

GENERATION DE BASES DE DONNEES OCEANO-METEOROLOGIQUES POUR L'ELABORATION DE CLIMATOLOGIES ADAPTEES AU DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES EN MER.

*Generation of a metocean database for accurate climatologies dedicated
to the conception of marine structures*

**Edwige¹ BOUDIERE¹, Christophe¹ MAISONDIEU¹, Fabrice¹ ARDHUIN¹,
Mickaël¹ ACCENSI¹, Lucia¹ PINEAU-GUILLOU¹, Jérémy² LEPESQUEUR²**

¹ IFREMER - Plouzané, France - Edwige.boudiere@ifremer.fr

² SHOM - Plouzané, France

Les activités dans le domaine des Energies Marines Renouvelables sont en pleine expansion. Pour l'évaluation de la ressource aussi bien que pour la caractérisation des climatologies des sites de déploiement de Convertisseurs d'Energie Marine, une description fine des conditions environnementales, notamment des états de mer, est requise à l'échelle des sites d'implantation. Afin de développer un outil adapté aux besoins de l'ingénierie et au développement des activités des Energies Marines Renouvelables, l'Ifremer construit une base de données spécifique à l'établissement de climatologies fines des états de mer. Cette base de données, réalisée à l'aide d'une configuration actualisée du modèle de vagues WaveWatch III[®] sur grille déstructurée, est présentée ici. Le domaine considéré s'étend du Golf de Gascogne jusqu'au Sud de la Mer du Nord de 1996 à 2012. Le paramétrage, les données de forçage ainsi que les données de sortie du modèle et les validations sont également présentés en détail.

Mots-clefs : spectre directionnel, hindcast, WAVEWATCH III[®], énergie marine renouvelable

The number of Marine Renewable Energy projects has rapidly raised over the last decades. Those require a refined description of environmental conditions, such as sea states, for resource assessments as well as for the conception of the Marine Energy Converters. Engineering studies require long-term data sets so as to assess temporal variability and extreme events of sea states at the scale of the implantation sites. As a support to its research studies on Marine Renewable Energy, Ifremer is building a specific hindcast database, running the wave model WAVEWATCH III[®] on an unstructured grid. The wave model extends over the area from the South of the North Sea to the Bay of Biscay with a high spatial resolution and covers a 16 years period from 1996 to 2012. The parameterization of the model is presented in this paper, as well as the forcing, the specific output data and validation results.

Key-words : Directional spectra, hindcast, WAVEWATCH III[®], marine renewable energy

I INTRODUCTION

Les vagues constituent un facteur environnemental dominant pour la conception des structures placées en mer et plus particulièrement des convertisseurs d'énergie marine (CEM). Les vagues constituent non seulement une source majeure d'énergie, mais également une contrainte environnementale importante pour la conception des CEM (éoliennes offshores, hydroliennes et houlomoteurs déployés en plein mer) dont elle peut affecter à la fois le rendement et l'intégrité structurelle.

Au delà du problème de l'évaluation de la ressource apparaît la nécessité de disposer de climatologies précises et adaptées aux études de développement, d'optimisation et de dimensionnement des CEM. Ces climatologies doivent permettre de fournir toutes les informations nécessaires à l'évaluation des variations spatiales et temporelles des états de mer à l'échelle locale des sites d'implantation [Saulnier, 2012]. Elles doivent également permettre une caractérisation complète de la distribution spectrodirectionnelle de l'énergie au sein des états de mer [Kerbiou, 2007]. De fait, il est nécessaire de construire de nouvelles bases de données adaptées, établies sur des maillages fins et incluant les spectres de houle directionnels complets.

