



## Simulation rétrospective globale des vagues à haute résolution pour l'océan tropical

Axelle GAFFET <sup>1,2</sup>, Xavier BERTIN <sup>1</sup>, Damien SOUS <sup>3,4</sup>, Héloïse MICHAUD <sup>5</sup>

1. UMR 7266 LIENSs, CNRS-La Rochelle Université, 2 Rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle, France.  
[axelle.gaffet@univ-lr.fr](mailto:axelle.gaffet@univ-lr.fr)
2. Créocéan, La Rochelle, 17000, France.
3. Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S-UPPA, SIAME, 64600 Anglet, France.
4. MIO, Université de Toulon, Bâtiment F, 83130 La Garde, France.
5. SHOM, 42 Avenue Gaspard Coriolis, 31100 Toulouse, France.

### Résumé :

Le changement climatique engendre une élévation du niveau marin et une intensification des événements extrêmes qui augmentent les aléas, en particulier dans les zones littorales. Au niveau des îles tropicales, des submersions marines peuvent être induites par deux phénomènes : les cyclones et les houles distantes. La contribution des houles distantes aux submersions marines passées a longtemps été sous-estimée et peu étudiée mais l'importance de ce phénomène a été montré en Outre-mer (LECACHEUX *et al.*, 2012 ; CANAVESIO, 2019). Afin de mieux connaître ce phénomène, il est nécessaire de simuler correctement des houles distantes au niveau des îles tropicales. Actuellement, les simulations numériques rétrospectives disponibles ont une résolution spatiale de 20 à 50 km. Cette résolution trop grossière ne permet pas de représenter correctement la propagation des vagues au niveau des archipels, ni d'évaluer les performances des modèles près des côtes où les rares bouées houlographes sont situées à moins d'un km du rivage du fait des eaux profondes qui bordent les îles volcaniques. Pour pallier à ces limitations, une nouvelle simulation numérique rétrospective des vagues est réalisée, à l'aide du modèle spectral WavewatchIII®, forcée par les vents ERA5 et implémenté sur une grille non-structurée globale de 50 km de résolution au large, raffinée à 100 m à La Réunion et en Polynésie Française. Cette stratégie de modélisation ambitieuse et innovante permet d'obtenir des simulations de vague plus précises par rapport à ce qui est disponible, tout en conservant un temps de calcul raisonnable. Cette simulation numérique est validée à l'aide de données satellites disponibles et des observations de bouées.

### Mots-clés :

Modélisation numérique, Outre-mer, Houles longues australes, Wave setup, Submersions marines.

# Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

## 1. Introduction

Au cours des dernières décennies, les risques côtiers ont considérablement augmenté en raison du changement climatique, qui génère une élévation du niveau de la mer et une intensification des événements extrêmes qui peuvent entraîner des submersions marines (OPPENHEIMER *et al.*, 2019). Les submersions marines au niveau des îles tropicales sont causées par deux types d'événements météo-marins principaux : les cyclones et les houles distantes. Les houles distantes, contrairement aux cyclones, sont générées à plusieurs milliers de km de la bande tropicale par des tempêtes et se propagent ensuite jusqu'aux côtes des îles où elles peuvent générer une surcote liée à la dissipation des vagues appelée *wave setup* importante. La contribution des houles distantes aux submersions marines passées a longtemps été sous-estimée et peu étudiée mais l'importance de ce phénomène a été montré à la Réunion (LECACHEUX *et al.*, 2012) et en Polynésie Française (CANAVESIO, 2019).

