



EMR Dunkerque
Dossier « Etat de connaissance initiale »
Volet technique Houle
Lot 1 – référence T1.H

Référence : convention SHOM/MEEM [DGEC], SHOM n°51/2016, relative à la réalisation des études de reconnaissance environnementale de la zone d’implantation d’éoliennes en mer au large de Dunkerque

1. Introduction

Le rapport initial sur les statistiques d'état de mer qui est présenté ici s'appuie sur la base de données HOMERE. Cette base de données considère la modélisation de la côte atlantique française à haute résolution. L'ensemble des statistiques présenté ici est donc calculé à l'aide des résultats de modèle numérique de 1994 à 2012 et non de données *in situ*. Ce rapport décrit dans un premier temps succinctement la configuration du modèle utilisée pour les simulations d'état de mer ainsi que les données de forçages et sa validation. Les détails sur le modèle et sa paramétrisation ainsi que les caractéristiques de la base de données sont disponibles dans le « manuel de l'utilisateur de la base de données HOMERE » [1]. Dans un deuxième temps, les statistiques d'états de mers calculées sur cette base de données seront présentées pour la zone EMR de Dunkerque.

[1] http://www.previmer.org/content/download/9626/50964/file/HOMERE_NGUG-v3_notice_v1_Publique.pdf

2. La base de données HOMERE

2.1 Description du modèle et des paramétrisations physiques

La base de données HOMERE [Boudiere et al., 2013] a été réalisée avec le modèle numérique d'états de mer WAVEWATCHIII® dans sa version 4.09. Cette base de données, spécialement réalisée pour les EMR, correspond au démonstrateur pré-opérationnel PREVIMER rejoué de 1994 à 2012.

WaveWatchIII® [Tolman, 2009] est un modèle spectral de simulation d'états de mer de troisième génération basé sur l'équation de conservation de la densité d'action de la houle [Gelci et al. 1957]. Le schéma de propagation utilisé dans cette configuration est un schéma de propagation explicite au premier ordre pour les grilles non-structurées [Roland, 2008; Roland, 2009].

Les spectres directionnels sont discrétisés sur 24 directions, soient des secteurs angulaires de 15° et sur 32 fréquences réparties suivant une loi logarithmique de 0.0373 Hz à 0.7159 Hz, soient des périodes comprises entre 1.4 et 26,8 secondes.

Le paramétrage physique utilisé pour la génération et la dissipation des vagues [Ardhuin et al., 2009; Ardhuin et al., 2010] est celui développé lors du projet de recherche IOWAGA (Integrated Ocean WAVes for Geophysical and other Applications) et testé en mode pré-opérationnel dans le cadre du démonstrateur PREVIMER [Lecornu, 2008]. Cette paramétrisation propose notamment une dissipation différenciée de la houle et de la mer de vent. En effet, le déferlement est le principal processus de dissipation de la mer de vent, alors que la houle s'atténue par frottement avec l'air. Cette paramétrisation a montré une nette amélioration des résultats obtenus [Ardhuin et al., 2010]. Les interactions non-linéaires des vagues sont modélisées par la méthode DIA (Discrete Interaction Approximation) [Hasselmann, 1985]. Le paramétrage des termes de dissipation par frottement sur le fond intègre la prise en compte de la granulométrie du fond. Pour les fonds sableux, la paramétrisation a été construite à partir du modèle de prédiction de rugosité des rides de Grant et Madsen [Grant, 1982], étendu aux spectres de vague [Madsen, 1988] en s'appuyant sur le modèle de Wilson [Wilson, 1989]. Une forme adaptée de l'algorithme de Tolman [Tolman 1995] a été intégrée au modèle pour une meilleure prise en compte de la génération de rides et de la rugosité des rides reliques, grâce à une paramétrisation sous grille qui attribue à chaque maille une fraction de la couverture de rides [Ardhuin, 2003], et qui s'applique à une granulométrie plus étendue.

2.2 Description de la bathymétrie et de la grille de calcul

Une bathymétrie de haute résolution a été utilisée pour créer le maillage du modèle. Cette bathymétrie s'étend du Sud de la mer du Nord à l'ensemble du plateau continental du Golfe de Gascogne (voir Fig. 1), grâce à l'association de données provenant du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) pour le trait de côte et des campagnes de mesures menées par l'IFREMER et le SHOM pour l'ensemble du domaine (MNT 100m et 500m [Loubrieu, 2008]).

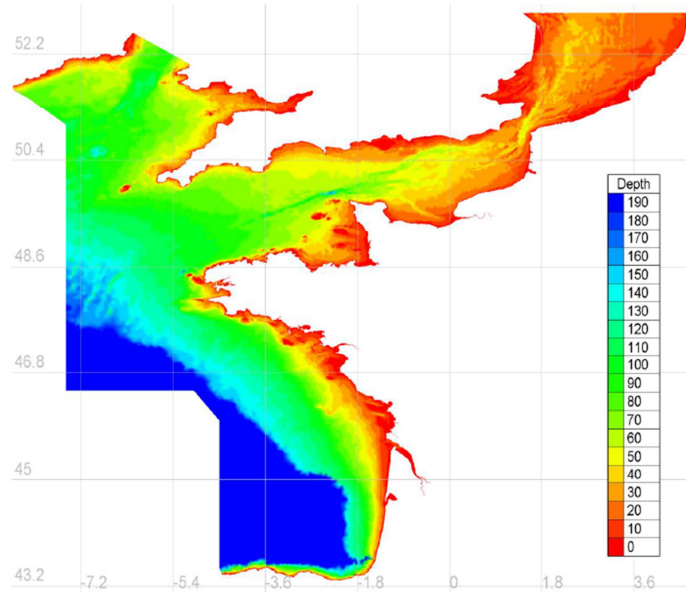


Figure 1 : Bathymétrie utilisée pour les rejeux HOMERE. Figure extraire du « manuel de l'utilisateur de la base de données HOMERE ».

