

Quelles mesures pour la prévision des états de mer en zone côtière ?

Fabrice Ardhuin

Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Brest, France

Introduction

L'état de la mer est une composante essentielle de la dynamique océanographique côtière [01] et le moteur quasi-exclusif de l'hydrodynamique et de la morpho-dynamique sédimentaire. L'état de la mer est aussi le facteur limitant principal de nombreuses activités humaines. Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine a donc développé des méthodes de prévision et réalise, à titre d'exercice, des prévisions côtières en routine depuis 2002. Si les facteurs qui influencent l'état de mer en zone côtière sont assez bien connus [02, 03, 04], les paramètres important pour d'autres applications, tels que le transport sédimentaire en zone de déferlement, sont encore incertains [05]. Par ailleurs la prévision des états de mer peut aussi alimenter d'autres systèmes de prévision océano-météorologique, par exemple pour la correction de biais liés à l'état de la mer dans la mesure par satellite du vent, de la hauteur dynamique, des courants ou de la salinité [06, 07]. Ces applications demandent une prévision des paramètres principaux que sont la hauteur significative H_s , et la période du pic spectral T_p , mais la forme du spectre en fréquence et directions est une information intermédiaire indispensable pour pouvoir propager l'état de la mer. La prévision dans la zone de déferlement peut faire appel à des statistiques complémentaires, par l'emboîtement d'un modèle spécifique [par exemple 08] dans un modèle spectral en phase moyennée pour la zone côtière. Le modèle côtier, dès qu'il présente une frontière ouverte sur le large, est nécessairement emboîté dans un modèle de grande emprise. Dans de nombreuses situations l'état de la mer en zone côtière est fortement dominé par les vagues se propageant depuis le large. La qualité des champs de vent qui forcent les prévisions au large est donc primordiale. C'est elle qui fixe, dans bon nombre de situation, l'horizon de prévisibilité de l'état de la mer. Nous allons ici étudier les différentes sources d'erreur contribuant aux erreurs dans la prévision côtière et proposer des méthodes d'amélioration à partir de plusieurs systèmes de mesure, en prenant le cas des côtes du Finistère. Il convient de se rappeler que la partie énergétique de l'état de la mer se propage à une vitesse de l'ordre de 5 à 15 m/s et traverse donc un plateau continental en seulement quelques heures. Par ailleurs l'échelle temporelle de cohérence de l'état de la mer est de l'ordre de 12h pour les forts états de mer, davantage pour la houle. Toute observation côtière, fusse-t-elle utilisée au mieux, a donc peu d'impact sur la prévision au delà d'un échéance de 12 h. La seule exception étant les mesures côtières au voisinage d'îles océaniques telles que les Faroe, Açores, Hawaii, ou la Polynésie Française. Dans ce cas les vagues continuent leur longue propagation jusqu'au bord des bassins océaniques. La mesure côtière présent alors un fort intérêt, mais pour d'autres côtes. Enfin nous envisagerons l'usage des données en temps différé pour la validation et la calibration des modèles de prévision.