Afin de développer un outil adapté à ses activités de soutien aux ingénieries et au développement des énergies marines renouvelables (EMR), l'IFREMER a engagé un projet avec l'objectif de construire une base de données de hindcast spécifique à l'établissement des climatologies fines d'états de mer. Comme première étape à ce projet, une base de données de hindcast d'états de mer couvrant la Manche et le Golfe de Gascogne a été construite sur la période de 1996 à 2012. Ces simulations ont été réalisées avec une configuration réactualisée du modèle de vagues Wavewatch III[®] (WW3) sur une grille déstructurée. Cette

base de données permet en particulier de disposer de spectres directionnels complets en plus de 4000 points. Le paramétrage, les grilles d'entrée, de sortie ainsi que les jeux de données de forçages utilisés lors des simulations d'états de mer sont décrits en première partie de ce document. Les résultats des travaux de validation de ces jeux de données sont ensuite présentés, attestant de la bonne corrélation des simulations avec les mesures in situ, les observations satellitaires et les données d'un autre modèle de vagues.

II SIMULATION RETROSPECTIVE DES ETATS DE MER

II.1 Description du modèle

II.1.1 Paramétrage du modèle

La construction de la base de données a été réalisée à l'aide du code de calcul WW3 dans sa version 4.09. WW3 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. Le schéma de propagation utilisé dans cette configuration est un schéma de propagation explicite pour grille déstructurée [Roland, 2008; Roland, 2009]. L'utilisation de mailles déstructurées permet 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). Le maillage est constitué de plusieurs sous-parties, ou polygones (cf. Fig. 1), dans lesquelles les critères de raffinement ont été définis en fonction des variations bathymétriques et de la vitesse de propagation (condition CFL). Ces critères ont permis une optimisation du temps de calcul en limitant la taille des plus petites mailles. Le critère de variation bathymétrique MAXDZ est défini par :

$$A_{new} = \frac{MAXDZ}{DZ} A_{old} \quad (1)$$

Où $A_{new}(m^2)$ est l'aire du nouveau triangle calculé, MAXDZ(m) représente la variation bathymétrique maximale souhaitée par triangle (constante donnée par l'utilisateur) et DZ(m) représente la variation bathymétrique dans l'élément $A_{old}(m^2)$.

Le critère CFL est défini par :

$$C_g \Delta t = \Delta x \quad (2)$$

Où C_g est la vitesse de groupe limite (constante définie par l'utilisateur), Δt est le pas de temps et Δx est la distance entre deux points du maillage.

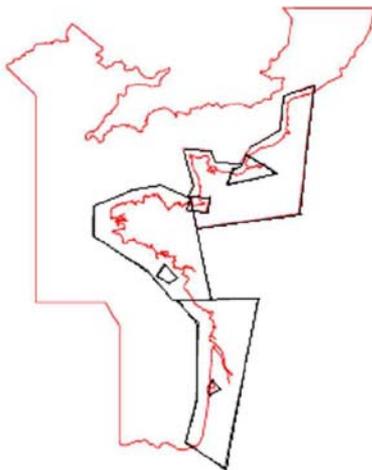


Fig. 1 Polygones du maillage

Le maillage utilisé est composé de plus de 110000 nœuds de calcul et couvre un large domaine allant du Sud de la mer du Nord jusqu'au Golf de Gascogne. Le paramétrage utilisé dans cette configuration pour la génération et la dissipation des vagues [Arduin, 2009a ; Arduin, 2010] est celui développé lors du projet de recherche IOWAGA (Integrated Ocean WAVes for Geophysical and Other Applications) et testé en mode prévision dans le cadre du démonstrateur opérationnel Previmer [Lecornu, 2008]. L'évolution et les interactions non-linéaires des vagues sont modélisés par la méthode DIA (Discrete Interaction Approximation) [Hasselmann, 1885].

La dissipation d'énergie par déferlement a été améliorée en s'appuyant sur les données d'observation satellitaire [Arduin, 2009] dont l'analyse a permis de faire la distinction entre le déferlement spontané (déferlement des vagues de forte cambrure) et le déferlement induit (déferlement des vagues de grande longueur d'onde dépassant les vagues de plus petite longueur d'onde) [Arduin, 2010]. Cette distinction entre déferlement induit et déferlement spontané a été introduite dans le modèle.

