



HYWAT : 45 années de rejou de marée, surcote et états de mer à haute résolution sur les côtes françaises atlantiques. Application aux risques de submersion côtière à Saint Malo

**Héloïse MICHAUD¹, Léo SEYFRIED^{1,2}, Audrey PASQUET¹,
Fabien LECKLER^{3,4}, Guiomar LOPEZ^{3,5}, Laurent LEBALLEUR³,
Fabien BROSSE¹, Yann KRIEN⁶, Marc PEZERAT³, Thomas FAIDHERBE³**

1. Shom, 42 Avenue Gaspard Coriolis, 31100 Toulouse, France.
heloise.michaud@shom.fr
2. Exail robotics SAS, 262 Rue des Frères Lumière, 83130 La Garde, France.
3. Shom, 13 rue du Chatelier, 29200 Brest, France.
4. France Energies Marines, 25 Avenue Alexis de Rochon, 29280 Plouzané, France.
5. Socib, Parc Bit, Palma de Mallorca, 07122, Espagne.
6. Université de Toulouse, LEGOS (CNES/CNRS/IRD/UT3), 31400 Toulouse, France.

Résumé :

La côte atlantique française, exposée aux tempêtes extratropicales pouvant être responsables de surcotes et d'états de mer extrêmes, est largement vulnérable au risque de submersion marine, surtout lors de grandes marées. A Saint-Malo, dont le littoral est soumis à un très fort marnage, on dénombre plus d'une quarantaine d'épisodes de submersion ces 3 derniers siècles. Pour approfondir la compréhension de ces épisodes, l'utilisation de rejeu numérique est souvent requise pour compléter les observations parcellaires, locales et limitées dans le temps. Un rejeu de 45 ans (1979-2023) de marée, surcote et états de mer a été réalisé s'appuyant sur les configurations atlantiques françaises des modèles HYCOM et Wavewatch III ® utilisées dans le système de prévision opérationnel français. Les résultats de ces simulations montrent une représentation satisfaisante des surcotes et des états de mer. Une analyse multivariée des marées, des surcotes et des états de mer a été effectuée pour déterminer les périodes de retour conjointes de la hauteur d'eau statique et des vagues à Saint-Malo. Cette étude a permis de caractériser les conditions météo-marines propices aux submersions afin d'établir de nouveaux seuils d'alerte plus adaptés à la région. Ce rejeu dénommé HYWAT pour HYdrodynamics and WAVes hindcasT est libre d'accès et diffusé sur ces sites : https://doi.org/10.17183/REJEUX_HYWAT et, https://diffusion.shom.fr/oceanographie/rejeux/rejeux_climatologiques_1979-2022_de_marees_surcotes_et_vagues_sur_la_facade_atlantique.html

Mots-clés :

Rejeux, Modélisation, Statistique, Submersions marines, Surcote, Vagues.

Thème 6 – Risques côtiers

1. Introduction

Le littoral malouin, soumis à un marnage maximal d'environ 13.50m est particulièrement sensible aux aléas de submersion marine : 40 épisodes de submersion ont été identifiés entre 1703 et 2010, dont 8 depuis 1979 (SEYFRIED & MICHAUD, 2021). Pour approfondir la compréhension des phénomènes passés et pour compléter des observations parcellaires, locales et limitées dans le temps, un rejeu de vagues, surcotes et marées reproduisant les 45 dernières années depuis 1979 a été réalisé. Ce rejeu réalisé dès 2020 pour les besoins du Programme d'Actions pour la Prévention des Inondations (PAPI) de Saint-Malo, avait l'originalité de combiner le modèle de surcote et marée au modèle de vague, ce qui lui permet de calculer des statistiques multivariées sur les périodes de retour conjointes de hauteurs d'eau statiques et des vagues. Dans une région où la marée est l'une des conditions majeures pour qu'il y ait des risques de submersion, ce type de statistique est crucial. Nous présenterons dans cet article le rejeu, les méthodes de validation et statistiques dans la partie 2, ses performances à l'échelle régionale et à St Malo dans la partie 3 et enfin son utilisation pour l'étude des risques de submersion dans une dernière partie.

