



Caractérisation du climat de vagues le long des côtes de France métropolitaine: variabilité et tendances à long-terme

**Guillaume DODET¹, Xavier BERTIN², Frédéric BOUCHETTE³,
Fabrice ARDHUIN⁴, Bruno CASTELLE⁵, Romain CHAILAN⁶**

1. UMR 6554 LETG, Université de Bretagne Occidentale, CNRS, IUEM, rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France.
guillaume.dodet@univ-brest.fr
2. UMR 7266 LIENSS, CNRS, Université de La Rochelle, Institut Littoral et Environnement, 2 rue Olympe de Gouges, 17000 La Rochelle, France.
xavier.bertin@univ-lr.fr
3. UMR 5243 Géosciences Montpellier, CNRS, Université de Montpellier, campus Triolet, place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier, France.
frederic.bouchette@gmail.com
4. Univ. Brest, CNRS, IRD, Ifremer, Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (LOPS), IUEM, Rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France.
ardhuin@ifremer.fr
5. UMR 5805 EPOC, CNRS, Université de Bordeaux, Allée Geoffroy Saint-Hilaire, 33615 Pessac, France.
bruno.castelle@u-bordeaux.fr
6. IMAG, Université de Montpellier, CNRS, 34000 Montpellier, France.
romain.chailan@gmail.com

Résumé :

Cette étude propose de caractériser le climat de vagues le long des côtes de France métropolitaine à partir de sorties de modèles à haute résolution. Les observations issues du réseau national CANDHIS sont tout d'abord comparées aux sorties de modèles. Ces comparaisons révèlent une bonne capacité des modèles à reproduire les paramètres de vagues observés, avec toutefois des erreurs plus marquées en Méditerranée. Les valeurs moyennes annuelles et saisonnières des paramètres de vagues le long du littoral présentent une variabilité spatiale très marquée, qui dépend de l'exposition des côtes aux houles océaniques, de la présence d'îles à proximité des côtes et des forçages atmosphériques contrôlant les mers de vent. Finalement, les tendances des moyennes hivernales de hauteurs de vagues sont calculées sur la période 1994-2012. Ces tendances s'expliquent essentiellement par les fluctuations pluriannuelles de la circulation atmosphérique dans l'Atlantique Nord.

Mots-clés :

Climat de vagues, Variabilité saisonnière, Tendances pluriannuelles, Indices climatiques.

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

1. Introduction

Avec 5853 km de trait de côte le long de la Mer du Nord, de la Manche, de l'océan Atlantique et de la mer Méditerranée, le littoral de France métropolitaine est exposé à une large gamme de régimes de vagues. Or notre capacité à aménager ce littoral, prévenir les risques de submersion et d'érosion, prévoir les évolutions morphologiques ou encore exploiter l'énergie des vagues, dépend de notre compréhension du climat de vagues en zone côtière. Pour cela, les bases de données issues de simulations numériques rétrospectives permettent de compléter les observations in-situ et de caractériser précisément la variabilité des paramètres de vagues le long des côtes françaises. BENOIT & LAFON (2004) ont ainsi réalisé un atlas des vagues le long des côtes françaises, hors Méditerranée, à partir d'un rejeu de 25 ans (1979-2003) généré avec le modèle spectral TOMAWAC (BENOIT *et al.*, 1996). Ils ont ainsi pu déterminer les hauteurs de vagues extrêmes associées à une période de retour de 50 ans. Ces résultats ont été complétés par BERTIN & DODET (2010) qui ont réalisé des simulations rétrospectives de 56 ans (1953-2009) dans le Golfe de Gascogne à partir du modèle spectral WAVEWATCH III (WW3, TOLMAN *et al.*, 2014). Ces résultats de modèle ont notamment permis d'étudier l'influence de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) sur les tendances à long terme des hauteurs, périodes et directions des vagues. Dans cette étude, nous utilisons les résultats de deux simulations rétrospectives à haute résolution réalisées sur la façade Atlantique (incluant Mer du Nord et Manche) et sur la façade Méditerranéenne, afin de comparer les performances des modèles dans ces régions et de caractériser le climat de vagues, en terme de moyennes annuelles et saisonnières, le long de l'ensemble des côtes de France métropolitaine.