Le paramétrage des termes de dissipation sur le fond (BT4) a été amélioré. En particulier pour les fonds sableux, BT4 a été construit à partir du modèle de prédiction de rugosité des rides de Grant et Madsen [Grant, 1982], développé à partir de données de laboratoire. Ce modèle a été étendu aux spectres de vague

[Madsen, 1988] sous un régime de 'sheet flow' (régime où les rides sont effacées) en s'appuyant sur le modèle de Wilson [Wilson, 1989]. Puis, 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 rémanantes, grâce à une sous grilles qui attribue à chaque maille une fraction de la couverture de rides [Ardhuin, 2003], et qui s'applique à une granulométrie plus étendue.

La réflexion des vagues en zone côtière est paramétrée à l'aide d'un coefficient de réflexion variable. Ce coefficient de réflexion est défini en fonction de la pente de la zone littorale et dépend à la fois de la géomorphologie du rivage et des caractéristiques de vagues (hauteur des vagues incidentes, fréquence moyenne) [Ardhuin, 2012]. Ce paramétrage permet de réduire les erreurs sur l'étalement directionnel moyen dans les zones côtières où la pente a été estimée de manière raffinée.

Les spectres directionnels sont discrétisés sur 24 directions (secteurs angulaires de 15°) et sur 32 fréquences (comprises entre 0.0373 Hz to 0.7159 Hz).

II.1.2 Bathymétrie

Les simulations d'états de mer ont été réalisées sur une bathymétrie de haute résolution qui s'étend du Sud de la mer du Nord à l'ensemble du plateau continental du Golfe de Gascogne. La bathymétrie a été obtenue grâce aux 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]). Certains sites tels que le bassin d'Arcachon, la Baie des Veys, le plateau des Minquiers et l'estuaire de La Gironde ont nécessité quelques corrections pour lesquelles ont été utilisées des données de levées bathymétriques spécifiques.

II.1.3 Forçages : champs de vent

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 Centers for Environmental Prediction). Ces champs de vents ont été réanalysés 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.

D'autres modèles de vagues forcés par ces champs de vent ont montré une bonne corrélation avec les données des satellites et les mesures in situ, même si certains événements de forte houle sont parfois sous-estimés.

II.1.4 Forçages : niveaux d'eau et courants

Les courants, les niveaux d'eau et surcôtes ont été calculés à l'aide du code hydrodynamique MARS 2D (Model for Applications at Regional Scale). MARS 2D est un modèle développé par l'IFREMER [Lazure, 2008] et basé sur les équations en eau peu profonde. Il est composé de sept modèles imbriqués et dont la résolution diffère suivant le rang (cf. détails dans le Tableau 1).

TABLEAU I
DESCRIPTION DES MODELES DE NIVEAUX D'EAU ET DE COURANTS

Rang	Resolution Spatiale (m)	Resolution Temporelle (min)	Modèle	Nom
0	2000	60	Nord Est Atlantique Manche et	ATLNE2000
1	700	60	Golf de Gascogne	MANGA700
2	250	15	Côte Aquitaine	AQUI250
2	250	15	Manche Est	MANE250
2	250	15	Manche Ouest	MANW250
2	250	15	Mer d'Iroise	FINIS250
2	250	15	Bretagne Sud	SUDBZH250

Le coefficient de traînée utilisé dans le modèle est un coefficient de Charnok variable [Charnok, 1955] issu du modèle de vagues WW3. Ce coefficient dépend de l'action du vent et de l'action des vagues. D'après une étude de sensibilité des différents paramétrages du coefficient de traînée, le coefficient variable de Charnok conduit aux meilleurs résultats [Müller, 2012]. Ce coefficient a donc été intégré à la configuration du modèle de courants.