Pour modéliser les houles distantes, il est nécessaire d'avoir un modèle couvrant l'ensemble des bassins océaniques, ce qui n'est réalisable qu'avec un modèle spectral. De plus, afin de représenter correctement les archipels constitués d'îles ne faisant que quelques km, une résolution fine est nécessaire. Afin de conserver des temps de calculs acceptables pour des simulations globales tout en représentant les îles, une technique de masque d'obstruction est classiquement utilisée (TOLMAN, 2003 ; MENTASCHI *et al.*, 2018) mais elle aboutit à de forts biais négatifs au niveau des archipels (DUTHEIL *et al.*, 2021). Afin de résoudre ce problème, l'utilisation de grilles non-structurées présente un potentiel intéressant puisqu'elles permettent de représenter de façon explicite les îles en raffinant localement le maillage. Jusqu'à présent, ces grilles n'ont été utilisées que pour des études locales (ROLAND, 2008 ; ROLAND & ARDHUIN, 2014), ou à l'échelle globale mais à des résolutions trop grossières pour effectuer des validations directes (BRUS *et al.*, 2021; MENTASCHI *et al.*, 2023), les bouées houlographiques étant en général situées à moins d'un km des côtes en raison des eaux profondes qui bordent les îles volcaniques. Afin de représenter correctement les houles distantes au niveau des îles tropicales, nous avons mis en place un modèle global avec un maillage non structuré d'une résolution de 50 km, raffiné au niveau des îles tropicales à environ 1 km, et jusqu'à 100 m à La Réunion et en Polynésie Française où des données de capteurs de pression sont disponibles très près de la côte. Cette étude se concentre sur la validation du modèle en eaux profondes avec des données satellites altimétriques.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1 Modèle

Pour modéliser les houles australes, le modèle spectral de vague Wavewatch III® (TOLMAN, 1991) est utilisé sur deux grilles : une régulière et une non-structurée. La grille régulière (par la suite SG pour *Structured Grid*) a une résolution uniforme de 0,5°

et le trait de côte et les îles sont représentés par un masque d'obstruction. La grille non structurée (par la suite UG pour *Unstructured Grid*) est constituée de 271 892 nœuds avec une résolution globale de 0,5°, raffinée au kilomètre au niveau des îles tropicales et à 100 m pour La Réunion et Moorea où des données de capteurs de pression sont disponibles très proche de la côte (Figure 1).

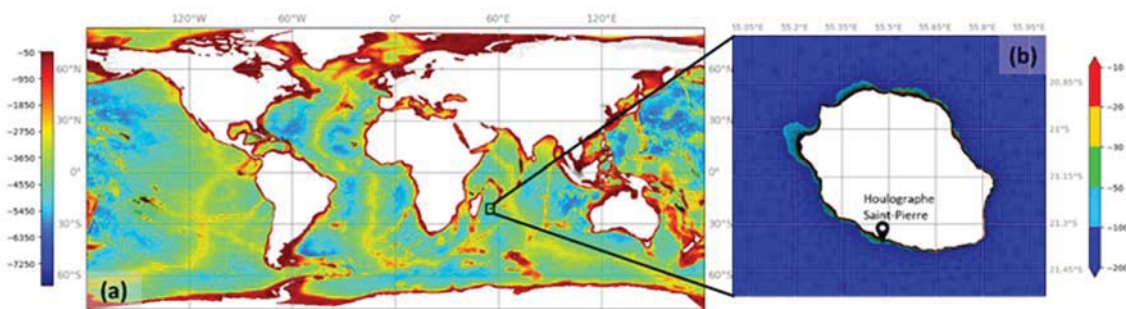


Figure 1. Maillage global de la grille non structurée (a) avec zoom sur le raffinement à la Réunion (b).

La bathymétrie globale est issue de GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans). Pour la UG, la bathymétrie est raffinée pour certaines îles (Réunion, Mayotte, Polynésie Française et Nouvelle-Calédonie) avec les MNT HOMONIM du SHOM.

La grille spectrale est constituée de 24 directions et 36 fréquences allant de 0,035 Hz à 1,01 Hz. Pour la SG, les pas de temps maximums utilisés sont : 1350 s en global, 450 s en géographique et 600 s en spectral. En UG, un schéma numérique implicite est utilisé ce qui permet de s'affranchir de la contrainte CFL. Un seul pas de temps est donc nécessaire : 1400 s.

### 2.1.1 Forçage atmosphérique et termes sources

Le modèle est forcé par les champs de vents et de glace provenant de la réanalyse ERA5 (HERSBACH *et al.*, 2020). Les champs de vent ERA5 sont connus pour être très précis mais présentent des biais négatifs pour les vents les plus forts (PINEAU-GUILLOU *et al.*, 2018). Pour remédier à ce problème, ALDAY *et al.*, (2021) ont proposé d'apporter une correction de 5% aux vents > 20m/s et une nouvelle paramétrisation des termes source dans WW3 où le paramètre Betamax, qui contrôle la croissance des vagues par le vent, est ajusté à 1.75. Nos premiers tests ont montré que cette approche permettait de bien reproduire les états de mer les plus énergétiques mais aboutissait à des biais positifs pour les conditions plus calmes. Etant donné que les vents ERA5 ne présentent pas de biais pour les vents faibles à modérés, nous avons développé une stratégie alternative, où les champs de vent sont corrigés selon une approche quantile/quantile en utilisant les champs de vents estimés à l'aide de radiomètres tels que décrits par BENTAMY *et al.*, (2012). Cette correction est nulle pour des vents allant jusqu'à 15 m/s mais atteint 7% pour les

## Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

vents à 20 m/s et 20% pour les vents à 25 m/s. La paramétrisation « Test471 » de RASCLE & ARDHUIN (2013) est utilisée pour les termes source de croissance par le vent et de dissipation par moutonnement, où le paramètre Betamax a été ajusté à 1.43.

### 2.2 Données satellites

Afin d'évaluer les performances du modèle en eaux profondes, les estimations de hauteurs significatives des vagues issues des données altimétriques ESA Sea State Climate Change Initiative (CCI) (PIOLLE *et al.*, 2022) sont utilisées.

## 3. Résultats

Pour évaluer les performances globales du modèle, l'impact du forçage atmosphérique est étudié puis l'impact de la discrétisation spatiale avec comparaisons des deux grilles.

### 3.1 Impact de la correction du vent

Les résultats issus de la paramétrisation T475 d'ALDAY *et al.*, (2021) sont comparés avec la paramétrisation proposée dans cette étude sur la grille SG (Figure 2). La simulation initiale avec le T475 a une NRMSE globale de 15,2% (SG) avec des zones d'erreurs plus importantes au niveau des archipels (Polynésie Française, Antilles, Maldives...) qui correspondent à une zone de forts biais négatifs. Avec la correction du vent et la nouvelle paramétrisation des termes sources selon l'approche quantile/quantile décrits par BENTAMY *et al.*, (2012), la simulation (SGcorr), a une NRMSE de 14,1% et des erreurs importantes subsistent au niveau des archipels. Le biais en SGcorr est diminué à -0.08 m alors qu'il était de 0.13 m en SG.

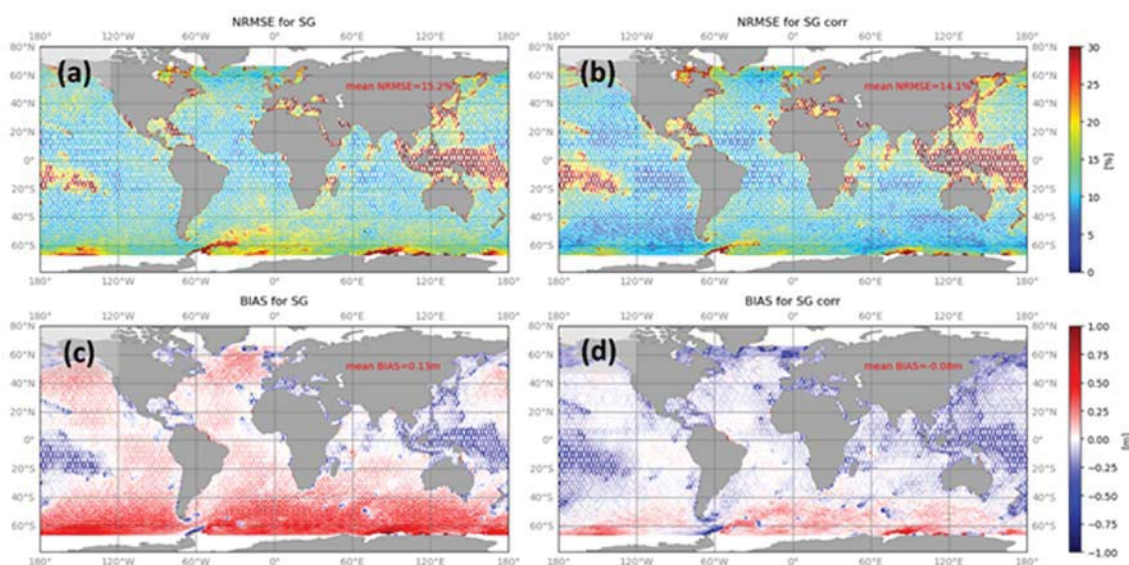


Figure 2. Erreur RMS normalisée (haut) et biais (bas) entre les  $H_s$  déduites de l'altimétrie et simulées avec la paramétrisation T475 (gauche) et avec la paramétrisation proposée dans cette étude (droite).