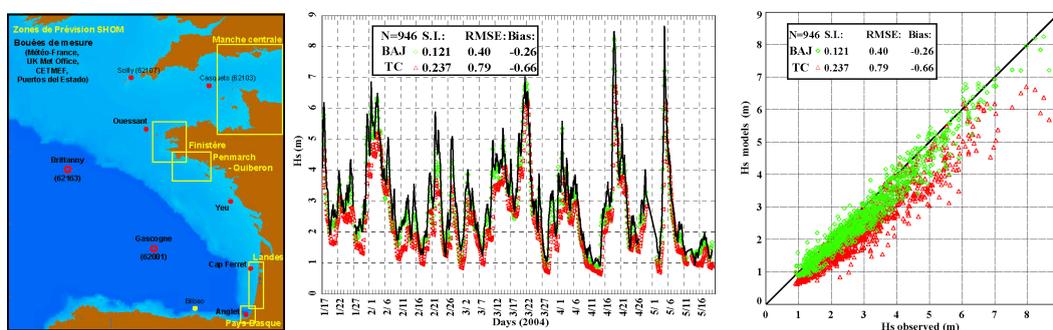


Figure 1. Validation des prévisions au large réalisées avec le modèle WAVEWATCH III, « version SHOM ». A gauche, zones pour les prévisions au SHOM en routine, avec la position de la bouée « Brittany » de l'UK Met Office et Météo-France. Au centre, comparaison à Brittany des observations de H_s (en noir) et d'un calcul avec la version par défaut de WAVEWATCH III (« TC » en rouge) et la version du SHOM (« BAJ » en vert). A droite, même comparaison mais sous forme de diagramme modèle / observations. Les paramètres statistiques indiqués sont l'erreur en moyenne quadratique (RMSE) en mètres, cette même erreur normalisée par la valeur moyenne (quadratique) des observations (S.I.) et le biais (« bias ») en mètres.

Bilan des erreurs sur les états de mer aux abords du Golfe de Gascogne

La Bretagne est sous l'influence des houles formées dans tout l'Atlantique Nord, de la Guyanne au Groenland. En attendant de pouvoir bénéficier de conditions aux limites fournies par Météo-France, le modèle numérique utilisé pour la prévision océanique au SHOM, est le modèle WAVEWATCH III développée par l'équipe de Hendrik Tolman [09] et opérationnel au NOAA/NCEP. Ce modèle a été modifié au SHOM afin d'améliorer la représentation de la croissance des vagues [10], en suivant les paramétrages utilisés au Centre Européen de Prévision (CEPMMT) [11]. Les simulations dont les résultats sont présentés ici sont réalisées avec une résolution de 1° de latitude et longitude et forcées par une combinaison d'analyse des cycles de 00h et 12h et de prévisions à 6h d'échéance issues du CEPMMT. La résolution angulaire est de 15°, et la grille fréquentielle comporte 30 fréquences espacées exponentiellement de 0.41 Hz à 0.65 Hz avec un incrément d'un facteur 1.1. Les erreurs pour le Hs moyenné par tranches de 3h aux bouées Brittany et Gascogne sont de l'ordre de 12%. La figure 1 montre un exemple de validation sur le début 2004 mais les erreurs sont à peu près homogènes à 12-15% pour 2003 à 2005. Cette qualité est exceptionnelle quand on sait que aucune mesure de vagues n'a été assimilée et aucune correction de biais ni calibration n'a été effectuée. Ainsi les calculs peuvent être améliorés mais ils sont déjà comparables en erreur moyenne aux prévisions opérationnelles de la NOAA/NCEP, pourtant de très bonne qualité et bien calibrés (biais très faibles, voir table 1), et assimilant les mesures altimétriques de Hs.

Paramètre statistique (pour Hs) :	Erreur RMS normalisée	Erreur RMS (en mètres)	Biais (en mètres)
NCEP Brittany	10.1%	0.33	0.09
SHOM TC Brittany	25.0%	0.83	-0.70
SHOM BAJ Brittany	13.1%	0.43	-0.30
NCEP Gascogne	9.3%	0.25	-0.01
SHOM TC Gascogne	25.0%	0.67	-0.56
SHOM BAJ Gascogne	11.8%	0.33	-0.20

Table 1. Statistiques comparées des erreurs entre modèles et observations des bouées Brittany et Gascogne, pour les sorties 021h des runs opérationnels du NOAA/NCEP et les simulations a posteriori faite au SHOM avec les vents ECMWF, sur la période 08/02 à 27/03 de l'année 2004.

Enfin la version modifiée du modèle est nettement supérieure à la version standard (erreur de 24%, voir figure 1). Ces erreurs sont identiques à celles de prévisions d'échéances 0 à 12h, hors problèmes de flux de données dans le système opérationnel. Pour des prévisions de 0 à 24h l'erreur est de 14 à 18%. Malheureusement aucune mesure n'est disponible pour valider la période du pic (Tp) au large et la forme directionnelle et fréquentielle de l'état de la mer. Les mesures spectrales au large de nos côtes font cruellement défaut.