2. Méthodes

Afin d'étudier la variabilité du climat de vagues le long des côtes françaises, nous avons exploité les résultats de simulations rétrospectives (1994-2012) sur les façades Atlantique et Méditerranéenne (figure 1). Ces résultats ont été obtenus à partir du modèle spectral WW3 V4.18 (ROLAND & ARDHUIN 2014) implémenté sur des grilles non-structurées et raffinées à la côte, permettant ainsi de bien reproduire l'évolution du champ de vagues en zone côtière (figure 2). Pour la façade Atlantique, nous avons utilisé le rejeu HOMERE (BOUDIERE *et al.*, 2013) qui couvre le Golfe de Gascogne et la Manche. Ce modèle est forcé par les champs de vent issus de la réanalyse CFSR d'une résolution allant de 0.25° à 0.5° (SAHA *et al.*, 2010) et par les courants de surface générés à partir d'un atlas de constituants harmoniques de marée obtenus à partir de sorties du modèle de circulation MARS (LAZURE & DUMAS, 2008). Pour la façade Méditerranéenne, nous avons utilisé le rejeu MEGAGOL (CHAILAN, 2015) qui s'étend du Déroit de Gibraltar jusqu'au sud de l'Italie. Ce modèle est forcé par les champs de vents issus de la réanalyse ARPERA d'une

résolution de 50 km (HERRMANN & SOMOT, 2008) et par les courants de surface issus de la réanalyse NEMOMed8 (BEUVIER *et al.*, 2010) d'une résolution de 10 km.

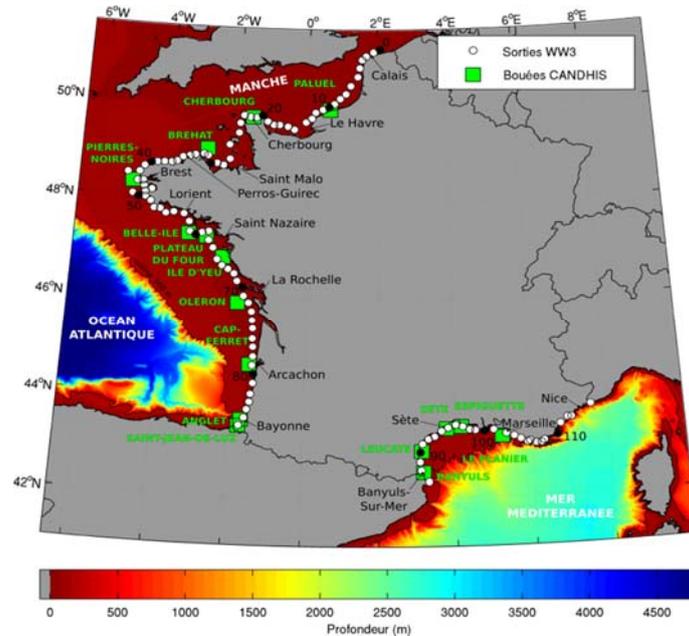


Figure 1. Carte bathymétrique et localisation des sorties de modèles (ronds blancs) et des bouées utilisées pour la validation des modèles (carrés verts).

