showing that such complex sea-states are numerous, hence a detailed and accurate description of the sea-states spectral content is necessary for a proper assessment of the response of marine structures.

I – Introduction

La conception et le dimensionnement de structures destinées à être déployées et opérées en mer nécessitent l'évaluation des réponses structurelle et dynamique de ces dernières sous l'action de l'environnement et en particulier celle des vagues.

La caractérisation de la réponse de ces structures passe le plus souvent par des approches fréquentielles nécessitant de fait une description précise du contenu spectral du chargement. Dans le cas de l'étude de la réponse d'une structure soumise à l'action des vagues, la description la plus complète de l'état de mer constituant l'excitation est fournie par le spectre directionnel $S(f, \theta)$ décrivant la distribution de la densité d'énergie des vagues à la fois en fréquence et en direction. La représentation analytique de ces spectres directionnels s'effectue généralement par décomposition de ces derniers en un produit de fonctions permettant de décrire, d'une part, la distribution spectrale de l'énergie et d'autre part sa distribution directionnelle en fonction de la fréquence $(f, \theta) = S(f).D(f, \theta)$. Différentes méthodes d'ajustement sont proposées dans la littérature [2], [10] permettant d'identifier une fonction de distribution directionnelle $D(f, \theta)$ adaptée et normalisée en sorte d'être unitaire sur l'ensemble des directions. La distribution fréquentielle de l'énergie est quant à elle le plus souvent modélisée au moyen d'une fonction analytique, spectre de densité d'énergie de type JONSWAP [7] ou Pierson-Moskowitz [13] par exemple, dépendant d'un certain nombre de paramètres globaux. Cependant, une limitation forte de ces fonctions paramétriques est liée à leur forme unimodale ne permettant pas de représenter correctement la distribution spectrale de l'énergie au sein d'un état de mer complexe constitué de la superposition de plusieurs systèmes de vagues, houles et mer du vent. Une telle approximation de la distribution de l'énergie peut conduire à des biais importants dans l'évaluation de la réponse d'une structure, en particulier lorsque l'on s'intéresse à l'estimation de la puissance extraite par un convertisseur houlomoteur [1], [12].

Avec le déploiement de plus en plus généralisé ces dernières décennies de bouées houlographes directionnelles, l'amélioration des modèles de vagues [14] conduisant à une généralisation de la construction de bases de données spectrales, le caractère complexe des états de mer est de plus en plus fréquemment investigué. Si l'occurrence importante de ces états de mers multimodaux est avérée, la coexistence locale de houles et de mer du vent semble faire l'objet d'une forte variabilité spatiale. On observe par exemple en Mer du Nord des conditions unimodales environ 68% du temps, essentiellement dominées par des mers du vent [4], alors que le long des côtes du Portugal ces conditions unimodales prévalent environ 75% du temps, dominées par la présence de houles [16]. Dans le Golfe de Gascogne, en particulier dans sa partie centrale, au large, il a été observé que les conditions unimodales ne représentaient qu'environ 38% des occurrences, essentiellement dominées par des conditions de houles [8].

La base de données de rejeu d'états de mer HOMERE [3] mise en œuvre par l'Ifremer a été construite sur la base d'une configuration haute résolution du modèle de vagues WaveWatchIII® [18] permettant en particulier le partitionnement [19] des spectres d'états de mer et l'identification des systèmes de vagues, houles et mer du vent qui les constituent.

Le jeu de données de sortie de la base de données HOMERE permet de disposer des paramètres globaux de ces systèmes de vagues, à chaque pas de temps et sur l'ensemble de la grille haute résolution couvrant la zone du golfe de Gascogne et de la Manche.

Tirant profit de cette base de données, on s'intéresse ici à la caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle de la complexité des états de mer sur le domaine Manche - Golfe de Gascogne, à travers la mise en place et l'analyse d'une cartographie des différentes conditions d'états de mer ainsi qu'à travers l'analyse statistique locale en quatre sites de référence.

L'importance d'une description spectrale précise des états de mer pour le dimensionnement des structures est discutée dans la seconde partie. La base de données HOMERE est présentée dans la troisième partie où sont plus particulièrement décrites les données relatives au partitionnement. Les cartographies d'occurrence des états de mer sont présentées et discutées dans la quatrième partie et complétées par la présentation de résultats statistiques sur quatre sites de référence.

II - Evaluation fréquentielle de la réponse d'une structure

La réponse à l'action des vagues d'une structure placée en mer peut être évaluée dans le domaine fréquentiel par une relation de la forme

$$P = \int R(f).S(f)df \quad (1)$$

dès lors que la fonction de transfert $R(f)$ caractéristique de la réponse est connue. Compte tenu de cette relation, la qualité de l'estimation de la réponse dépend fortement de la représentativité de la distribution spectrale de l'énergie fournie par le spectre $S(f)$. En particulier, l'utilisation d'une forme analytique de spectre unimodal de type JONSWAP ou Pierson-Moskowitz par exemple peut conduire à une description erronée de la distribution spectrale de l'énergie dans le cas d'un état de mer complexe caractérisé par les mêmes paramètres globaux, hauteur significative et période de pic (Figure 1).

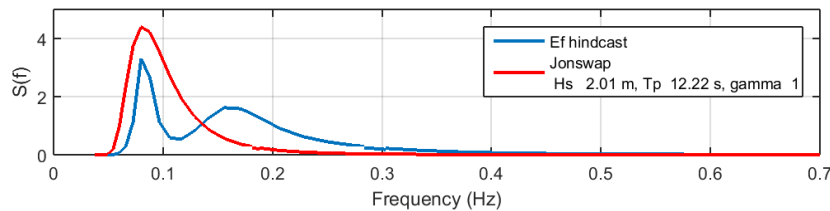


Figure 1: Spectre bimodal et Spectre de JONSWAP équivalent

Des études portant sur l'estimation de la puissance extraite par un convertisseur houlomoteur par exemple [8], [12],[1] ont montré que si le biais sur l'estimation de la puissance extraite pouvait être en moyenne relativement limité (<10%), les erreurs d'estimation de la puissance instantanée pouvaient, elles, être supérieures à 100%. De tels écarts instantanés impliquent en particulier qu'il n'est pas possible d'optimiser la réponse de tels convertisseurs dès lors que l'on utilise une forme spectrale inadaptée de représentation de l'excitation. Il est de fait indispensable de caractériser correctement le caractère complexe des états de mer en utilisant des densités spectrales réalistes.