Erreurs en zone côtière

Alors que plusieurs études ont montré des validation de modèles d'état de mer en zone côtière, il s'agit pour l'essentiel de prévisions immédiates (ou rétrovisions) forcées par des observations au large [3, 12, 13]. Nous comparons ici les prévisions obtenu par un modèle simple et robuste de propagation par tracé de rayon spectral [12], baptisé CREST-p, aux observations. Le modèle CREST-p est forcé par un spectre fréquence-direction fourni soit par le modèle Atlantique au large d'Ouessant, soit par des observations au large de Crozon (bouée DWIROISE, figure 2), avec une estimation du spectre directionnel par la méthode du maximum d'entropie [14] et une résolution spectrale identique à celle du modèle. La propagation ne prends en compte ici que les variations de profondeur données par un modèle numérique de terrain de 1/1200^{ème} de degré (3'') de résolution en latitude et longitude, référencé au zéro hydrographique, et une correction de profondeur de +4m afin de s'approcher du niveau moyen.

Bien que de qualité moindre que la prévision au large, ou que des prévisions de houle sans vent [3,12] les états de mer propagés à la position de la bouée DWIROISE sont relativement précis, en terme de Hs, comme on pouvait s'y attendre, mais aussi en terme de fréquence du pic (f_p) et direction moyenne au pic en fréquence (θ_{1p}). Par contre l'étalement directionnel ($\sigma_{\theta 1p}$) est mal estimé. Or ce paramètre est important car plus $\sigma_{\theta 1p}$ est grand et plus les ombres portées par les îles et presqu'îles sont réduites (voir figure 2). Dans toutes les simulations, ces erreurs relatives s'amplifient lorsque les vagues sont propagées vers des zones plus abritées comme dans l'anse de Bertheaume et devant la plage des Blancs Sablons (Le Conquet), hors de la zone de déferlement.

Cette augmentation des erreurs plaide pour la plus grande réduction possible à la source : dans la condition à la limite au large. Malgré l'absence de représentation de la marée, un accord correct avec les observations (figures 3 et 4) est obtenu avec la version du SHOM de WAVEWATCH III combiné à CREST-p. De manière générale la propagation des spectres prévus au large est naturellement plus précise que la propagation des observations dès que les états de mer observés à DWIROISE sont abrités : soit par la chaussée de Sein du 20 au 22 avril (vagues d'ouest-sud-ouest), soit par l'archipel d'Ouessant-Molène, du 23 au 27 avril, par exemple, (vagues d'ouest-nord-ouest).

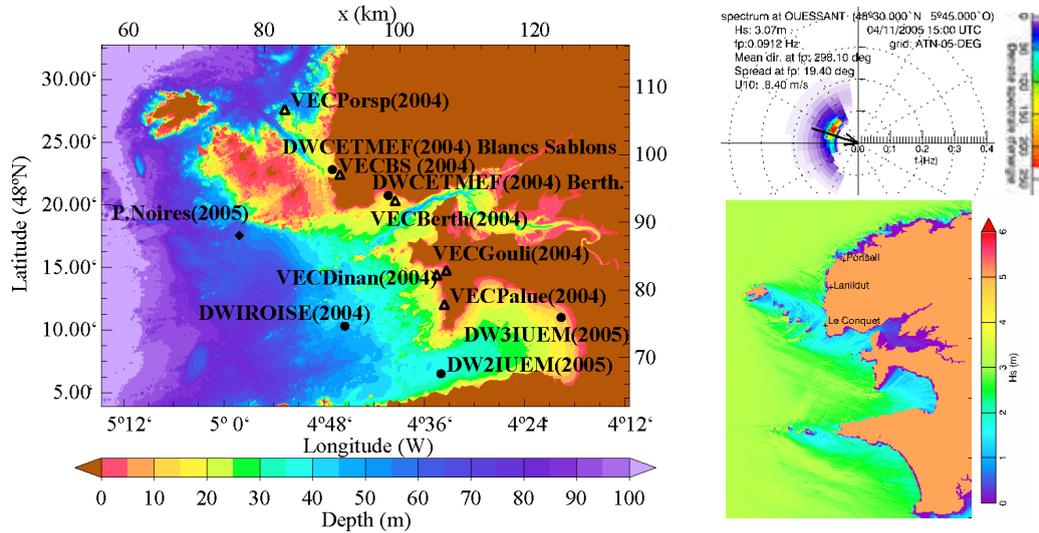


Figure 2. A gauche, emplacements des différents instruments de mesure de houle mouillés par le SHOM, le CETMEF, l'IUEM et le GESMA, en 2004 et 2005. DW : bouée datawell, VEC : courantomètre Nortek Vector. A droite, spectre d'état de mer au large (en haut) et carte des hauteurs de vagues (en bas) données par un modèle résolvant l'équation de Berkhoff avec une approximation parabolique [12].