Pour le calcul de la marée et des courants de marée, 14 composantes de la marée issues du modèle global de marée océanique FES2004 [Lyard, 2006] forcent le modèle de rang 0. Le modèle de rang 1 est imbriqué dans le modèle de rang 0. Ainsi, les marées et courants de marée issus du modèle de rang 0 forcent le rang 1. Les modèles de rang 2 sont quant à eux forcés avec 115 composantes harmoniques du modèle de marée cstFRANCE [Simon, 2007]

mises à disposition par le SHOM. De plus, les surcotes obtenues des rangs 0 et 1 sont implémentées dans les modèles de rang 2. Cette méthode offre une meilleure estimation de l'élévation du niveau d'eau et des courants de marées pour le rang 2.

Les données de Météo-France ont été utilisées comme forçage météorologique. Les rangs 0 et 1 sont forcés en utilisant les données du modèle météorologique ARPEGE 0.5° [Courtier, 1991; Courtier, 1994] avec un pas de temps de six heures. Les modèles de rang 2 sont forcés avec les données issues du modèle météorologique AROME 0.025° [Seity, 2011] avec un pas de temps de une heure.

Afin d'alléger le traitement des données de courants et de niveaux d'eau produits par les modèles imbriqués, un atlas de composantes harmoniques a été réalisé. Un rejeu de données de marées a été réalisé sur une année (2008) ainsi qu'une analyse des composantes harmoniques de la marée pour chacun des sept modèles. Les marées et les courants de marée peuvent donc être évalués pour chaque année sur l'ensemble du domaine. Les composantes harmoniques et les niveaux d'eau sont mis à jours toutes les 30 minutes et sont interpolés sur le maillage du modèle de vagues en s'appuyant sur le modèle de courant de plus fine résolution.

II.2 Données de sortie du modèle

L'objectif principal de cette base de données est de fournir une information pertinente pour la réalisation des climatologies adaptées aux études de dimensionnement des structures en mer et plus particulièrement pour le développement de CEM. Que ce soit pour évaluer la ressource, pour dimensionner les structures ou pour planifier les opérations de maintenance, les champs de paramètres globaux doivent être disponibles sur une grille fine, par exemple, à l'échelle des sites de production (i.e. quelques kilomètres carrés). De plus, la réponse dynamique de telles machines, de fait leur rendement, dépend fortement de la distribution spectro-directionnelle de l'énergie des vagues. L'une des caractéristiques importantes de cette base de données est donc, outre la production des paramètres de vagues globaux sur une grille de haute définition, la mise à disposition de séries temporelles longues de spectres directionnels sur une grille spatiale fine

II.2.1 Paramètres globaux et spectres en fréquence

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 et les différentes directions de propagation. 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 champs de paramètres standards (hauteur significative, période de pic et direction moyenne) pour chacun des systèmes de houle et de mer de vent identifiés.

Des paramètres supplémentaires sont aussi produits qui ont un intérêt plus particulier pour les applications liées aux énergies marines renouvelables et l'ingénierie océanique (période d'énergie T_e (t), le flux d'énergie de la vague ($C_g E$), ...); la dynamique des sédiments et l'interaction houle-courant (dérive de Stokes (uss), transport de Stokes (tus), tension de radiation (S_{xy}), ...); l'analyse des flux air-mer et de la couche de mélange océanique supérieure (flux d'énergie du vent à la vague (faw), ...).

Tous ces paramètres et ensembles de données, ainsi que les spectres en fréquence sont sauvegardés en chacun des nœuds (plus de 110000) du maillage déstructuré de haute résolution, avec un pas de temps d'une heure.

II.2.2 Spectres directionnels

Les CEM sont destinés à être déployés dans des zones dans lesquelles l'énergie disponible est importante, où les conditions environnementales ne sont pas nécessairement les plus rudes, mais où elles peuvent fortement varier en temps et en espace. De plus, les états de mer dans ces zones sont souvent complexes avec des superpositions de systèmes de mer de vent et de houle, des mers croisées ou de fortes interactions entre la houle et le courant.

Les spectres directionnels contiennent l'information la plus complète sur la distribution de l'énergie des vagues d'un état de mer et sont de fait utilisés pour l'évaluation de la ressource, et la description des climatologies, en particulier lorsqu'il est important de caractériser l'étalement directionnel et la largeur de bande spectrale.