III - La base de données HOMERE

HOMERE est une base de données de rejeu a posteriori d'états de mer développée par l'Ifremer avec pour objectif de fournir une information pertinente pour la réalisation des climatologies adaptées aux études de dimensionnement des structures en mer et en particulier pour le développement de convertisseurs d'énergie marine [3].

HOMERE est construite sur la base d'un rejeu a posteriori de simulations d'états de mer sur un domaine couvrant le Golfe de Gascogne et la Manche jusqu'au sud de la Mer du Nord et s'étendant sur une période de 19 années, de 1994 à 2012.

Le rejeu a été réalisé à l'aide du modèle spectral WW3®. La configuration mise en œuvre s'appuie sur un schéma de propagation explicite pour grille déstructurée permettant d'adapter la résolution du maillage aux différentes échelles contenues dans le domaine allant de la zone côtière (mailles raffinées de ~200m) au large (mailles de ~10km). Les critères de raffinement du maillage sont définis en fonction des variations bathymétriques et de la vitesse de propagation. Le maillage ainsi construit est composé de plus de 110000 nœuds (Figure 2).

Les champs de vents utilisés comme données de forçage du modèle sont issus des ré-analyses CFSR [15]. Le forçage du modèle prend également en comptes les courants de marée, les niveaux d'eau et surcôtes, calculés à l'aide du modèle hydrodynamique MARS 2D [11].

Les paramètres de sortie du modèle WW3® incluent par défaut un large ensemble de paramètres globaux, tels que la hauteur significative, la période de pic, la direction moyenne et la direction de pic de propagation. Tous ces paramètres et ensembles de données, ainsi que les spectres en fréquence sont

sauvegardés en chacun des nœuds du maillage déstructuré de haute résolution, avec un pas de temps d'une heure.

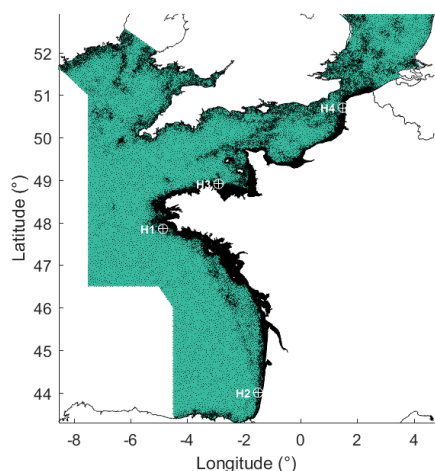


Figure 2: Grille de maillage de la base de données HOMERE et points de contrôle pour l'analyse locale

Site	H1	H2	H3	H4
Longitude(°)	-4.85W	-1.5 W	-2.89 W	1.5 E
Latitude (°)	47.85N	44.00N	48.91N	50.7N

Tableau 1: Coordonnées des sites pour l'analyse locale

Un partitionnement des différents systèmes de vagues constituant les états de mer complexes est également réalisé lors des simulations à partir duquel est produit un jeu de paramètres standards (hauteur significative, période de pic et direction moyenne) pour chacun des systèmes de houle et de mer de vent identifiés. L'approche utilisée pour ce partitionnement repose sur la méthode WaveSEP (Wave Spectrum Energy Partitioning) basée sur l'utilisation de méthodes de traitement d'image [18], [19]. Cette méthode permet de délimiter au sein du spectre directionnel la surface caractérisant la densité d'énergie associée à chacun des pics d'énergie identifiés. Chacune de ces partitions peut alors être caractérisée par les paramètres de hauteur significative, période de pic, direction moyenne associés. Un paramètre de fraction de mer du vent (W) est également évalué, défini comme étant le rapport de l'énergie de la partition sous l'influence directe du vent sur l'énergie totale de la partition. Ce paramètre permet en particulier de classer chaque partition comme une mer du vent ($W = 1$), une houle pure ($W = 0$), ou une mer complexe.

$$W = \frac{E|U_p > c}{E} \quad (2)$$

La définition de ce paramètre repose sur l'hypothèse que les vagues se propageant avec une vitesse de phase inférieure à la vitesse du vent sont directement forcées par ce dernier. La vitesse de séparation houle-mer du vent U_p est considérée comme la projection de la vitesse du vent dans la direction de propagation des vagues, multipliée par un coefficient, identifié comme un facteur d'âge des vagues β .

$$U_p = \beta U_{10} \cos(\theta - \theta_w) \quad (3)$$

Dans la base de données sont sauvegardés à chaque pas de temps les paramètres associés à un ensemble pouvant aller jusqu'à six systèmes de vagues simultanés ; une mer du vent et cinq houles.

La figure 3 met en évidence le résultat d'un tel partitionnement sur l'ensemble du domaine de calcul à un instant donné. Les deux cartes du haut présentent la vitesse du vent et la hauteur significative totale respectivement. La carte du bas à gauche présente la contribution de la mer du vent à la hauteur significative totale (phs0) et la carte du bas à droite présente la contribution de la houle principale (phs1). On note en particulier la prédominance de la mer du vent au centre du Golfe de Gascogne, dans la zone où souffle le vent ainsi que sa présence en Manche et dans le sud de la mer du nord. En revanche, la zone du sud du Golfe de Gascogne où le vent souffle à des vitesses inférieures à environ 7 m/s est dominée par des conditions de houle seule.