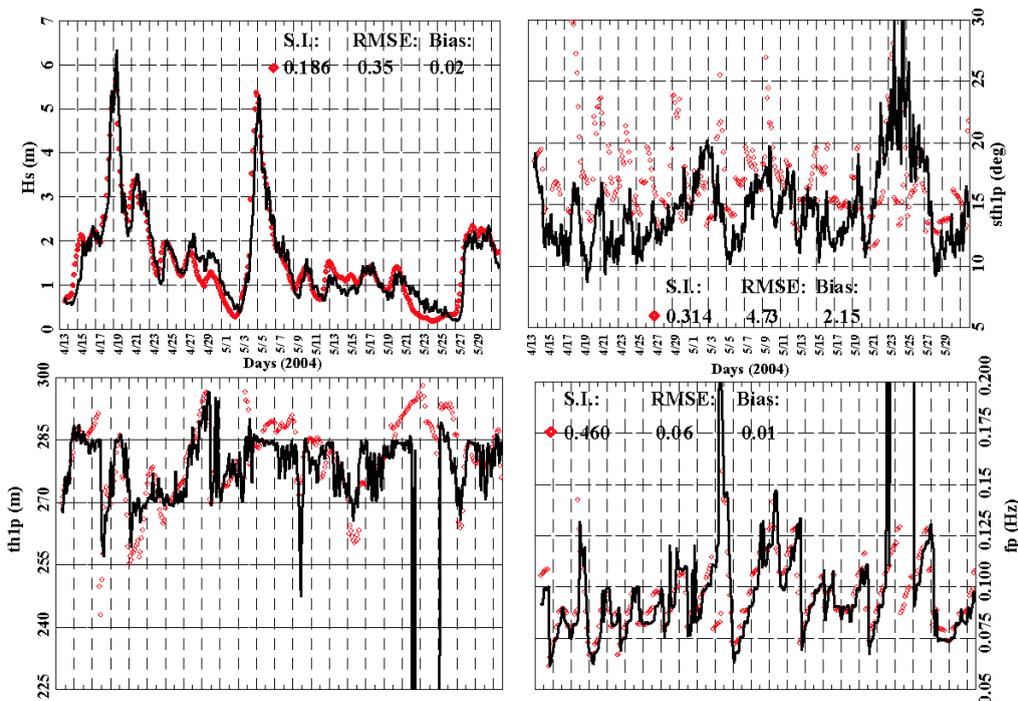


Figure 3. Comparaison des paramètres principaux calculés avec WAVEWATCH III et CREST-p aux observations de la bouée DWIROISE (45 m de fond). Thlp et sthlp sont les direction moyenne et étalement directionnel sur la bande de fréquence $0.85 f_p < f < 1.15 f_p$, avec f_p la fréquence au pic spectral. Les paramètres sont calculés à partir de spectres moyennés sur 3 heures.

Outre la qualité de la prévision au large, la relative incertitude des prévisions en zone côtière tient aussi à de nombreux facteurs dont la méthode pour spécifier les conditions aux limites, la résolution angulaire du modèle WAVEWATCH III, le fait d'avoir négligé les effets du vent local, du déferlement sur les récifs au large, et la marée. Les erreurs de 20% à Bertheaume sont toutefois inférieures à celles données par le modèle SWAN [13] sur cette même période, et comparables aux erreurs données par la propagation d'observation sur d'autres côtes découpées [16]. Dans la méthode de calcul, la plus importante limitation dans le cas présent est probablement l'absence de variation des conditions aux limites de long de la frontière, en particulier la réduction sensible vers l'est de la hauteur des vagues pour des tempêtes de nord-ouest, du fait de l'abri offert par l'Irlande et la Cornouaille. Cet effet est probablement la cause de la surestimation aux Blancs Sablons le 30 avril 2004 (figure 4, droite).

L'utilisation des observations devrait permettre une prévision immédiate meilleure que les prévisions actuellement réalisées. A partir d'une fonction de transfert estimée entre le large et le site d'observation, il est possible de modifier sélectivement le spectre au large [16], corrigeant ainsi l'énergie et la largeur du spectre directionnel.