Le maillage non-structuré utilisé a une résolution de 10km au large, au niveau des frontières ouvertes du modèle, et propose un raffinement de la grille de calcul vers la côte pour atteindre environ 200m au niveau du trait de côte. Les critères de raffinement ont été définis en fonction des variations bathymétriques et de la vitesse de propagation (condition de stabilité CFL). Le maillage est composé de plus de 110 000 nœuds de calcul couvrant le domaine allant du Sud de la mer du Nord jusqu'au Golfe de Gascogne (voir Fig. 2). La zone EMR Dunkerque comporte quant à elle 248 nœuds de calcul. Les statistiques présentées dans ce rapport correspondent à l'extraction des séries temporelles de 1994 à 2012 sur ces points de maillage.

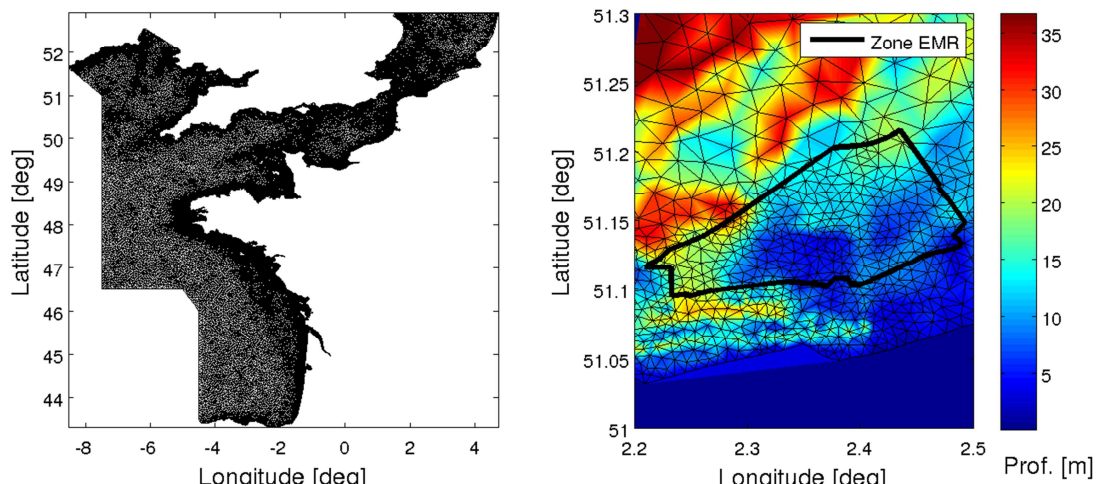


Figure 2 : A gauche : Maillage non-structuré utilisé pour le rejeu HOMERE. A droite : Zoom sur la zone EMR de Dunkerque, les couleurs représentent la profondeur par rapport au niveau moyen.

Cependant, la bathymétrie qui a été utilisée pour mettre en place le maillage ne correspond pas à la carte nautique tel que le montre la figure 3. Cela implique que l'analyse spatiale des cartes de paramètres moyens de vagues ne pourra pas être faite dans ce rapport. Cependant, la gamme de profondeurs et des pentes de la bathymétrie du modèle est en adéquation avec les profondeurs et les pentes observables sur les documents nautiques. Une analyse statistique des hauteurs peut donc être faite et sera discutée dans ce rapport. Cependant, le lecteur devra garder en mémoire que ces erreurs de bathymétrie ont des impacts possiblement non négligeables sur les statistiques qui seront présentées.

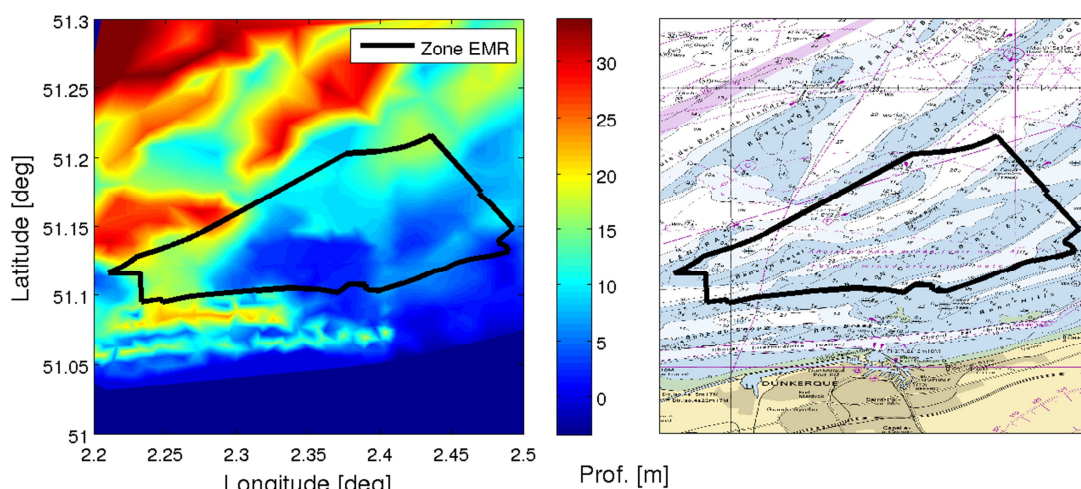


Figure 3 : A gauche : Bathymétrie telle que prise en compte par le modèle (ici les profondeurs ont été rapportées au Zéro Hydrographique). A droite : la carte nautique de la même zone (les valeurs indiquées sur la carte sont également par rapport au Zéro Hydrographique)