Pour cette étude, nous avons uniquement utilisé les données disponibles sur la période de simulation commune à ces deux rejoues, c'est-à-dire de janvier 1994 à décembre 2012. Pour obtenir plus d'informations concernant l'implémentation et la paramétrisation de ces modèles, le lecteur peut se référer à ROLAND & ARDHUIN (2014) et CHAILAN (2015). Afin de comparer les résultats de ces modèles, nous avons utilisé les données du Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ (CANDHIS), prétraitées et mises à disposition par le CEREMA. Les 16 sites sélectionnés correspondent aux stations de suivi à long-terme déployées le long des côtes françaises, ayant enregistré des données avant 2012 (figure 1). Les paramètres étudiés sont la hauteur significative des vagues (H_s), la direction moyenne (θ_m) et la période moyenne (T_{02}). Trois paramètres statistiques ont été retenus pour valider les performances des modèles : le biais (moyenne modèles – moyenne données) normalisé par la moyenne des données, l'erreur quadratique moyenne normalisée par la moyenne des données (EQMN) et le coefficient de corrélation au carré (aussi appelé coefficient de détermination, R^2). Pour la direction moyenne des vagues, nous avons utilisé le biais et l'erreur quadratique moyenne (EQM). Ces statistiques ont été calculées sur des valeurs moyennées sur 2 heures.

3. Résultats

3.1 Validation

La figure 3 représente les erreurs statistiques associées aux comparaisons entre les modèles et les observations, pour les paramètres H_s , T_{02} , et θ_m . Pour H_s , les biais normalisés sont compris entre -30 % et 10 %, les EQMN sont comprises entre 12 % et 45 %, et les R^2 sont compris entre 0.79 et 0.96. En moyenne, les performances des modèles sont bonnes (biais normalisé = 9.3 %, EQMN = 23.6 %, $R^2 = 0.90$), mais on observe toutefois des différences importantes entre les résultats du modèle Atlantique (NB = 4.6 %, EQMN = 16.5 %, $R^2 = 0.94$) et du modèle Méditerranée (biais normalisé = 19.5 %, EQMN = 39.3 %, $R^2 = 0.82$). On peut aussi noter que le modèle Méditerranée sous-estime significativement les H_s .