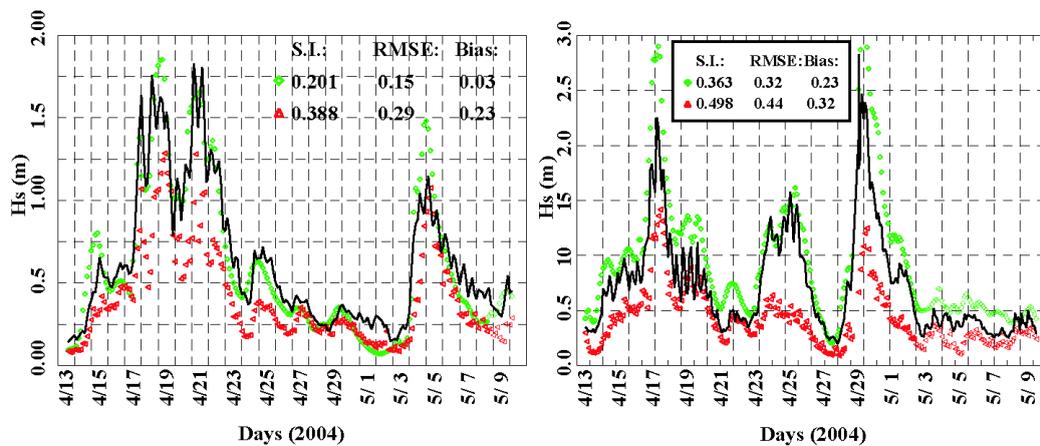


Figure 4. Comparaison des calculs de Hs aux observations des bouées ancrées dans l'anse de Bertheaume par 13 m de fond (à gauche) et devant la plage des blancs Sablons par 15 m de fond (à droite). En vert : calculs à partir des spectres prévus par WAVEWATCH III. En rouge : calcul à partir des spectres déduits des observations et supposés représentatifs de conditions uniformes au large.

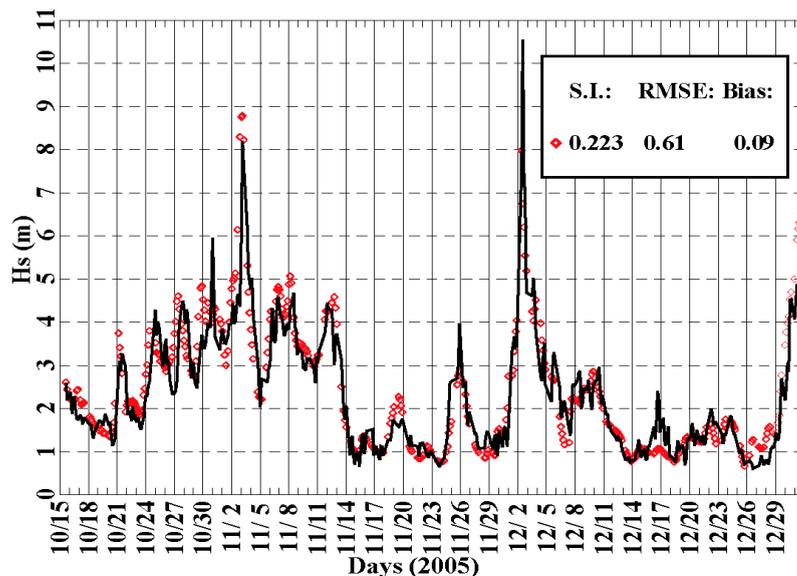


Figure 5. Comparaison des calculs de Hs (WAVEWATCH III forcé par CEPMMT + CRESTp) en rouge aux observations (en noir) de la bouée ancrée au sud-ouest des Pierres Noires (voir figure 2), transmises par le satellite Orbcomm. Il convient de préciser que les observations sont horaires et n'ont pas été moyennées contrairement aux figures précédentes.

Quelles mesures pour la prévision ?