Sauvegarder les spectres directionnels sur l'ensemble des points du maillage n'était pas possible pour des raisons pratiques d'espace de stockage et de volume de la donnée. Cependant, compte tenu des objectifs d'utilisation de la base de données, une grille plus grossière, dérivée du maillage initial, a été réalisée sur laquelle les spectres directionnels sont sauvegardés au pas de temps d'une heure. Cette grille intègre différents sites de déploiement de CEM opérationnels ou potentiels, e et de sites d'essais en mer pour les

CEM (SEM-REV en France, Wave Hub au Royaume Uni ou Bimep en Espagne), mais aussi des points de contrôles ayant les coordonnées des campagnes de mesures en mer telles que le réseau de bouées directionnelles CANDHIS ou celles des point de sorties du modèle de vague de la NOAA/NCEP (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Au final, plus de 4000 spectres directionnels (discretisés en 24 directions et 32 fréquences) sont sauvegardés sur l'ensemble du domaine avec un pas de temps d'une heure.

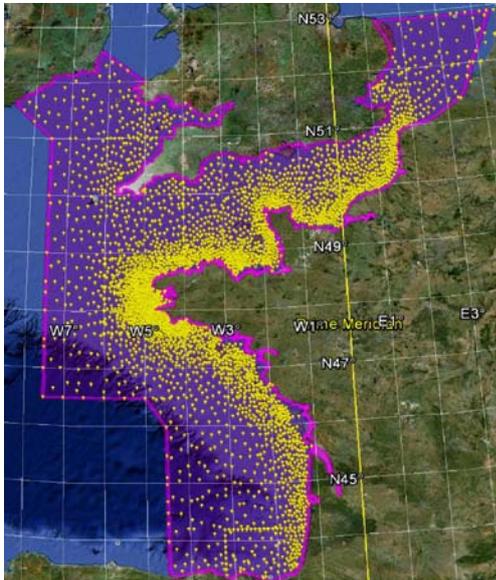


Fig. 2 Localisation des spectres directionnels



Fig. 3 Localisation des bouées de mesure

III VALIDATION

Les données utilisées pour la validation incluent des mesures in situ, des données issues des altimètres et des sorties du modèle WW3 de la NOAA/NCEP.

III.1 Mesures in situ

Des validations ont été effectuées en utilisant des données de mesures in situ provenant de différentes sources.

Une première validation de la base de données a été effectuée sur une période de 3 ans couvrant les années 2007 à 2009. Des comparaisons ont été réalisées avec les bouées du réseau CANDHIS du CETMEF (Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales) et les bouées de Météo-France le long de la côte française (Fig. 3). Les mesures de vagues sont enregistrées sur des durées de 20 à 30 minutes, deux fois par heure. Pour cette période de 3 ans de validation, seule la bouée de Météo-France (62052) mesurait les vitesses de vent, en enregistrant sur 10 dix minutes les vitesses de vent, une fois par heure.

. Différents termes d'erreurs standards ont été évalués sur ces données : le biais moyen, l'erreur en moyenne quadratique centrée CRMSE, le 'scatter index' SI et la corrélation (r). Les résultats pour la hauteur significative sont présentés Fig. 4 et Tableau 2 et Fig. 5 et Tableau 3 pour les vitesses de vent.

Pour les 3 ans de comparaison, les erreurs statistiques et les graphiques montrent une bonne correspondance entre le modèle et les mesures in situ. Le coefficient de corrélation est compris entre 93% et 98% pour les vagues. Il est égal à 90% pour le vent. Le modèle est donc bien corrélé aux observations. Le biais est relativement faible pour l'ensemble des points de validation. Le 'scatter index' et l'erreur CRMSE confirment la bonne correspondance entre le modèle et les observations.

Les diagrammes Quantile-Quantile (Q-Q) des paramètres de vent et de vagues atteste de la bonne corrélation entre le modèle et les observations. Cependant, comme cela a pu déjà être observé par ailleurs pour les vents CFSR, les plus fortes vitesses de vent et les hauteurs de vagues les plus élevées sont parfois sous-estimées.