Le forçage aux limites ouvertes du maillage est réalisé par implémentation des spectres directionnels issus des simulations du modèle global IOWAGA sur les frontières ouvertes du domaine, avec un pas de temps de 1 heure (voir figure 4). 31 points de ce modèle global ont été utilisés.

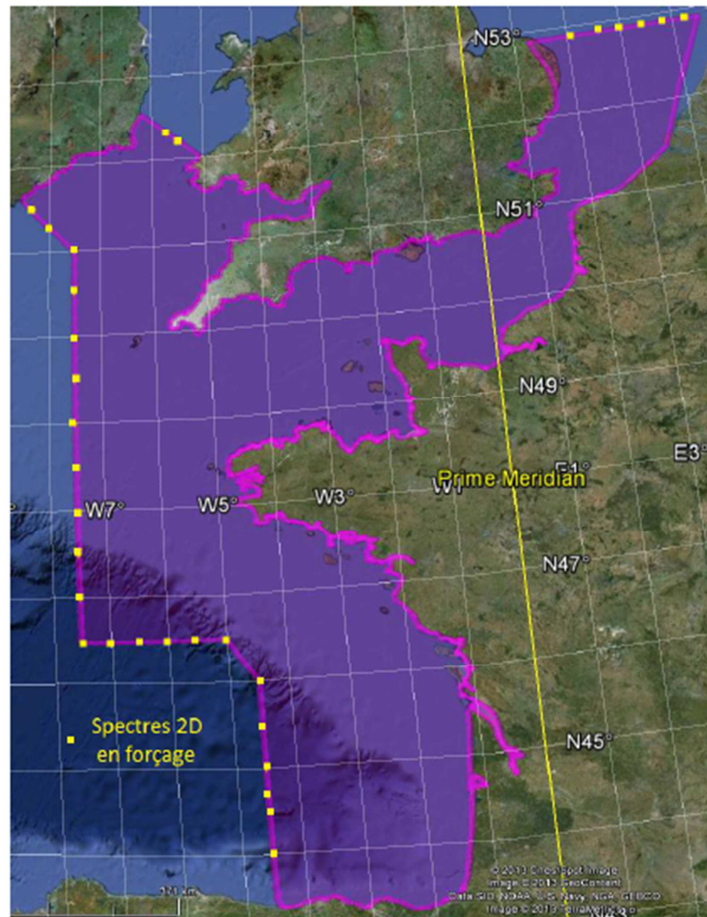


Figure 4 : Point de forçage aux limites ouvertes du modèle. Figure extraire du « manuel de l'utilisateur de la base de données HOMERE ».

Les champs de vents utilisés comme données de forçage du modèle sont issus des réanalyses CFSR (Climate Forecast System Reanalysis, [Saha, 2010]) réalisées en 2010 par le NCEP (National Center for Environmental Prediction). Ces champs de vents ont été ré-analysés sur la période 1979-2009. Leur résolution spatiale varie de 0.25° au niveau de l'équateur jusque 0.5° pour les plus hautes latitudes. Le modèle de vagues est forcé par les vents avec un pas de temps de 6 heures.

Le forçage des courants et des hauteurs d'eau dans le modèle de vagues a été réalisé à partir de composantes harmoniques de marée. Ces courants et hauteurs d'eau ne prennent donc en compte que la marée et non les surcotes dues aux effets de baromètre inverse ou dues au vent. L'atlas d'harmoniques a été calculé à partir des résultats de modélisation numérique réalisés sur l'année 2008, à l'aide du code hydrodynamique MARS 2D (Model for Applications at Regional Scale), développé par l'IFREMER [Lazure & Dumas, 2008] et basé sur les équations en eau peu profonde de hauteurs d'eau et de courants. Le code MARS a été mis en place avec 3 niveaux d'emboîtement (voir Fig. 5) : rang 0, rang 1 et rang 2, dont la résolution diffère suivant le rang, soient respectivement des résolutions horizontales de 2000m, 700m et 250m pour les rangs 0, 1 et 2. Les courants et hauteurs d'eau ont ensuite été interpolés en chaque nœud de calcul du modèle de vagues avec une période de 30 minutes pour l'ensemble de l'année 2008, en utilisant le modèle de plus haute résolution disponible au niveau de chaque nœud. L'atlas d'harmoniques a ensuite été créé à partir de ces séries temporelles. Les courants et niveaux d'eau ont ainsi pu être prédits pour la durée complète du rejeu (de 1994 à 2012) à partir de ces harmoniques.