Aux abords d'une côte découpée l'information directionnelle est déterminante pour obtenir le bon « éclairage » par le champ de vagues et les ombres portées par les îles et presqu'îles. Au vu de la faible qualité des modèles hauturiers sur le paramètre d'étalement directionnel, il est indispensable d'avoir des mesures directionnelles au large ou un grand nombre de mesures non-directionnelles dans des zones abritées différemment [16]. Afin d'utiliser les observations pour la prévision immédiate, un échantillonnage temporel de deux heures maximum est nécessaire, avec une précision meilleure que 20% pour le paramètre Hs (pour le cas du Finistère mais aussi des côtes Varoises [1]) afin d'espérer améliorer le modèle. Dans des zones où les prévisions sont moins bonnes, comme en Manche, une précision de 20% peut être suffisante. Enfin la disponibilité des données par tout temps est souhaitable. Les bouées houlographes directionnelles, telle que la Datawell Directional Waverider sont donc une réponse tout à fait adaptée. Une transmission par satellite Orbcomm a été évaluée pendant trois mois en mer d'Iroise et donne environ 18 spectres complets par jour, même par gros temps (figure 15), ce qui est une nette amélioration par rapport aux transmissions Argos. Toutefois, les bouées ont la fâcheuse habitude de dérader quand on en a besoin et le radar Haute Fréquence, techniquement capable de fournir une meilleure résolution directionnelle, est une alternative intéressante, pour les états de mer modérés. D'après les premiers essais réalisés en mer d'Iroise par la société Actimar, les radars HF fournissent une information fiable pour un intervalle $1.5 < H_s < 5$ m dans le cas d'une émission à sur une seule fréquence de 12 MHz, ce qui est cohérent avec d'autres études du même type [17]. Le radar en bande X (radar de navigation) est une autre possibilité de coût modéré mais dont la forte résolution directionnelle est combinée à une faible précision sur la hauteur des vagues.

Tous ces systèmes ne fournissent, malheureusement qu'une vision ponctuelle de l'état de la mer. Pour le radar HF, il reste à démontrer qu'il est capable de mesurer les gradients horizontaux du champ de vagues à l'échelle de la cellule de mesure radar (quelques kilomètres carrés). La seule alternative éprouvée pour valider la variation spatiale de l'état de la mer, outre l'utilisation d'un grand nombre d'instruments in situ, est le radar à synthèse d'ouverture (SAR), qui est encore largement sous-utilisé en zone côtière. Au vu de la répétitivité temporelle des mesures, même en comptant sur les nombreuses missions du futur, le SAR ne peut être utilisé que pour la validation et la vérification des prévisions. Des études préliminaires sur le traitement de quelques images en fauchée étroite fournies par ENVISAT ont permis de fournir des champs de spectres de vagues à une résolution de 2 km et sur une fauchée de 100 km, avec une bonne précision sur les principaux paramètres [18]. Ce type d'information est idéal pour une calibration de modèles dans des zones dominées par des houles longues, peu connues et difficile d'accès.

Conclusion

Il est tout à fait possible de faire des prévisions d'état de mer en zone côtière sans aucune observation, comme l'atteste le succès grandissant du site internet expérimental <http://surfouest.free.fr>, avec 900 visites (17000 hits) en moyenne par jour en octobre 2005, malgré le peu d'efforts fournis pour le rendre convivial. D'autres fournisseurs d'informations sur les vagues, utilisant des méthodes artisanales de prévision, font probablement encore mieux. L'amélioration de la prévision au large est encore possible, en particulier grâce à une plus grande utilisation de mesures directionnelles pour mieux contraindre l'étalement directionnel de l'état de mer. Il est clair que l'assimilation des mesures altimétriques dans les modèles océaniques a un impact beaucoup plus limité que l'utilisation de mesures spectrales [19]. En zone côtière l'importance de la mesure directionnelle est d'autant plus grande que la côte est découpée [16]. Ainsi l'utilisation de mesures in situ et de télédétection, en particulier radar par HF à terre et radar à synthèse d'ouverture, offre la possibilité d'améliorer les observations en donnant une répartition spectrale de l'énergie des vagues. Les mesures non - directionnelles permettent toutefois de diagnostiquer les biais dans les prévisions, contribuant ainsi à l'amélioration des modèles sur le moyen terme.

Remerciements

Le SHOM remercie l'ensemble des services de Météo-France et en particulier le Centre de Météorologie Marine pour la fourniture de mesures d'état de mer et de prévisions de vent, le NOAA/NCEP pour la collaboration sur le développement du modèle WAVEWATCH III et le CEPMMT pour les échanges fructueux sur les paramétrage de l'évolution de l'état de la mer.