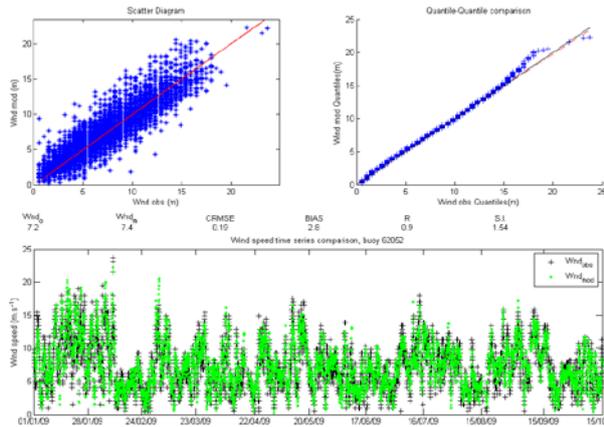


Fig. 4 Vitesses de vent – Comparaison avec la bouée 62060 (Météo France 2009)

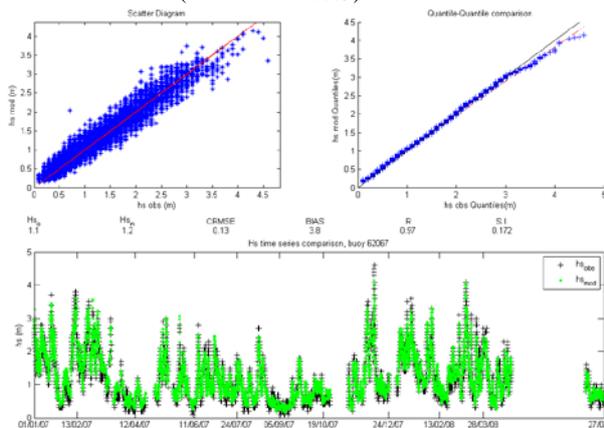


Fig. 5 Hauteur significative – Comparaison avec la bouée 62067 (CETMEF 2007-2008)

III.2 Altimètres

Des données issues de la mesure satellitaire mises à disposition par le CERSAT ont été utilisées pour ces travaux de validation. Ces paramètres sont issus des altimètres des satellites ENVISAT, ERS1/2, TOPEX, JASON 1/2 et GFO (cf. détails Tableau 4) préalablement calibrés et corrigés [Queffeuou, 2012].

Grâce à la haute résolution de la grille de sortie des champs de paramètres globaux, les données du modèle ont pu être comparées à celles des traces satellites sur l'ensemble du domaine. Une première validation a été menée sur une période de 2 ans, 2008 - 2009. Le pas de sortie du modèle de vagues est d'une heure. De ce fait, chaque point du modèle de vagues sur le passage d'une trace satellite a été individuellement interpolé en fonction de l'heure de passage des satellites. Des diagrammes Q-Q et de dispersion pour les paramètres de vagues et de vent sont présentés Fig. 6 et 7. Les résultats sont donnés pour tous altimètres confondus et montrent une bonne corrélation entre le modèle et les observations. Il y a cependant quelques sous-estimations des valeurs des événements les plus forts. Cette tendance est nettement accentuée pour les vitesses de vent.

TABLE IV
DETAILS FOR ALTIMETERS

Satellite	Period	Circle Period (Days)	Official Sources
ERS1	1991-1996	35	CERSAT
ERS2	1995-2003	35	CERSAT
TOPEX	1992-2005	10	AVISO, PODEX
GFO	2000-2008	17	NOAA
Jason 1	2001 onwards	10	AVISO, PODAAC
Envisat	2002 onwards	35	ESA
Jason 2	2008 onwards	10	NOAA, EUMESAT