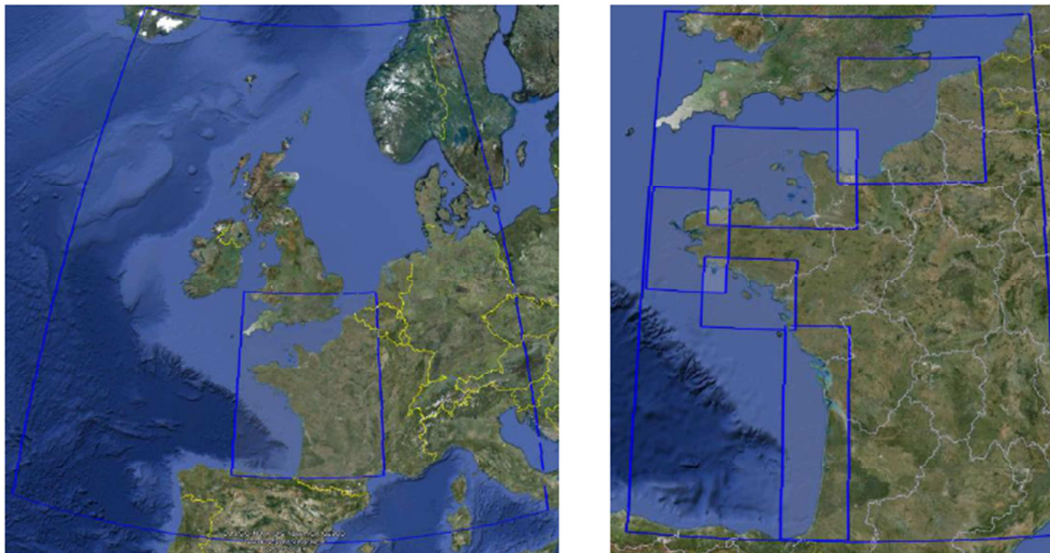


Figure 5 : Domaine des modèles emboîtés de calcul des courants et niveaux d'eau. Rangs 0 et 1 à gauche, rang 1 et rangs 2 à droite. Figure extraite du « manuel de l'utilisateur de la base de données HOMERE ».

2.3 Validation de la base de données

La réalisation de la base de données HOMERE s'est accompagnée d'une validation des résultats à l'aide de comparaisons avec les données *in situ* de bouées houlographes du réseau CANDHIS du CEREMA et les bouées de Météo-France le long de la côte française. D'autre part, une

comparaison des résultats du modèle avec les observations satellites a également été réalisée à l'aide des observations des missions altimétriques ERS1/2, JASON 1/2, ENVISAT, GFO, POSEIDON, TOPEX préalablement calibrées et corrigées [Queffeuilou, 2012]. Enfin, une inter-comparaison avec les résultats du modèle de la NOAA complète la validation du modèle. Les méthodes utilisées pour la validation sont détaillées dans le « manuel de l'utilisateur de la base de données HOMERE ». Les résultats de la validation donnés dans le manuel montrent globalement une bonne adéquation du modèle avec les observations.

Les observations les plus proches de la zone étudiée sont issues de la bouée houlographe du CEREMA « Ruytingen » qui se situe au large de la zone EMR de Dunkerque. La validation des hauteurs significatives au niveau de cette bouée pour l'année 2010 (période d'observation) révèle un biais de - 0,05 m, un indicateur de dispersion (erreur quadratique moyenne normalisée par l'observation) de 0,3m, une erreur quadratique moyenne centrée de 0,26m et globalement, un coefficient de corrélation entre les hauteurs significatives du modèle et les observations de la bouée de 0,88. Ces chiffres sont issus du manuel utilisateur de la base de données et sont satisfaisants. Cependant, cette bouée est située relativement loin de la zone EMR Dunkerque et se situe en eau profonde. Il est donc difficile d'extrapoler ces bonnes performances à la zone EMR Dunkerque.

Nous noterons l'absence d'observations à proximité de la zone EMR de Dunkerque. Par ailleurs, la comparaison directe aux observations de hauteur significative des vagues issues de l'altimétrie spatiale n'est pas significative à proximité de la côte. Il y a donc un manque de validation de la base de données au niveau de la zone due à l'absence d'observations *in situ*.

3. Statistiques de vagues sur la zone EMR Dunkerque

3.1 Les variables présentées dans le rapport

La hauteur significative des vagues est calculée à partir du spectre avec :

$$H_{\text{sig}} = \int_{f_{\text{min}}}^{f_{\text{max}}} \int_0^{2\pi} E(f, \theta) df d\theta$$

La période moyenne est calculée telle que :

$$Tm_{0,-1} = \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} f^{-1} E(f) df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} E(f) df}$$

La direction des vagues est calculée telle que :

$$dir = \arctan\left(\frac{a}{b}\right)$$

$$a = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \int_0^{2\pi} \cos(\theta) E(f, \theta) df d\theta$$

$$b = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \int_0^{2\pi} \sin(\theta) E(f, \theta) df d\theta$$

La convention utilisée pour les différentes directions est la convention nautique. La direction est la direction de provenance (voir Fig. 6).