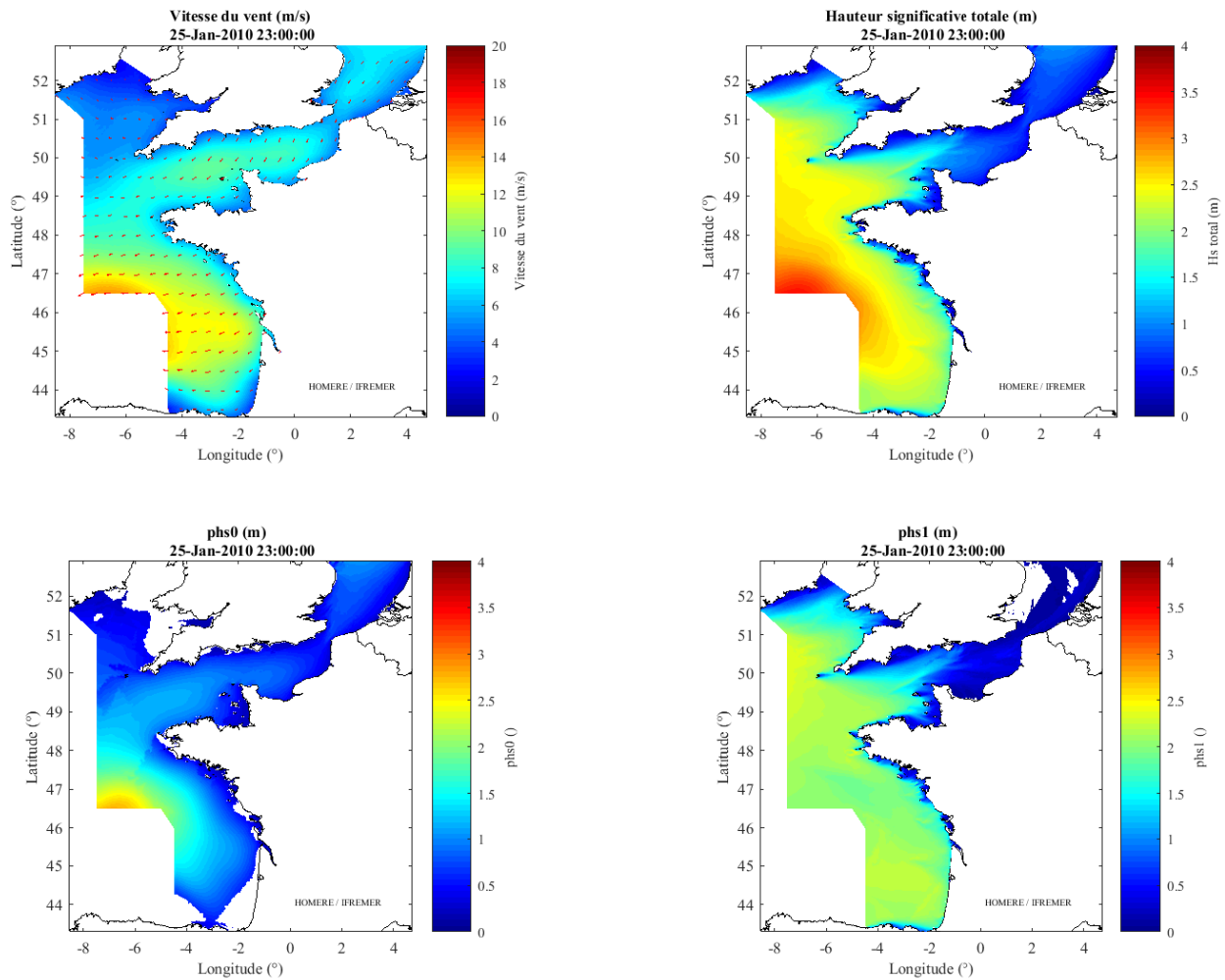


Figure 3: Exemple d'identification des systèmes de vagues sur l'ensemble du domaine

On présente figure 4 l'évolution des paramètres des systèmes de vagues issus du partitionnement en un point du domaine sur la période du 7 au 20 Janvier 2010. Les hauteurs significatives des partitions sont tracées sur la figure du haut où est également tracée la hauteur significative totale. Il est vérifié sur l'ensemble du domaine que l'énergie totale au sein de l'état de mer est conservée après partitionnement $\left(RMSE \left(H_{s\ total} , \sqrt{\sum_{i=1}^{i=6} H_{s\ i}^2} \right) < 10^{-4} \right)$.

Le tracé des périodes de pic fait apparaître des discontinuités associées à des sauts de valeur comme par exemple au cours de la journée du 10 Janvier durant laquelle la période de pic de la houle secondaire T_{p2} à environ 7 s prend la valeur de la houle primaire T_{p1} à environ 13 s durant quelques heures avant de redescendre à une valeur plus courte. Ces discontinuités dans le suivi des systèmes de vagues sont liées à la classification des houles, ordonnées à chaque instant par hauteur significative décroissante, la houle primaire étant toujours celle ayant la plus grande hauteur significative. Cette classification ne permet donc pas de suivre correctement l'évolution en temps des différents systèmes de houles ou évènements.