TABLE II
STATISTIC ERRORS FOR HS AT SELECTED BUOYS FOR THE PERIOD 2007-2009

Buoy	Number of Points	Bias (%)	S.I. (m)	CRMSE	r
62052	6548	9.6	0.26	0.14	0.97
62059	6183	11	0.19	0.22	0.93
62060	4870	5.7	0.21	0.24	0.93
62067	7553	5.4	0.16	0.13	0.97
62069	6608	12	0.28	0.19	0.98

TABLE III
STATISTIC ERRORS FOR WIND SPEED FOR THE PERIOD 2007-2009

Buoy	Number of Points	Bias (%)	S.I. (m/s)	CRMSE	r
62052	6548	4.8	1.9	0.2	0.9

TABLE V
GLOBAL COMPARISON WITH ALTIMETERS FOR THE PERIOD 2008-2009

Parameter	Number of Points	Bias (%)	S.I.	CRMSE	r
Hs	136562	-0.68	0.36 m	0.14	0.96
Wind	136562	1.73	1.63 m.s ⁻¹	0.19	0.91

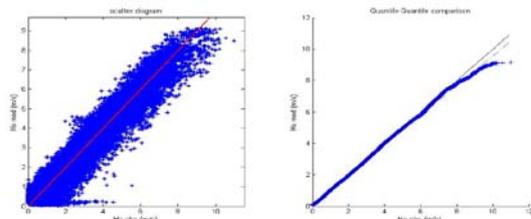


Fig. 6 Hauteur significative – Comparaison avec les altimètres (période 2008-2009)

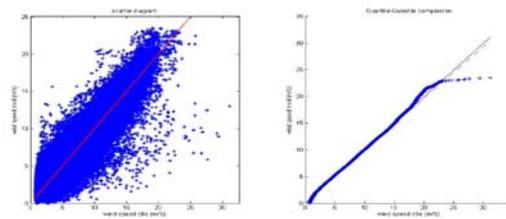


Fig. 7 Vitesse de vent - Comparaison avec les altimètres (période 2008-2009)

III.3 Modèle de la NOAA/NCEP

La base de données de hindcast d'états de mer de 1997 à nos jours de la NOAA, disponible et facilement accessible a également été utilisée pour cette validation. Le modèle global a une résolution de $1^\circ \times 1.25^\circ$. Il a été raffiné à une résolution de 0.5° depuis 2005. Les comparaisons des hauteurs significatives de vagues ont été limitées aux sites en profondeur intermédiaire et en eau profonde. Une première validation a été effectuée sur la période 2007 à 2009. Le Tableau VI présente les intervalles des erreurs statistiques obtenus pour les points sélectionnés. La figure 8 présente les graphiques de comparaisons entre les deux modèles.

Les statistiques montrent une bonne correspondance entre les deux modèles. On note en particulier un coefficient de corrélation de 0.98 sur l'ensemble des points.

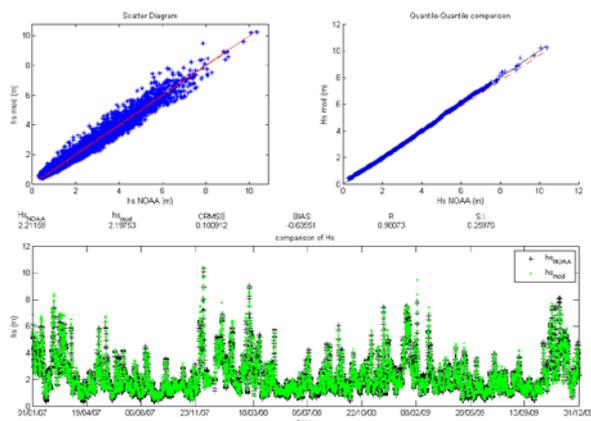


Fig. 8 Hauteur significative - Comparaison avec le modèle de la NOAA/NCEP (coordonnées $46.5^\circ\text{N } 3.0^\circ\text{W}$)

TABLE VI
STATISTIC ERRORS FOR WIND SPEED FOR THE YEAR 2007-2009

Number of Points	Bias (%)	S.I. (m)	CRMSE	r
23152	[-7.6 2.9]	[0.25 0.34]	[0.10 0.13]	0.98