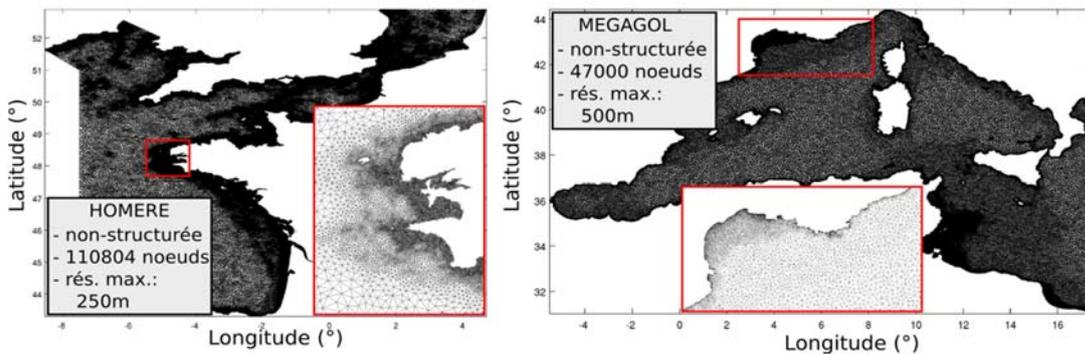


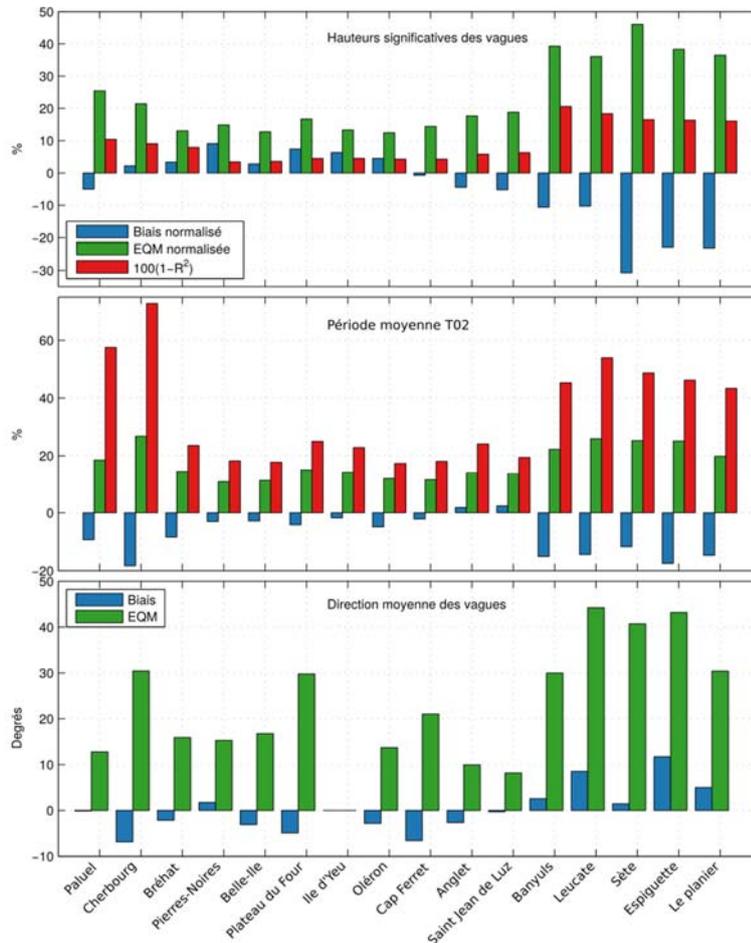
Figure 2. Maillages non-structurés des jeux HOMERE, sur la façade Atlantique (à gauche) et MEGAGOL, sur la façade Méditerranéenne (à droite).

Pour T_{02} , les biais normalisés sont compris entre -19 % et 3 %, les EQMN sont comprises entre 10 % et 27 % et les R^2 sont compris entre 0.27 et 0.83. Pour ce paramètre également, les performances des modèles sont bonnes en moyenne (biais normalisé = 8.3 %, EQMN = 17.6 %, $R^2 = 0.65$) mais avec des disparités fortes entre Atlantique (NB = 4.6 %, EQMN = 14.8 %, $R^2 = 0.70$) et Méditerranée (NB = -14.7 %, EQMN = 23.7 %, $R^2 = 0.57$). On notera cependant que les performances du modèle Atlantique sont nettement inférieures dans la Manche avec les coefficients de déterminations les plus bas aux bouées Paluel ($R^2 = 0.42$) et Cherbourg ($R^2 = 0.27$).

Pour θ_m , les biais sont compris entre -7° et 12° , et les EQM sont comprises entre 8° et 45° . Encore une fois, les performances sont relativement bonnes en moyennes (biais = 4° et EQM = 24°), avec toutefois des erreurs plus importantes avec le modèle Méditerranée (biais = 6° , EQM = 38°) qu'avec le modèle Atlantique (biais = 3° , EQM = 17°). Ces différences entre les performances des deux modèles s'expliquent essentiellement par les champs de vents utilisés et l'ajustement des paramètres du modèle (RASCLE & ARDHUIN, 2013).

3.2 Climat de vagues

Afin d'étudier la variabilité spatiale du climat de vague le long du littoral français, nous avons représenté sur la figure 4 les valeurs moyennes annuelles, hivernales (DJFM) et estivales (JJAS) des paramètres H_s , T_{02} et θ_m pour 114 points du modèle se trouvant sur l'isobathe 30 m et espacés d'une vingtaine de kilomètres (cf. figure 1). Cette figure permet d'identifier plusieurs zones aux régimes de vagues bien distincts. De Calais à Cherbourg, les statistiques sont relativement homogènes, avec des H_s annuelles inférieures à 1.5 m, des T_{02} inférieures à 4 s et des θ_m de secteur NO. De Cherbourg à Saint Nazaire, les statistiques sont très hétérogènes, du fait du découpage fortement marqué du littoral et de la présence de nombreuses îles à proximité des côtes. Les H_s annuelles varient entre 0.5 m et 2.5 m, les T_{02} annuelles varient entre 3 s et 7 s et les θ_m annuelles varient du secteur SO (au sud de la Bretagne) au secteur NO (au nord de la



Bretagne).