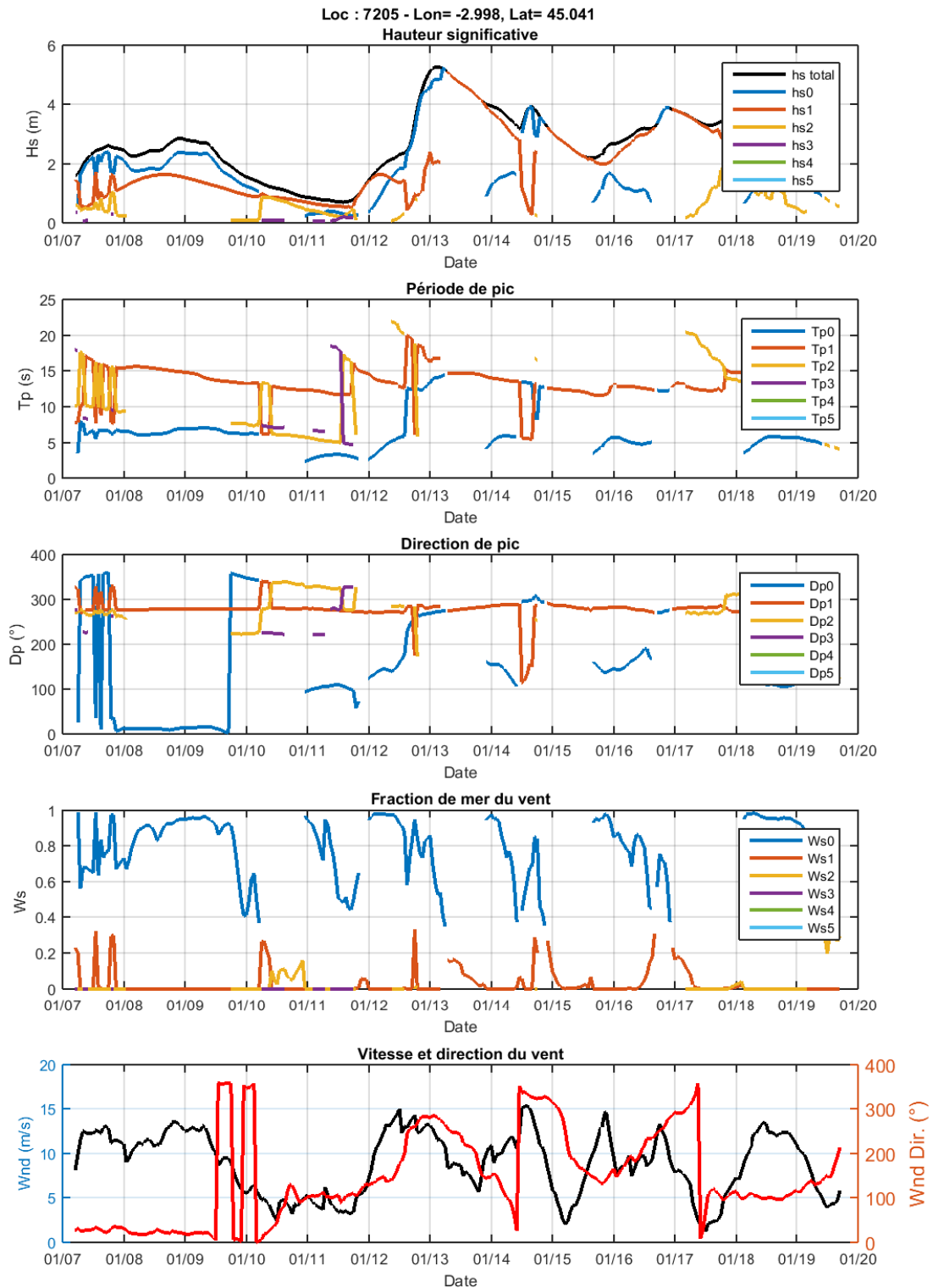


Figure 4: Paramètres associés aux systèmes de vagues en un point donné sur la période du 7 au 20 Janvier 2010

Le tracé du coefficient de fraction de mer du vent (W_s) permet de différencier les évolutions des houles et des mers du vent. Les houles ont un coefficient de fraction proche de zéro excepté dans les conditions pour lesquelles leur direction de pic se rapproche de la direction de propagation du vent et où le coefficient peut alors atteindre des valeurs de l'ordre de 30%. Les valeurs du coefficient de fraction associées aux mers de vent sont quant à elles proches de un en début d'événement et tendent à décroître au fil du temps, jusqu'à atteindre des valeurs relativement basses, de l'ordre de 38%, en particulier lorsque la direction du vent évolue. On peut noter que la valeur de ce seuil bas du

coefficient de fraction W va dépendre de la valeur retenue pour le facteur d'âge de vague β . On observe par ailleurs des cas, comme par exemple le 16 Janvier entre 17h00 et 22h00 où le partitionnement conduit à imposer un critère de mer de vent avec un coefficient de fraction relativement élevé (compris ici entre 0.75 et 0.37) à un système qui compte tenu de sa période et de sa direction est en fait un train de houles déjà préexistant.

On le voit donc, du fait du choix de classification des houles par énergie décroissante et de la définition du coefficient de fraction de mer du vent, les données de partitionnement ainsi sauvegardées ne permettent pas toujours de correctement suivre les systèmes de vagues ou événements dans le temps (ceci pourrait être amélioré par l'application de méthodes de suivi temporel [9] ou de suivi spatio-temporel [5], [6]). Néanmoins, la méthode appliquée permet d'identifier l'existence à chaque instant des systèmes de vagues présents et le jeu de données disponible permet d'établir des statistiques d'occurrence des états de mer en différenciant les conditions unimodales (houle seule ou mer du vent seule) des conditions multimodales (superposition de plusieurs systèmes de vagues).

IV - Cartographie des occurrences d'états de mer complexes

IV – 1 Cartographie

On s'intéresse dans un premier temps à l'évaluation de la distribution spatiale des occurrences d'états de mer complexes sur la zone de la Manche et du Golfe de Gascogne couverte par la base de données HOMERE (figure 2). Les statistiques d'occurrence des différents systèmes de vagues sont obtenues à partir des données de partitionnement disponibles dans la base de données et en particulier à partir des données de hauteur significative, prises sur la période de dix années comprise entre le 1^{er} Janvier 2003 et le 31 Décembre 2012.