IV CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'établissement d'une nouvelle base de données de hindcast d'états de mer adaptée aux besoins de l'ingénierie et des études de dimensionnement pour l'optimisation des CEM a été présentée. Ces 16 années de données ont été produites grâce à une configuration actualisée du modèle de houle WW3 étendu de la Manche au Golfe de Gascogne. La principale caractéristique de cet outil pour la caractérisation des climats d'états de mer, est la mise à disposition d'un ensemble complet de paramètres globaux ainsi que des spectres directionnels sur une grille spatiale fine.

Cette base de données a montré une bonne corrélation avec les données in situ, avec les données des altimètres ainsi qu'avec les données du modèle de vague de la NOAA/NCEP. Ces travaux de validation seront complétés par une analyse des spectres directionnels. Cette base de données sera étendue dans le futur à la mer Méditerranée ainsi qu'aux zones ultra-marines.

V REFERENCES

- Ardhuin, 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.
- Ardhuin F., B. Chapron and F. Collard (2009a). - 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. Queffeuilou, 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.
- Arduin F., A. Roland (2012). - Coastal reflection, directional spread, and seismoacoustic noises sources. *J. Geophys. Res.* **117**:16.
- Charnock, H. (1955). - Wind stress on a water surface. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **81**:639–640.
- Chawla A., A. D. Spindler, H. L. Tolman (2012). - Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds. *Ocean Modell.* in press.
- Courtier, P., C. Freydier, J.-F. Geleyn, F. Rabier and M. Rochas (1994). - The ARPEGE project at Météo-France. in ECMWF Seminar Proceedings: Numerical methods in atmospheric models, **II**:193-231.
- Courtier P, Thepaut J, Hollingsworth A. (1994). - A strategy for operational implementation of 4D-VAR, using an incremental approach. *Q J R Meteor. Soc.*, **120**:1367–1387.
- Cox A. T., V. J. Cardone, V. R. Swail (2011). - On the use of the Climate Forecast System Reanalysis Wind Forcing in ocean response modeling. Hawaii : in Proceedings: 12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and 3rd Coastal Hazards Symposium.
- 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.
- Kerbiriou M-A., Prevosto M., Maisondieu C., Clément A., Babarit A. (2007). - Influence of Sea-States Description on Wave Energy Production Assessment. Porto, Portugal : Proc. EWTEC Conf.
- 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.
- Lecornu F., Paillet J., Ravenel H. (2008). - PREVIMER-Coastal observations and forecast – summary of 2 years demonstration and future perspectives. Brest : Proc, Operational Coastal Oceanography conf.
- 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.
- Lyard, F., Lefèvre, F., Letellier, T., Francis, O. (2006). - Modelling the global ocean tides: modern insights from FES 2004. *Ocean Dynamics*, **56 (5-6)**:394-415.
- 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.
- Muller H., Pineau-Guillou L., Idier D. (2012). - Storm surge modeling strategy along the French (Atlantic and English Channel) coast. Brest : Jonsmod 2013 proceedings Ocean Dynamics.
- 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. Liaw, 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.
- Saulnier J-B., Maisondieu C., Ashton I., Smith G. (2012). - Refined sea state analysis from an array of four identical directional buoys deployed off the Northern Cornish coast (UK). *Applied Ocean Res.*, **37**:1-21.
- Seity Y, Brousseau P, Malardel S, Hello G, Bénard P, Bouttier F, Lac C, Masson V (2011) The AROME-France convective scale operational model. *Mon Wea Rev* 139:976–991.
- Simon (2007). - La marée océanique côtière. Paris : Oceanographic Institute Editions, 433.
- Tolman, H.L. (1995). - Subgrid modeling of moveable-bed bottom friction in wind wave models. *Coastal Eng.*, **26**:57–75.
- Wilson, KC (1989). - Friction of wave induced sheet flow. *Coastal Eng.*, **12**:371-379.