Figure 3. Biais normalisés, erreurs quadratiques moyennes normalisées (EQMN) et coefficients de détermination R^2 (sous la forme $100(1-R^2)$) pour H_s (en haut) et T_{02} (au milieu). Biais et erreurs quadratiques moyennes (EQM) pour θ_m (en bas).

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

De Saint-Nazaire à Bayonne, les statistiques sont de nouveaux relativement homogènes et représentatives d'un climat dominé par les houles océaniques, avec des H_s annuelles supérieures à 1.5 m, des T_{02} annuelles supérieures à 5 s et des θ_m annuelles de secteurs OSO à ONO. En Méditerranée, les hauteurs de vagues et périodes moyennes annuelles sont plus faibles que sur le reste du littoral français ($H_s < 1$ m et $T_{02} < 4$ s), et les directions des vagues sont comprises entre les secteurs ENE et SSO.

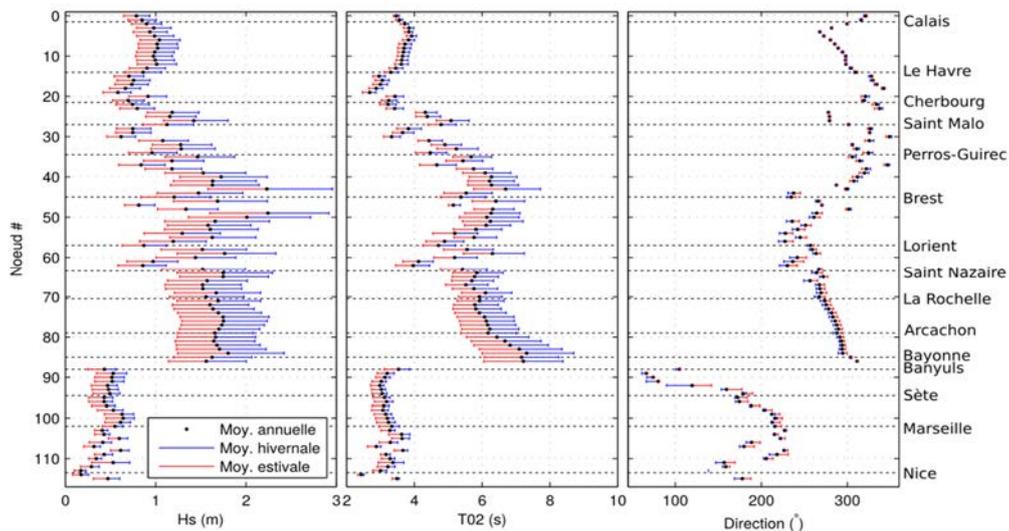


Figure 4. Moyennes annuelles, estivales (JJAS) et hivernales (DJFM) des hauteurs significatives (à gauche), périodes moyennes (au milieu) et directions moyennes (à droite) des vagues le long du littoral de France métropolitaine.

L'amplitude des variations saisonnières présente également une forte disparité spatiale. Les plus fortes variations saisonnières de H_s et T_{02} sont observées le long des côtes les plus exposées de la mer d'Iroise et du Golfe de Gascogne. Au contraire, en Manche et en Méditerranée, la saisonnalité de H_s et T_{02} est moins marquée. En effet, en Manche comme en Méditerranée, les mers de vent dominant plus fortement les états de mer (d'où les faibles valeurs de T_{02}). Or la variabilité saisonnière des paramètres de vagues est fortement contrôlée par la variabilité saisonnière de la circulation atmosphérique, qui elle influence essentiellement les houles océaniques. On note cependant une différence importante entre la saisonnalité des directions de vagues, quasi-inexistante en Manche et nettement plus marquée en Méditerranée. En été, les trajectoires des dépressions de l'Atlantique sont décalées vers le nord et n'atteignent plus la Méditerranée. Le régime de vagues y est alors essentiellement contrôlé par les phénomènes atmosphériques locaux, pouvant seuls expliquer la plus forte variabilité saisonnière de la direction incidente des vagues.