### 3.2 Impact de la discrétisation spatiale

Avec la grille UG, le vent corrigé et la nouvelle paramétrisation des termes sources, la NRMSE globale est de 12,9 % avec des erreurs plus faibles que dans la grille régulière au niveau des archipels (Figure 3). En calculant la NRMSE dans la zone tropicale, entre 20°N et 20°S, la NRMSE descend à 12,7 % en UG alors qu'elle augmente à 17% en SG. Dans le détail, les forts biais négatifs observés dans la grille SG au niveau des archipels et liés à l'utilisation de masques d'obstruction sont très fortement réduits dans la grille UG. Des erreurs plus importantes sont présentes au niveau des pôles et des mers semi-fermées, elles correspondent à des zones de forts biais négatifs. Avec la configuration grille UG et le vent corrigé, on obtient un biais moyen de 0,04 m avec des valeurs plus élevées au niveau des pôles.

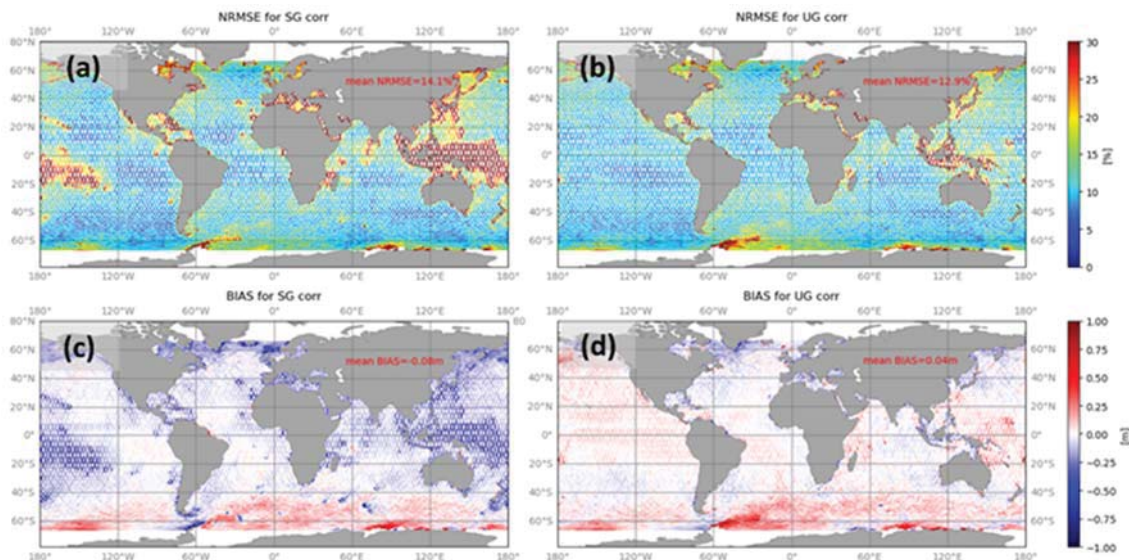


Figure 3. Erreur RMS normalisée (haut) et biais (bas) entre les Hs déduites de l'altimétrie et simulées sur la grille régulière (gauche) et non structurée (droite).

## 4. Discussion et conclusion

Les résultats obtenus montrent la capacité du modèle à bien représenter la génération et la propagation des vagues à l'échelle globale avec un pas de temps de calcul réduit. La correction du vent et la représentation explicite des îles améliorent considérablement les résultats, en particulier au niveau de la zone tropicale. Au niveau des pôles, des mers et autour des côtes, la NRMSE est plus importante, ce qui est probablement lié à la configuration du modèle qui ne prend pas en compte les courants, les icebergs et les phénomènes atmosphériques fins qui ne sont pas représentés dans ERA5. Par exemple, en Antarctique, la surestimation des Hs est probablement liée à la simplification de la propagation des vagues sur la glace qui ne prend pas en compte le vêlage et la dérive des icebergs qui bloquent l'énergie des vagues (ARDHUIN *et al.*, 2011) ainsi qu'à la difficulté d'obtenir des données altimétriques de hauteurs de vagues valides dans des

## Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

zones couvertes par la glace. Au niveau du canal du Mozambique, la non prise en compte du courant dans le modèle peut contribuer à augmenter les différences entre les hauteurs de vagues observées et modélisées (ALDAY *et al.*, 2021).