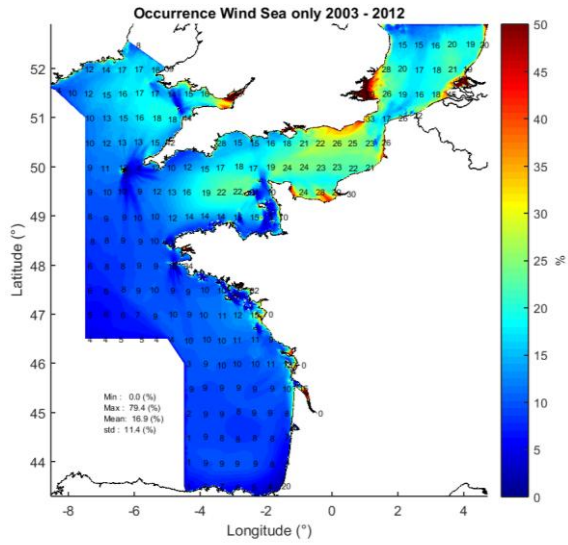
Les cartes de pourcentage d'occurrence des différentes conditions d'états de mer, unimodales et multimodales sont présentées figure 5.

Les conditions unimodales correspondant à la présence d'une seule mer du vent (figure 5a) sont relativement limitées, en moyenne 16% du temps sur l'ensemble du domaine mais avec une nette distinction entre le Golfe de Gascogne où l'occurrence n'est que de l'ordre de 10% et la Manche, en particulier la zone Manche Est où l'on observe des mers du vent seules environ 25% du temps. Ceci en partie du fait que les houles provenant de l'Atlantique sont pour une bonne part arrêtées par la presqu'île du Cotentin. Les maxima identifiés, supérieurs à 50% et jusqu'à 79% d'occurrence sont essentiellement observés dans les zones côtières où le fetch est limité comme en particulier les zones estuariennes.

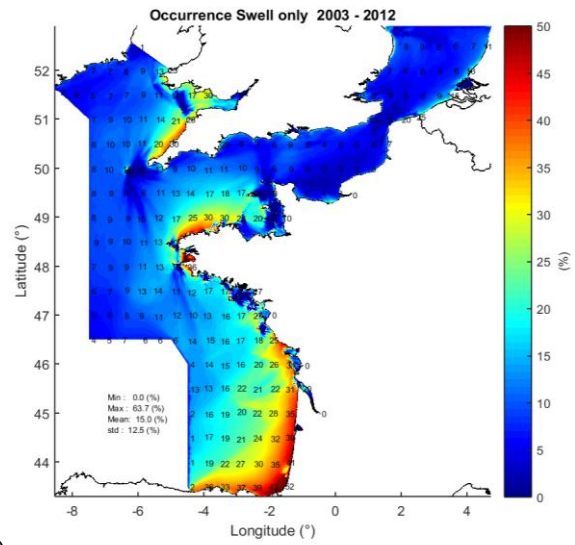
Les conditions unimodales correspondant à la présence d'une houle seule sont également relativement limitées (figure 5b), 15% du temps en moyenne sur l'ensemble du domaine avec là encore une forte variabilité spatiale. On n'observe en Manche Est où les houles de l'Atlantique ne peuvent que difficilement pénétrer que des occurrences inférieures à 10%. En revanche, dans le sud du Golfe de Gascogne, où se propagent les houles d'ouest à nord-ouest issues des tempêtes de l'Atlantique nord, on observe des taux de présence de houles seules supérieurs à 30% et dépassant les 50% dans le sud-est du Golfe. On note également un taux d'occurrence élevé, supérieur à 30% de ces événements de houle le long des côtes nord de la Bretagne. Celui-ci est attribué à l'effet de masquage de la pointe Bretagne limitant la propagation en Manche Ouest, des fréquents systèmes de vague (mer du vent) de sud-ouest prenant naissance en Atlantique dans le nord du Golfe de Gascogne.

Les conditions multimodales sont regroupées en quatre conditions d'états de mer distinctes correspondant à la superposition d'une houle et d'une mer du vent, à la superposition de 2 houles, à la superposition de 2 houles et d'une mer du vent et enfin aux conditions pour lesquelles au moins trois houles et jusqu'à cinq, sont présentes au sein de l'état de mer, avec ou sans mer de vent.

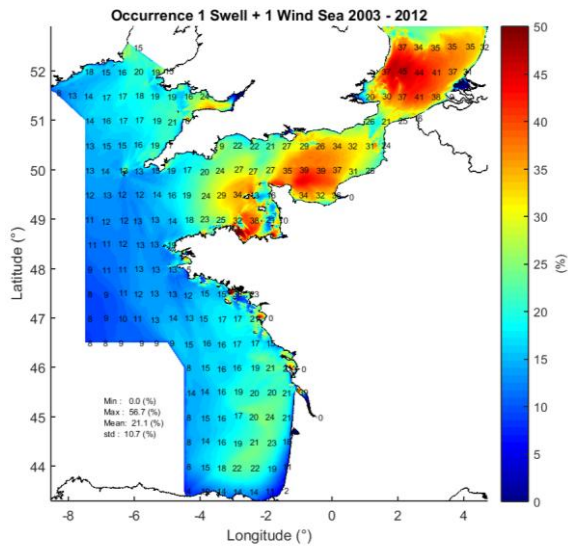
Les conditions pour lesquelles une houle se superpose à une mer du vent (figure 5c) restent sur l'ensemble du domaine les conditions les plus fréquentes, en moyenne 21 % du temps. Elles dominent cependant largement plus en Manche (25% à 45% d'occurrence). Elles apparaissent également fréquentes en zone côtière au nord de la Gironde.