Finally, we analyzed the trends in H_s along the French coast over the 18 years (1994-2012) covered by the wave parameter rejections (figure 5). These trends are negative along the Atlantic coast and positive along the Mediterranean coast. It is important to note that the interannual variability of the climate of waves is very strongly controlled by the oscillations of the atmospheric circulation represented by climate indices such as the North Atlantic Oscillation (ONA) or the West Europe Pressure Anomaly (WEPA) described by CASTELLE *et al.* (2017). Over the period 1994-2012, the indices ONA and WEPA show a negative trend (-0.0001 and -0.0003 respectively). However, we observe that the winter averages of H_s are positively correlated with the indices ONA and WEPA on the Atlantic coast, while they are negatively correlated with the index ONA on the Mediterranean coast. Thus, the trends observed on these two maritime coasts are primarily explained by interannual modulations of the atmospheric circulation in the North Atlantic.

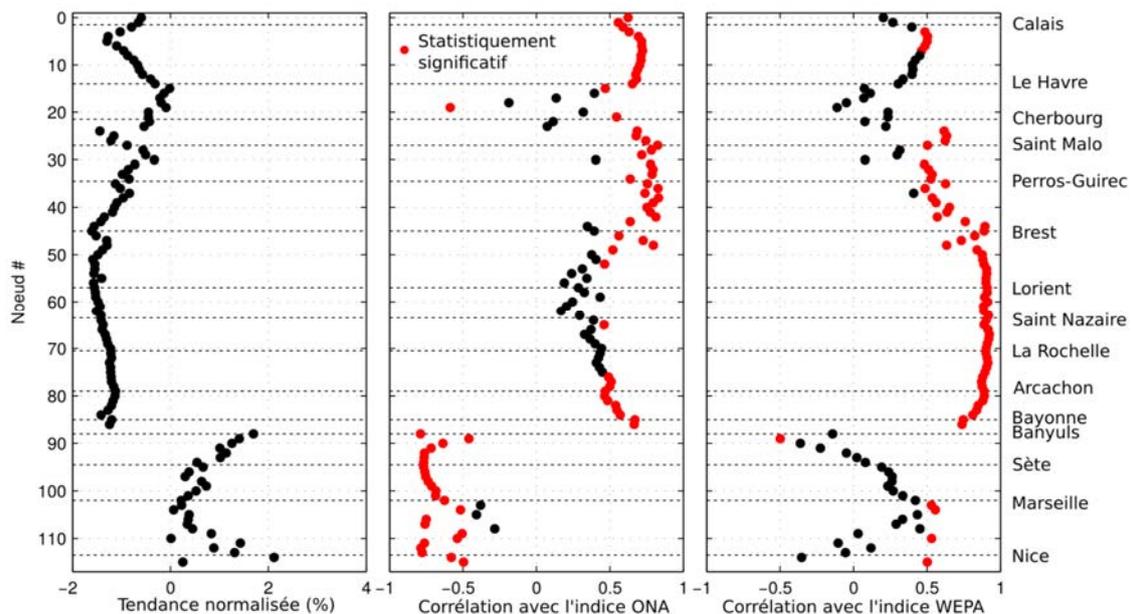


Figure 5. Tendances des moyennes hivernales de hauteurs significatives des vagues sur la période 1994-2012 (à gauche), corrélations des moyennes hivernales de hauteurs significatives des vagues avec l'indice ONA (au milieu) et avec l'indice WEPA (à droite) le long du littoral de France métropolitaine.