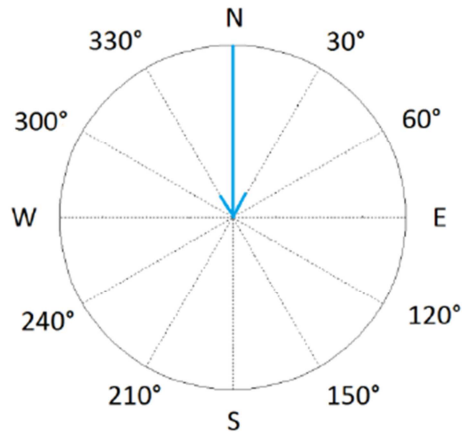


Figure 6 : Convention des directions pour les directions des paramètres globaux, vague de direction 0°. Figure extraire du « manuel de l'utilisateur de la base de données HOMERE ».

3.2 Statistiques des états de mer

Nous nous intéressons dans cette partie aux paramètres de vagues calculés tels que définis dans le paragraphe 3.1. Les séries temporelles de paramètres de vagues ont été extraits pour les 248 nœuds de calcul du modèle compris dans la zone EMR de Dunkerque pour la durée maximale disponible dans la base de données, soit du 1/1/1994 au 31/12/2012, avec un pas de temps d'une heure.

La figure 7 montre les séries temporelles pour chacun des points, colorés selon leur profondeur, autour de l'événement présentant la plus forte hauteur significative dans la zone, soit 3,6m. Comme le montre la figure, la hauteur significative modélisée est principalement dépendante de la profondeur, sans pour autant montrer une relation linéaire. En effet, la réduction de la profondeur entraîne d'une part un accroissement de la dissipation des vagues par frottement sur le fond, mais également le possible déferlement des vagues les plus importantes par petit fond. Cependant, l'effet de la réfraction des vagues qui consiste en un enroulement des vagues autour des profondeurs les plus faibles, est potentiellement fort sur la zone, puisque celle-ci présente une bathymétrie avec des variations très marquées dans le modèle. Ainsi, les vagues s'enroulant autour d'un haut fond vont se focaliser derrière celui-ci et atteindre ainsi des hauteurs significatives localement bien plus importantes. Les effets spatiaux dus à la réfraction ne sont pas discutés dans ce rapport initial, puisque la bathymétrie du modèle est différente de celle proposée par les cartes nautiques et qui est vraisemblablement beaucoup plus proche de la réalité actuelle. Cependant, la bathymétrie des cartes nautiques présentant des variations plus marquées que celle du modèle, ces effets sont attendus comme étant encore plus marqués en réalité que dans le modèle.

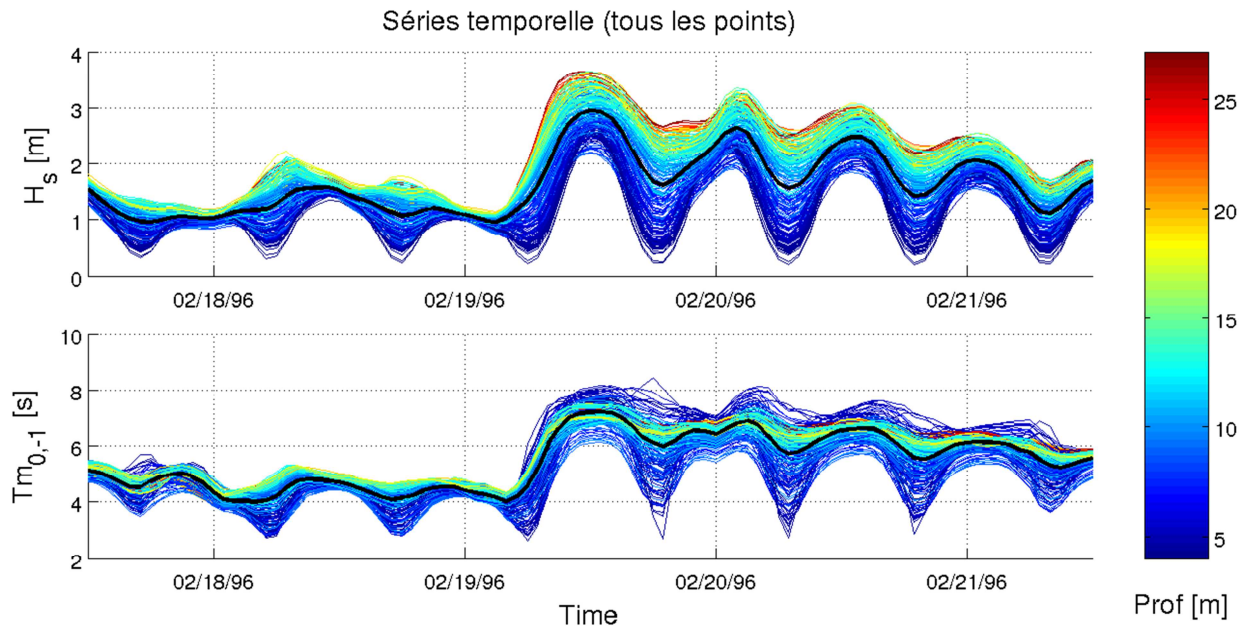


Figure 7 : Séries temporelles pour chacun des points de calcul dans la zone EMR Dunkerque, colorés selon leur profondeur, pour un évènement extrême observé en février 1996.

Pour la suite de l'étude deux points sont sélectionnés comme étant ceux avec la plus importante et la plus faible profondeur du modèle bathymétrique du modèle, soit respectivement le nœud de calcul « 91257 » avec une profondeur de 27.2m par rapport au niveau moyen et le point « 90864 » avec une profondeur de 4.0m par rapport au niveau moyen.