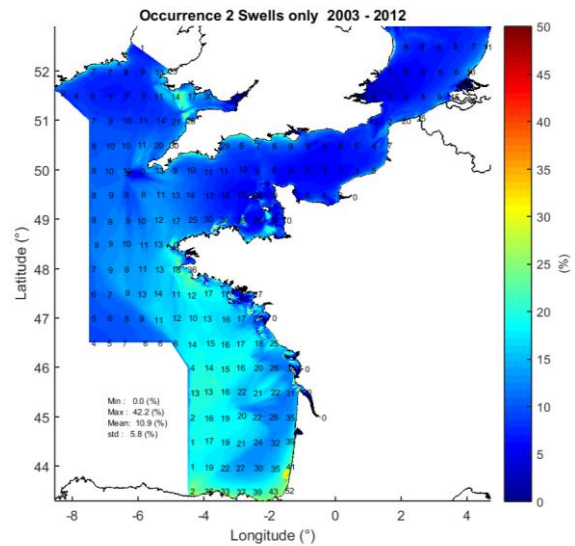
a)



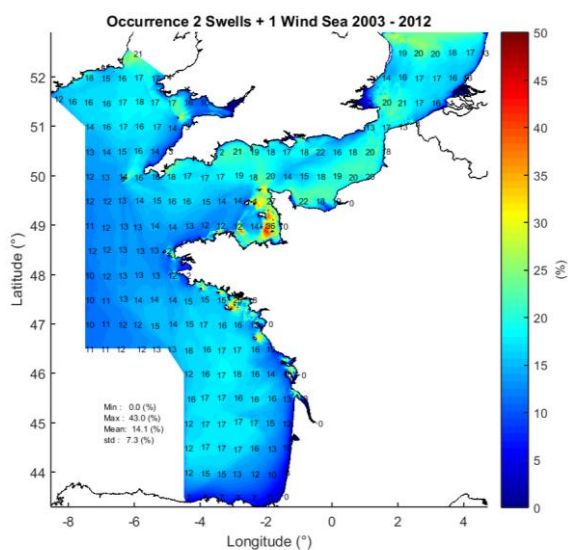
b)



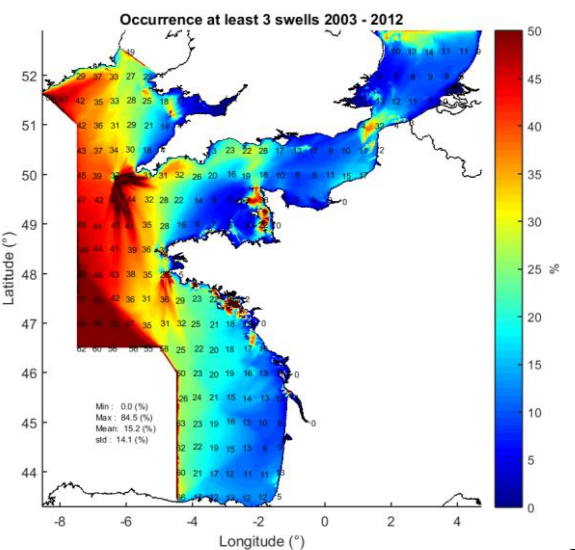
c)



d)



e)



f)

Figure 5: Occurrence des systèmes d'états de mer - Mer du vent seule, a), Houle seule b), Houle + Mer du vent, c), deux Houles, d), 2 Houles + Mer du vent e), Au moins trois Houles f).

Les conditions correspondant à la superposition de 2 houles uniquement (figure 5d) sont les moins fréquentes (10% d'occurrence en moyenne), excepté en zone côtière dans le sud-est du Golfe et le long des côtes espagnoles.

Les conditions plus complexes correspondant à la superposition de deux houles et une mer du vent (figure 5e) représentent en moyenne 14,1% des occurrences. Sensiblement plus au large dans le Golfe de Gascogne et en Manche Ouest. Néanmoins les zones où sont observées les plus fortes occurrences, entre 25% et 40% se situent essentiellement en zone côtière, autour des îles anglo-normandes et dans l'est des îles de la façade Atlantique. Une raison essentielle de cette localisation tient aux phénomènes de réfraction conduisant au contournement des îles par les trains de houle. Il convient de noter que les hauteurs significatives associées à ces événements sur ces sites sont généralement relativement modérées.

L'ensemble des autres conditions pour lesquelles sont identifiés des états de mer complexes sont rassemblées dans le dernier cas (figure 5f) pour lequel aux moins trois houles sont identifiées simultanément. De telles conditions apparaissent environ 15.2% du temps en moyenne sur l'ensemble du domaine. Des valeurs élevées supérieures à 45% sont observées au large dans l'ouest du domaine mais également dans les zones côtières en profondeur limitée, au voisinage des îles comme dans le cas précédent et dans des zones où règnent également des courants relativement importants comme le raz de Sein, le Raz Blanchard ou le cap Gris-Nez. Il convient de noter que pour de tels états de mer, l'énergie associée aux quatrième et cinquième systèmes de houle, lorsqu'ils existent, sont relativement limitées et les hauteurs significatives associées sont faibles.

IV – 2 Variabilité saisonnière

La climatologie d'états de mer du Golfe de Gascogne est caractérisée par une variabilité saisonnière relativement marquée. Il était donc intéressant d'étudier également la variabilité saisonnière d'occurrence des états de mer complexes. De fait des cartes des moyennes mensuelles d'occurrence sur dix ans ont été établies suivant la même classification que celle présentée au paragraphe précédent. Globalement, on retrouve sur ces moyennes mensuelles une distribution géographique d'occurrence des différents états de mer, unimodaux ou multimodaux, assez similaire à celle observée dans le cas de la moyenne totale et présentée figure 5. Les moyennes mensuelles évaluées sur l'ensemble du domaine pour chacun des types d'états de mer identifiés sont présentées sur le graphe de la figure 6.