David Corman, Michel Aidonidis, Eliette Ferré, Anne Courvoisier et Yves Pérignon ont contribué à ce travail.

Bibliographie

- [01] Ardhuin, F., 2005, Etat de la mer et dynamique de l'océan superficiel. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France.
- [02] Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P. A. E. M. 1994, "Dynamics and modelling of ocean waves." Cambridge: Cambridge University Press.
- [03] Ardhuin, F., Herbers, T. H. C., O'Reilly, W. C., Jessen, P. F., 2003, "Swell transformation across the continental shelf. part II: validation of a spectral energy balance equation," J. Phys. Oceanogr., vol. 33, pp. 1940–1953, 2003.
- [04] Sheremet, A., Stone, G. W., 2003, "Observations of nearshore wave dissipation over muddy sea beds," J. Geophys. Res., vol. 108, no. C11, p. 3357, doi:10.1029/2003JC001885.
- [05] Reniers, A. J. H. M., Roelvink, J. A., and Thornton, E. B., 2004, "Morphodynamic modeling of an embayed beach under wave group forcing," J. Geophys. Res., vol. 109, p. C01030, doi:10.1029/2002JC001586.
- [06] Feng, H., Vandemark, D., Chapron, B., Beckley, B., 2004, "Use of a global wave model to correct altimeter sea level estimates," proceedings of the 2004 IGARSS conference, Anchorage, Alaska, IEEE.
- [07] Chapron, B., Collard, F., Ardhuin, F., 2005, "Direct measurements of ocean surface velocity from space: interpretation and validation," J. Geophys. Res., vol. 110, no. C07008, doi:10.1029/2004JC002809.
- [08] Herbers, T. H. C., Burton, M. C., 1997, "Nonlinear shoaling of directionally spread waves on a beach," J. Geophys. Res., vol. 102, no. C9, pp. 21,101–21,114.
- [09] H. L. Tolman, 2002, "User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.2.2," Tech. Rep. 222, NOAA/NWS/NCEP/MMAB.
- [10] Ardhuin, F., Herbers, T. H. C., Watts, K. P., van Vledder, G. P., Jensen, R., Graber, H., 2006, "Swell and slanting fetch effects on wind wave growth," en revision pour J. Phys. Oceanogr., manuscript disponible à l'URL: <http://surfouest.free.fr/PAPERS/SHOWEX/>.
- [11] Janssen, P., Bidlot, J.-R., Abdalla, S., and Hersbach, H., 2005, "Progress in ocean wave forecasting at ECMWF," Tech. Rep. Memorandum 478, Research Department, ECMWF, Reading, U. K..
- [12] O'Reilly, W. C., Guza, R. T., 1993, "A comparison of two spectral wave models in the Southern California Bight," Coastal Eng., vol. 19, pp. 263–282.
- [13] Ris, R. C., Booij, N., Holthuijsen, L. H., 1999, "A third-generation wave model for coastal regions. 2. Verification," J. Geophys. Res., vol. 104, pp. 7,667–7,681.
- [14] Lygre, A., Krogstad, H. E., 1986, "Maximum entropy estimation of the directional distribution in ocean wave spectra," J. Phys. Oceanogr., vol. 16, pp. 2,052–2,060.
- [15] Peak, S. D., 2004, "Wave refraction over complex nearshore bathymetry," Master's thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- [16] O'Reilly, W. C., Guza, R. T., 1998, "Assimilating coastal wave observations in regional swell predictions. part i: inverse methods," J. Phys. Oceanogr., vol. 28, pp. 679–691.
- [17] Wyatt, L. R., 2000, "Limits to the inversion of HF radar backscatter for ocean wave measurement," J. Atmos. Ocean Technol., vol. 17, pp. 1651–1665.
- [18] Collard, F., Ardhuin, F., Chapron, B., 2005, "Extraction of coastal ocean wave fields from SAR images," IEEE J. Oceanic Eng., vol. 30, no.3.
- [19] Aouf, L., Lefèvre, J.-M., Hauser, D., 2006, "Assimilation of directional wave spectra in the Wave Model WAM: an impact study from synthetic observations in preparation of the SWIMSAT satellite mission," J. Atmos. Ocean Technol., vol. 23, sous presse.