4. Conclusion

In this study, we analyzed a database of wave parameters along the French metropolitan coast over the period 1994-2012. These data are from two retrospective simulations performed with the spectral model WAVEWATCHIII implemented on high-resolution unstructured grids for

Thème 1 – Hydrodynamique côtière

l'Océan Atlantique et la Mer Méditerranée. Les comparaisons des sorties de modèle avec des données *in-situ* ont révélé de bonnes performances des modèles avec toutefois des erreurs plus importantes en Méditerranée. Ces erreurs sont probablement liées au forçage atmosphérique et à la paramétrisation utilisée dans le modèle Méditerranée, et nécessitent d'être étudiées plus en détail. L'analyse des moyennes annuelles et saisonnières a permis de mettre en avant la forte diversité des régimes de vagues le long du littoral métropolitain, qui s'explique par le découpage côtier et les différents forçages atmosphériques impliqués dans la génération de mers de vent. Finalement, les tendances observées sur la période 1994-2012 sont essentiellement contrôlées par les fluctuations pluriannuelles de la circulation atmosphérique dans l'océan Atlantique Nord.

5. Références bibliographiques

- BENOIT M., MARCOS F., BECQ F. (1996). *Development of a third generation shallow-water wave model with unstructured spatial meshing*. Coastal Engineering Proceedings, pp 465-478.
- BENOIT M., LAFON F. (2004). *A Nearshore wave atlas along the coasts of France based on the numerical modeling of wave climate over 25 years*. Proceedings of the Coastal Engineering Conference, pp 714-726.
- BEUVIER J., SEVAULT F., HERRMANN M., KONTOYIANNIS H., LUDWIG W., RIXEN M., STANEV E., BÉRANGER K., SOMOT S. (2010). *Modeling the Mediterranean Sea interannual variability during 1961–2000: Focus on the Eastern Mediterranean Transient*. Journal of Geophysical Research. <https://doi.org/10.1029/2009JC005950>
- BOUDIÈRE E., MAISONDIEU C., ARDHUIN F., ACCENSI M., PINEAU-GUILLOU L., LEPESQUEUR J. (2013). *A suitable metocean hindcast database for the design of Marine energy converters*. International Journal of Marine Energy, Special Issue, Selected Papers, EWTEC2013 3–4, e40–e52. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2013.11.010>
- CASTELLE B., DODET G., MASSELINK G., SCOTT T. (2017). *A new climate index controlling winter wave activity along the Atlantic coast of Europe: the West Europe Pressure Anomaly*. Geophys. Res. Lett. <https://doi.org/10.1002/2016gl072379>
- CHAILAN R. (2015). *Application of scientific computing and statistical analysis to address coastal hazards*. Thèse de doctorat de l'Université Montpellier 2.
- HERRMANN M.J., SOMOT S. (2008). *Relevance of ERA40 dynamical downscaling for modeling deep convection in the Mediterranean Sea*. Geophysical Research Letter, Vol. 35, L04607. <https://doi.org/10.1029/2007GL032442>
- 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, Vol. 31, pp 233–250. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.06.010>

XV^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil
La Rochelle, 29 au 31 mai 2018

RASCLE N., ARDHUIN F. (2013). *A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: Model validation with improved source term parameterization.* Ocean Modelling, Vol. 70, pp 174-188. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.12.001>

ROLAND A, ARDHUIN F. (2014). *On the developments of spectral wave models: numerics and parameterizations for the coastal ocean.* Coastal Dynamics, Vol. 64, pp 833-846.

<https://doi.org/10.1007/s10236-014-0711-z>

SAHA S., *et al.* (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Bulletin of the American Meteorological Society, Bulletin of the American Meteorological Society.

<https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>

TOLMAN H. L. - and the WAVEWATCH III Development Group. (2014). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 4.18.* NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 316 194.

Thème 1 – Hydrodynamique côtière