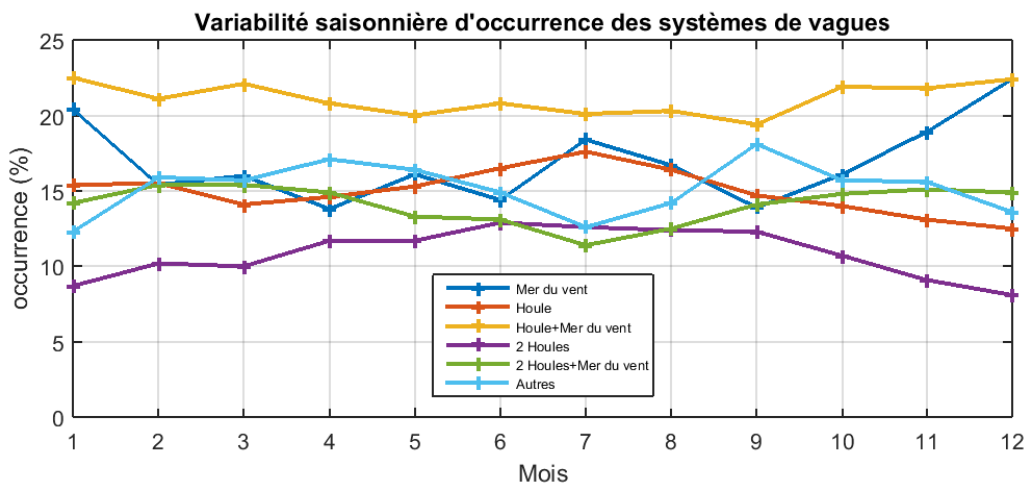


Figure 6: Variabilité saisonnière d'occurrence des systèmes de vagues

On observe que les occurrences de mer du vent augmentent sur la période hivernale de Novembre à Janvier, atteignant jusqu'à 22%. Ceci est lié à l'augmentation du passage des phénomènes dépressionnaires sur le Golfe de Gascogne, sources le plus souvent de vents forts. Les conditions mixtes superposant une houle à une mer du vent, prédominant tout au long de l'année, augmentent

également sur cette période jusqu'à également 22% environ alors que les conditions de houle seule ont tendance à sensiblement diminuer, tout comme les états de mer constitués de deux houles.

Durant la période estivale en revanche, on observe une augmentation d'occurrence des états de mer unimodaux (houle ou mer du vent) et plus particulièrement au mois de juillet où le cumul conduit à 36% d'évènements unimodaux avec, en parallèle une diminution notable des états de mer complexes constitués d'au moins trois systèmes de vagues.

V - Analyse locale

En complément à la description cartographique de la distribution des conditions d'états de mer sur le domaine Manche - Golfe de Gascogne présentée au chapitre précédent, il est intéressant de comparer cette distribution de manière quantitative en différents points représentatifs des différentes zones du domaine.

Quatre points de contrôle ont donc été retenus dont les coordonnées sont rassemblées dans le tableau 1. Les points H1 et H2 se trouvent sur la façade atlantique, les points H3 et H4 en Manche Ouest et Manche Est respectivement, en zone côtière.

L'histogramme de la figure 7 permet de comparer les pourcentages d'occurrence des différents types d'états de mer sur les quatre sites.

Le site H1, à la pointe de Bretagne apparaît largement dominé par des conditions multimodales, à plus de 81%, avec en particulier des conditions complexes avec au moins trois systèmes de vagues 48.76% du temps. La distribution au point H3 situé en Manche Ouest est également dominée par des conditions multimodales à 83% mais avec cette fois environ 45% de conditions bimodales. Le point H4, en Manche Est fait également l'objet d'une climatologie multimodale environ les trois-quarts du temps (73.2%) et des conditions unimodales dominées par des conditions de mer du vent seule (21.57%).

Enfin, le point H2 situé dans le sud-est du golfe de Gascogne fait apparaître une climatologie sensiblement différente. Les conditions multimodales n'y prévalent que légèrement (53.3%) et les conditions unimodales sont largement dominées par des états de mer constitués d'une houle seule (41.94%). Les conditions multimodales y sont dominées par la superposition de deux houles (22.39%). On retrouve ici la climatologie identifiée sur les cartes pour la zone sud-est du golfe de Gascogne.

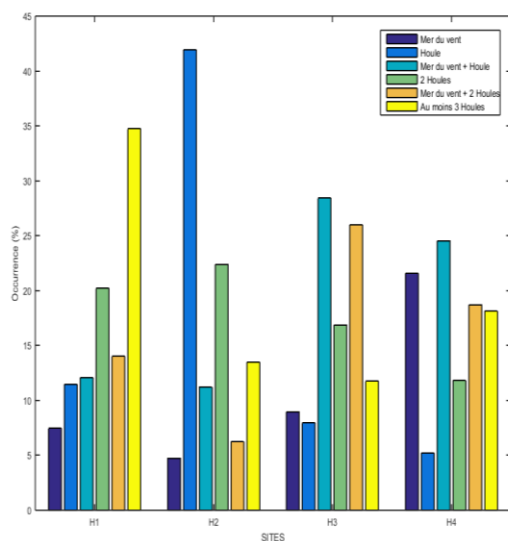


Figure 7: Histogramme des occurrences de systèmes de vagues aux points de contrôle

Site	H1	H2	H3	H4
Mer du vent (%)	7.46	4.75	8.98	21.57
Houle (%)	11.48	41.94	7.96	5.21
Unimodal(%)	18.94	46.69	16.94	26.78
Mer du vent + 1 Houle (%)	12.08	11.19	28.42	24.54
2 Houles (%)	20.22	22.39	16.89	11.82
Mer du vent + 2 Houles (%)	14.02	6.23	26.01	18.71
Au moins 3 Houles (%)	34.74	13.48	11.75	18.13
Multimodal(%)	81.06	53.31	83.06	73.20