Les figures 8 et 9 montrent les fonctions de densité de probabilité (PDF) de **hauteurs significatives** pour chacun de ces points. Les hauteurs significatives les plus probables sont 0,46m et 0,38m respectivement pour le point le plus et le moins profond. Sur la série temporelle étudiée, les hauteurs significatives maximum modélisées sont 3.63m et 2.42m, les valeurs moyennes sont 0.75m et 0.51m, les valeurs médianes sont 0.65m et 0,46m et les 90ème percentiles sont 1.39m et 0.89m et les 99ème percentiles sont 2.23m et 1,37m respectivement pour le point le plus et le moins profond.

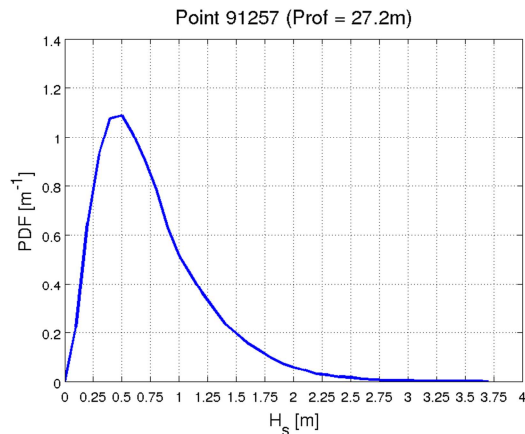


Figure 8 : Fonction de densité de probabilité de hauteurs significatives pour le point le plus profond de la zone EMR.

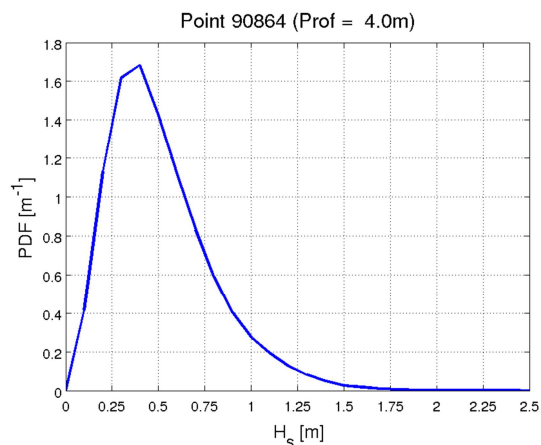


Figure 9: Fonction de densité de probabilité de hauteurs significatives pour le point le moins profond de la zone EMR.

Les figures 10 et 11 montrent les fonctions de densité de probabilité des **périodes moyennes** pour chacun de ces points. Les périodes moyennes les plus probables sont 4.5s et 4.2s respectivement pour le point le plus et le moins profond. Sur la série temporelle étudiée, les périodes moyennes maximum modélisées sont 14,6s et 15,3s, les valeurs moyennes sont 4,9s et 4,9s, les valeurs médianes sont 4,7s et 4,7s et les 90ème percentiles sont 6,4s et 7,0s et les 99ème percentiles sont 8,2s et 9,2s respectivement pour le point le plus et le moins profond.

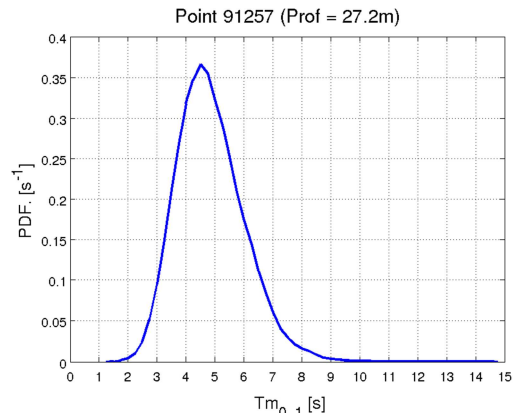


Figure 10: Fonction de densité de probabilité de périodes moyennes pour le point le plus profond de la zone EMR.

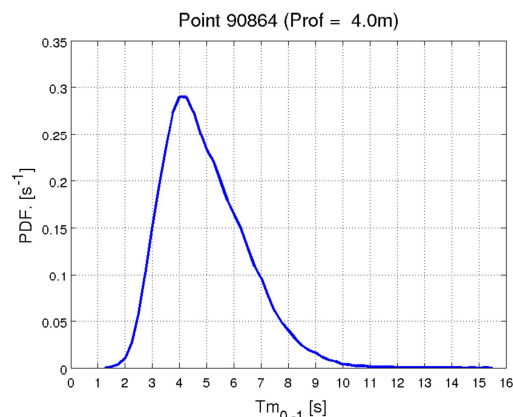


Figure 11 : Fonction de densité de probabilité de périodes moyennes pour le point le moins profond de la zone EMR.

Les figures 12 et 13 montrent les fonctions de densité de probabilité des **directions des vagues** pour chacun de ces points. Les fonctions de densité de probabilité montrent clairement pour chacun des points deux pics qui correspondent aux directions de provenance des vagues du Nord et de l'Ouest avec des probabilités légèrement supérieures pour les vagues provenant de Nord. Bien que les vents soient généralement plus Ouest sur la zone, la présence de la Grande Bretagne limite le fetch et donc la croissance des vagues sous les régimes de vent d'ouest. En revanche, le fetch est plus important pour les vagues venant du nord, et donc ces vagues sont susceptibles d'être plus développées. Cependant, en zone côtière, les effets dus à la réfraction des vagues sur la bathymétrie sont très influents sur la direction des vagues et la bathymétrie du modèle ne permet pas d'étudier les directions des vagues avec précision.