Les données satellites permettent de valider les performances du modèle au large et la résolution fine du maillage permet également de valider le modèle en eaux côtières avec des données *in-situ*. Par exemple à La Réunion, la bouée Candhis de Saint-Pierre, située au sud-ouest de l'île à 27 m de profondeur, permet d'évaluer les performances du modèle au niveau de la houle extrême de 2007 (Figure 4).

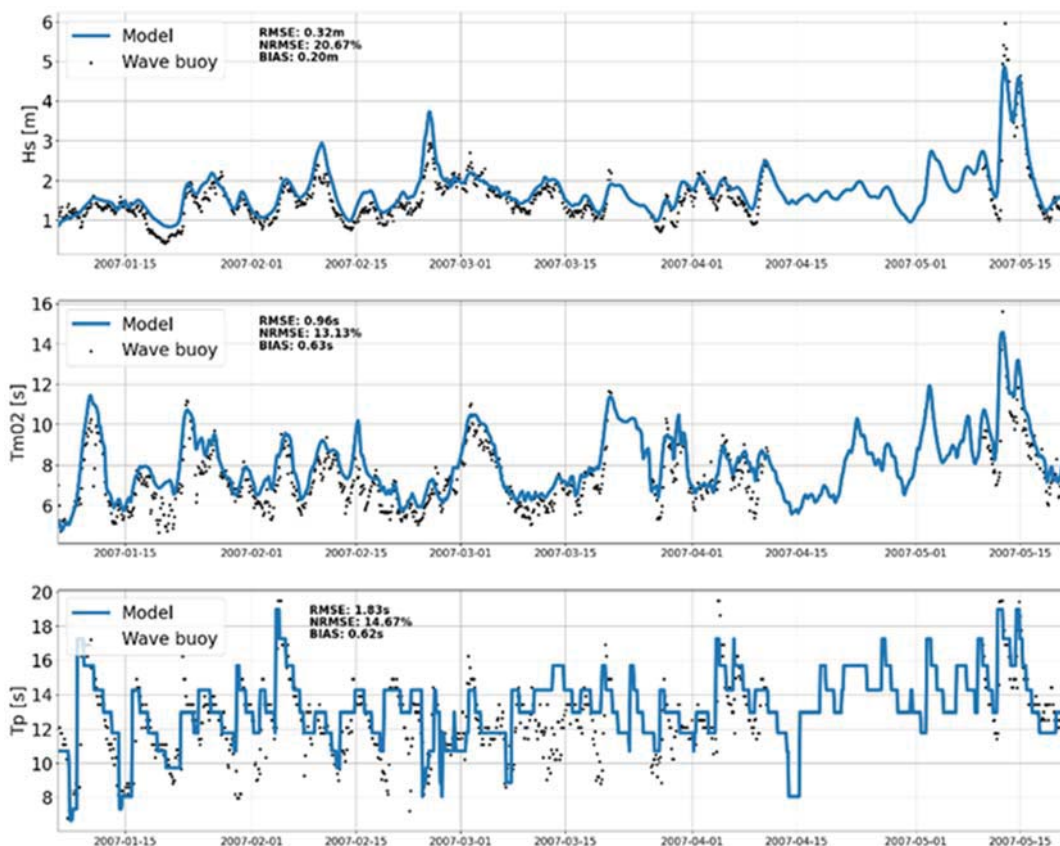


Figure 4. Comparaison du modèle avec une bouée Candhis à Saint-Pierre (La Réunion).

Les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus au large, ce qui met en évidence la capacité du modèle à représenter correctement les transformations des vagues du large aux eaux peu profondes. Cette nouvelle simulation rétrospective pourra être étendue sur 40 ans afin d'étudier, de façon similaire à la houle de 2007 à La Réunion, l'impact de l'ensemble des houles distantes passées sur les îles tropicales.

### Remerciements

Je tiens à remercier la Fondation de la Mer pour son soutien.