Tableau 2: Occurrence de systèmes de vagues aux points de contrôle

VI - Conclusions

La présente étude avait pour objectif de quantifier les occurrences d'états de mer complexes superpositions de différents systèmes de vagues, houle et mer du vent et d'en caractériser la variabilité spatiale et temporelle, sur la zone de la Manche et du Golfe de Gascogne. L'étude se base en particulier sur des cartographies établies à partir des données de partitionnement issues de la base de données HOMERE. Elle permet de montrer que des conditions d'états de mer unimodaux n'apparaissent qu'environ 32% du temps en moyenne sur l'ensemble du domaine mais que des variations marquées des distributions sont observées. On retrouve en particulier en Manche des conditions associées à des occurrences nombreuses de mer du vent relativement au sud-est du Golfe de Gascogne où les conditions de houle unimodale prédominent.

Ces résultats confortent l'idée qu'il est important, afin d'évaluer correctement la réponse d'une structure soumise à l'action des vagues, de caractériser correctement le contenu fréquentiel associé au caractère complexe des états de mer en utilisant des densités spectrales réalistes plutôt que des formes de spectres analytiques unimodaux.

Références :

[1] Barrett S., Holmes B., Lewis T., (2008) Monitoring of Seaway Variability on WEC Performance, *Proc. 2nd International Conference on Ocean Energy (ICOE 2008), 15th – 17th October 2008, Brest, France*

[2] Benoit M, Frigaard P, Schäffer A. Analysing multidirectional wave spectra: a tentative classification of available methods. *In: Proc 27th IAHR congress, seminar on multidirectional waves and their interaction with structures.* 1997. p. 131–58.

[3] Boudiere Edwige, Maisondieu Christophe, Arduin Fabrice, Accensi Mickael, Pineau-Guillou Lucia, Lepesqueur Jeremy (2013). A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters. *International Journal of Marine Energy*, 3-4, e40-e52. <http://doi.org/10.1016/j.ijome.2013.11.010>

[4] Boukhanovsky A. V., Lopatoukhin L. J., Guedes Soares C., Spectral wave climate of the North Sea, *Applied Ocean Research* 29 (2007) 146–154

[5] Devaliere, E. M., J. L. Hanson and R. Luettich, 2009: Spatial tracking of numerical wave model output using a spiral tracking search algorithm. In *Proc. 2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, Los Angeles, CA*, Vol. 2, pp. 404–408.

[6] Hanson, J.L. and O.M. Phillips, (2001), Automated Analysis of Ocean Surface Directional Wave Spectra, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 18, Issue 2 (February 2001), pp. 277–293. Full text available: <http://ams.allenpress.com/archive/1520-0426/18/2/pdf/i1520-0426-18-2-277.pdf>

[7] Hasselmann K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Miller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell, and H. Walden. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) *Erganzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe, A(8) (Nr. 12)*, p.95, 1973.

[8] Kerbirou Marie-Aurelie, Prevosto Marc, Maisondieu Christophe, Clément Alain, Babarit Aurélien (2007). Influence of Sea-States Description on Wave Energy Production Assessment. EWTEC 2007, *7th European Wave and Tidal Energy Conference*, 11 - 14 Sept., Porto, Portugal, 2007.

- [9] Kpogo-Nuwoklo Komlan, Olagnon Michel, Guede Zakoua (2014). Wave spectra partitioning and identification of wind sea and swell events. *Proc. 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE 2014*, June 8-13, 2014, San Francisco, USA.
- [10] Krogstad HE, Barstow SF, Haug O, Peters DJH. Directional distributions in wave spectra. In: *Proc Int Conf on Ocean Wave Measmts and Anal (WAVES'97)*, vol. 2. 1997. p. 883–95.
- [11] Lazure P., Dumas F., "An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS)," *Advances In Water Resources*, 31(2), 233-250, 2008.
- [12] Maisondieu Christophe, Le boulluec Marc (2016), Benefits of using a spectral hindcast database for wave power extraction assessment. *The International Journal of Ocean and Climate Systems*. Publisher's official version : <http://doi.org/10.1177/1759313116649967> , Open Access version : <http://archimer.ifremer.fr/doc/00347/45799/>
- [13] Pierson, W. J. and L. Moskowitz, 1964: A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. *J. Geophys. Res.*, 69, 5,181–5,190
- [14] Roland A., Ardhuin F. (2014). On the developments of spectral wave models: numerics and parameterizations for the coastal ocean. *Ocean Dynamics*, 64(6), 833-846. <http://doi.org/10.1007/s10236-014-0711-z>
- [15] Saha S. et al, "The NCEP Climate Forecast System Reanalysis," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol 91, 1015-1057, 2010
- [16] Saulnier Jean Baptiste, Prevosto Marc, Maisondieu Christophe (2011). Refinements of sea state statistics for marine renewables: A case study from simultaneous buoy measurements in Portugal. *Renewable Energy*, 36(11), 2853-2865. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2011.04.015>
- [17] Saulnier Jean-Baptiste, Clement Alain, Falcao Antonio F. De O., Pontes Teresa, Prevosto Marc, Ricci Pierpaolo (2011). Wave groupiness and spectral bandwidth as relevant parameters for the performance assessment of wave energy converters. *Ocean Engineering*, 38(1), 130-147. <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.10.002>
- [18] Tolman Hendrik L. et al., (2014) User manual and system documentation of WAVEWATCH III® version 4.18, March 2014
- [19] Tracy, B., E.-M. Devaliere, T. Nicolini, H. L. Tolman and J. L. Hanson, 2007: Wind sea and swell delineation for numerical wave modeling. *Proc. 10th international workshop on wave hindcasting and forecasting & coastal hazards symposium, JCOMM Tech. Rep. 41, WMO/TD-No. 1442.*