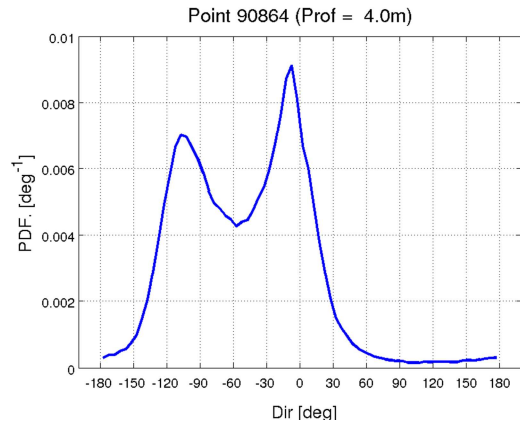


Figure 12 : Fonction de densité de probabilité de directions des vagues pour le point le moins profond de la zone EMR.

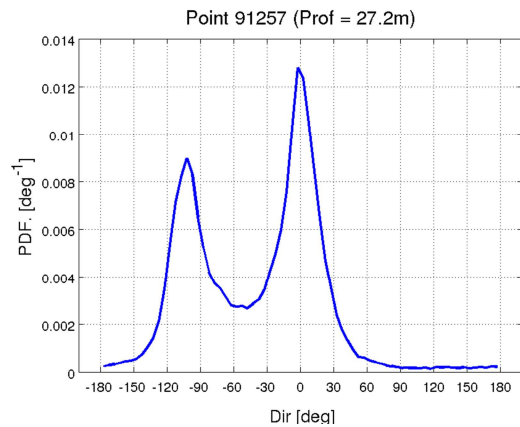


Figure 13 : Fonction de densité de probabilité de directions des vagues pour le point le plus profond de la zone EMR.

Enfin, les figures 14 et 15 présentent les corrélogrammes entre la hauteur significative des vagues et leur période moyenne, toujours sur ces deux mêmes points. Ces corrélogrammes montrent des états de mer généralement peu énergétiques, dans une gamme de fréquences correspondant à des mers de vents, dépassant rarement les 1,5m. Des houles résiduelles de longues périodes, mais très peu énergétiques ($H_s < 50\text{cm}$) peuvent cependant atteindre la zone.

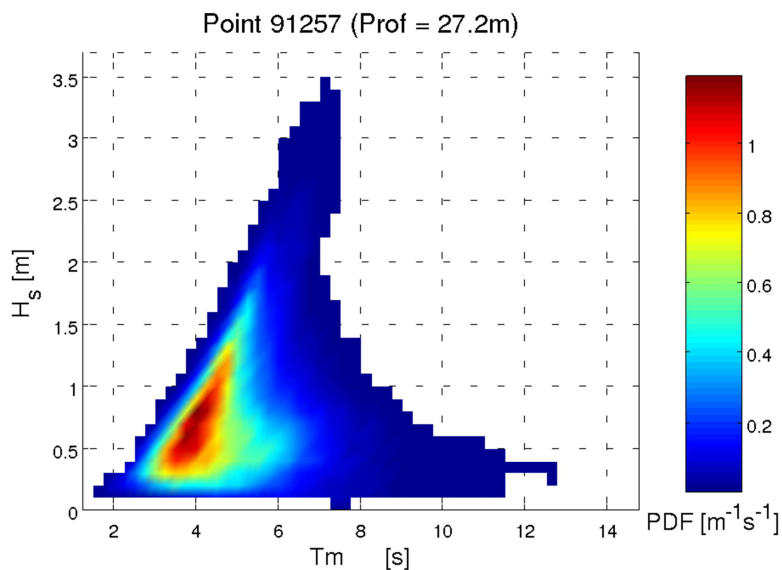


Figure 14 : Corrélogramme de la hauteur significative avec la période moyenne pour le point le plus profond de la zone EMR.

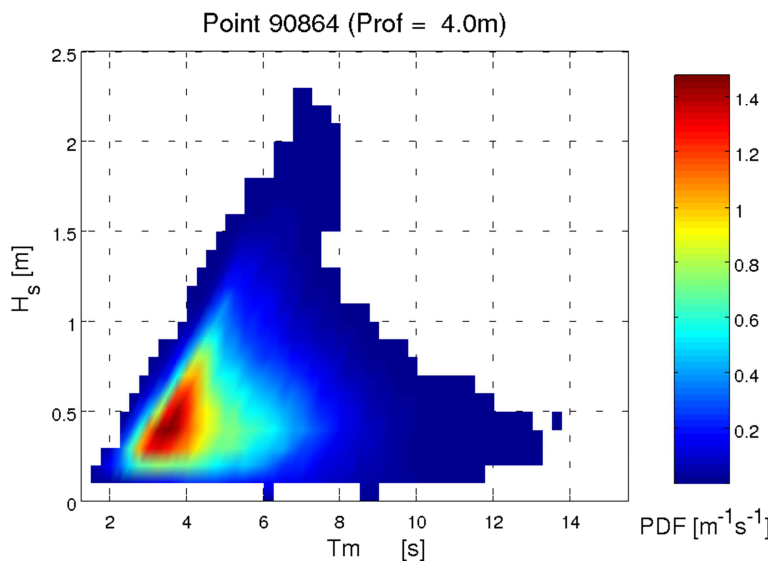


Figure 15 : Corrélogramme de la hauteur significative avec la période moyenne pour le point le moins profond de la zone EMR.