## 5. Références bibliographiques

- ALDAY M., ACCENSI M., ARDHUIN F., DODET G. (2021). *A global wave parameter database for geophysical applications. Part 3: Improved forcing and spectral resolution*. Ocean Modelling, 166, 101848. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2021.101848>
- ARDHUIN F., TOURNADRE J., QUEFFEULOU P., GIRARD-ARDHUIN F., COLLARD F. (2011). *Observation and parameterization of small icebergs: Drifting breakwaters in the Southern Ocean*. Ocean Modelling, 39(3–4), 405–410. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2011.03.004>
- BENTAMY A., CROIZE-FILLON D. (2012). *Gridded surface wind fields from Metop/ASCAT measurements*. International Journal Of Remote Sensing, 33(6), 1729–1754. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.600348>
- BRUS S.R., WOLFRAM P.J., VAN ROEKEL L.P., MEIXNER J.D. (2021). *Unstructured global to coastal wave modeling for the Energy Exascale Earth System Model using WAVEWATCH III version 6.07*. Geoscientific Model Development, 14(5), Article 5. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-2917-2021>
- CANAVESIO R. (2019). *Distant swells and their impacts on atolls and tropical coastlines. The example of submersions produced by lagoon water filling and flushing currents in French Polynesia during 1996 and 2011 mega swells*. Global and Planetary Change, 177, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.03.018>
- DUTHEIL C., JULLIEN S., AUCAN J., MENKES C., LE GENDRE R., ANDRÉFOUËT S. (2021). *The wave regimes of the Central Pacific Ocean with a focus on pearl farming atolls*. Marine Pollution Bulletin, 162, 111751. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111751>
- HERSBACH H., BELL B., BERRISFORD P., HIRAHARA S., HORÁNYI A., *et al.* (2020). *The ERA5 global reanalysis*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), Article 730. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- LECACHEUX S., PEDREROS R., LE COZANNET G., THIÉBOT J., DE LA TORRE Y., BULTEAU T. (2012). *A method to characterize the different extreme waves for islands exposed to various wave regimes: A case study devoted to Reunion Island*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 12(7), 2425–2437. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2425-2012>
- MENTASCHI L., KAKOULAKI G., VOUSDOKAS M., VOUKOUVALAS E., FEYEN L., BESIO G. (2018). *Parameterizing unresolved obstacles with source terms in wave modeling: A real-world application*. Ocean Modelling, 126, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.04.003>
- MENTASCHI L., VOUSDOKAS M., GARCIA-SANCHEZ G., MONTBLANC T.F., VOUKOUVALAS E., FEDERICO I., ABDOLALI A., ZHANG Y.J., FEYEN L. (2023). *A global unstructured, coupled, high-resolution hindcast of waves and storm surges*. 10.3389/fmars.2023.1233679
- OPPENHEIMER M., GLAVOVIC B. C., HINKEL J., VAN DE WAL R., MAGNAN A., *et al.* (2019). *Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and*

## Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

- communities*. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/08\\_SROCC\\_Ch04\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/08_SROCC_Ch04_FINAL.pdf)
- PINEAU-GUILLOU L., ARDHUIN F., BOUIN M.-N., REDELSPERGER J.-L., CHAPRON B., BIDLOT J.-R., QUILFEN Y. (2018). *Strong winds in a coupled wave–atmosphere model during a North Atlantic storm event: Evaluation against observations*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 144(711), 317–332. <https://doi.org/10.1002/qj.3205>
- RASCLE N., ARDHUIN F. (2013). *A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: Model validation with improved source term parameterization*. Ocean Modelling, 70, 174–188. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.12.001>
- ROLAND A. (2008). *Development of WWM II: Spectral wave modeling on unstructured meshes*. Thèse de doctorat, Université de Darmstadt.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10236-014-0711-z>
- TOLMAN H.L. (1991). *A Third-Generation Model for Wind Waves on Slowly Varying, Unsteady, and Inhomogeneous Depths and Currents*. Journal of Physical Oceanography, 21, 782–797. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021<0782:ATGMFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021<0782:ATGMFW>2.0.CO;2)
- TOLMAN H.L. (2003). *Treatment of unresolved islands and ice in wind wave models* *q*. Ocean Modelling, 5, 219–231.