4. Conclusions

Le rapport présente les résultats d'une étude préliminaire de la zone EMR Dunkerque à partir de la connaissance pré-existante. Sur cette zone peu profonde, l'influence de la bathymétrie est très forte en raison des phénomènes de dissipation des vagues par frottement sur le fond et de réfraction des vagues autour de la bathymétrie, phénomènes qui ont un effet prépondérant sur les hauteurs significatives. La bathymétrie du modèle utilisé pour la réalisation de la base de données HOMERE souffre, sur la zone EMR Dunkerque, d'écarts significatifs avec la carte nautique de la zone. Un nouveau modèle [Michaud et al. 2015] développé dans le cadre du projet HOMONIM [Jourdan et al.] en partenariat avec Météo-France pour la Vigilance Vagues Submersion, intègre des levés bathymétriques de la zone plus récents et plus précis et propose donc une modélisation plus précise de la zone. Ce modèle permet donc une analyse plus fine des effets cités précédemment. De plus, les mouillages prévus au second semestre 2016 dans la zone EMR permettront d'obtenir des données d'observation pour une validation locale du modèle et ainsi permettront d'évaluer les performances du modèle pour une meilleure confiance dans les résultats et les statistiques qui en sont issues.

En attendant les résultats des simulations avec un modèle bathymétrique actualisé, l'analyse qualitative permet de conclure à une première caractérisation de la zone en termes d'état de mer avec une hauteur significative moyenne des vagues comprise entre 50 cm et 1m et un percentile 99% compris entre 1m et 3m ainsi qu'à une forte hétérogénéité spatiale des états de mer.

5. Bibliographie - références

Arduin, F, W. C. O'Reilly, T. H. C. Herbers, and P. F. Jessen (2003). - Swell transformation across the continental shelf. Part I: Attenuation and directional broadening. *J. Phys. Oceanogr.*, 33:1921–1939.

Arduin F., B. Chapron and F. Collard (2009). - Observation of swell dissipation across oceans. *Geophys. Res. Lett.*. 36:L06607.

Arduin F., E. Rogers, A. Babanin, J.-F. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. V. der Westhuysen, P. Queffeulou, J.-M. Lefevre, L. Aouf, F. Collard (2010). - Semi-empirical dissipation source function for wind-wave models: part 1, definition, calibration and validation at global scales. *J. Phy. Oceanogr.* 40:1917-1941.

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

Gelci, R., Cazalé, H., & Vassal, J. (1957). Prédiction de la houle. La méthode des densités spectroangulaires. Bulletin d'information du Comité d'Océanographie et d'Etude des Côtes, 9, 416-435.

Grant, W.D. and Madsen, O.S. (1982). - Movable bed roughness in unsteady oscillatory flow. J. Geophys. Res., 87:0148-0227.

Hasselmann S., K. Hasselmann, J. Allender and T. Barnett (1985). - Computation and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part 2: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave model. J. Phys. Oceanogr., 15:1378-1391.

Jourdan, D., Paradis, D., Pasquet, A., Michaud, H., Gouillon, F., Baraille, R., ... & Ohl, P. Le projet HOMONIM. COMITE SCIENTIFIQUE SCIENTIFIC COMMITTEE, 88.

Lazure P., Dumas F. (2008). - An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). Advances In Water Resources, 31(2):233-250.

Loubrieu B., Bourillet J.F., Moussat E. (2008). - Bathymorphologie régionale du Golfe de Gascogne et de la Manche, modèle numérique 2008. Brest : Ifremer, Tech. Rep., DCD/GM/CTDI/08-01.

Madsen, P.A., Y.-K. Poon and H.C. Graber (1988). - Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory. Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 492-504.

Michaud H., Dalphiné A., Huchet M., Pasquet A., Baraille R., Leckler F., Aouf L., Roland A, Dutour-Sikiric M., Ardhuin F., Filipot J-F (2015) - Implementation of the next French operational coastal wave forecasting system and application to a wave-current interaction study. Proc. Int. Conf. WAVE H&F, Key West, Florida, USA

Queffeuilou P. and D. Croizé-Fillon (2012). - Global altimeter SWH data set. Brest : Ifremer, Tech. Rep.

Roland A. (2008). - Development of WWM II: Spectral wave modelling on unstructured meshes. Ph. D. thesis, Inst. of Hydraul. and Wave Resour. Eng., Techn. Univer. Darmstadt, Germany.

Roland A., A. Cucco, C. Ferrarin, T.-W. Hsu, J.-M. Liou, S.-H. Ou, G. Umgiesser, and U. Zanke, (2009). - On the development and verification of 2-D coupled wave-current model on unstructured meshes. J. Mar. Syst., 78:S244-S254.

Saha S. et al, (2010). - The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Bul. Amer. Meteor. Soc., 91:1015-1057.

Tolman, H.L. (1995). - Subgrid modeling of moveable-bed bottom friction in wind wave models. Coastal Eng., 26:57-75.

Tolman, H. L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14. Technical note, MMAB Contribution, 276