2. Modèles, observations et méthodologie

2.1 Modèles et rejeux

Le rejeu HYWAT est basé sur le modèle d'état de mer Wavewatch III ® (WW3 v5.16, TOLMAN *et al.*, 2016) et le modèle hydrodynamique HYCOM (BARAILLE & FILATOFF, 1995) dans sa version barotrope. Ces configurations ont été développées dans le cadre du projet HOMONIM (Historique Observation MOdélisation des Niveaux Marins, JOURDAN *et al.*, 2020), par le Shom (MICHAUD *et al.*, 2015, PASQUET, 2016) en collaboration avec Météo France.

La configuration du rejeu de vague s'appuie sur la paramétrisation physique correspondant au TEST 471 (LECKLER *et al.*, 2013) avec le terme β_{max} fixé à 1.52. La grille utilisée est un maillage non structuré de 92757 nœuds de calcul couvrant la façade Atlantique-Manche, avec une résolution allant de 10 km aux frontières ouvertes du domaine et s'affinant jusqu'à 400-500 m à la côte. Elle est forcée au large par un rejeu global du même modèle de vagues, avec une résolution de 0,5°. Enfin, cette configuration intègre un forçage de hauteur d'eau et de courant barotrope issus du modèle hydrodynamique HYCOM, toutes les 12 min. Le spectre des vagues est discrétisé en 24 directions et 32 fréquences entre 0.0373 et 0.7159 Hz.

Les courants et les hauteurs d'eau sont calculés par HYCOM, modèle à différences finies avec discrétisation sur une grille C d'Arakawa, dans le formalisme barotrope. La dynamique est modélisée sur une grille curviligne couvrant de 43°N à 62°N en latitude et de 9°W à 10°E en longitude, avec une résolution inférieure au kilomètre sur la côte. Tout

comme pour WW3, les configurations développées se basent sur les MNT de résolution 500 m et 100 m réalisés dans HOMONIM (BISCARA *et al.*, 2014). Le modèle est forcé aux frontières en élévation de surface par l'atlas de marée NEA 2011 du LEGOS comprenant 15 composantes harmoniques. Le frottement de fond choisi est spatialement variable (BOUTET, 2015). A la surface, les modèles sont forcés par les champs de vent à 10 m et de pression (seulement pour HYCOM) issus de la réanalyse atmosphérique du centre européen ECMWF, ERA5 (HERSBACH *et al.*, 2023).

2.2 Observations

Les mesures des vagues, marée et surcotes des réseaux permanents CANDHIS (Cerema) et REFMAR (Shom) sont utilisées pour valider le rejeu. Pour avoir un aperçu de la performance du modèle de marée loin de la côte, nous avons comparé les harmoniques de marée calculées avec les données de constantes de marée fournies par le processeur X-TRACK. Ce produit distribué par le CTOH du LEGOS a été obtenu en utilisant toute la période TOPEX/Poséidon, Jason-1 et Jason-2 (BIROL *et al.*, 2017). La base de données du CERSAT (Ifremer) a été utilisée pour calibrer et valider les simulations de vagues sur la période 1991-2017. Elle comprend les mesures altimétriques d'ENVISAT, ERS1/2, TOPEX, JASON ½, Saral et GFO, mesures qui ont été inter-calibrées et corrigées.

2.3 Méthodes statistiques

La capacité du rejeu de vague, marée et surcote à reproduire les mesures des réseaux permanents en zone côtière a été évaluée à l'aide de statistiques descriptives classiques sur les séries temporelles de divers paramètres (biais, erreur absolue moyenne (MAE), erreur quadratique moyenne (RMSE), indice de dispersion (SI), coefficient de corrélation R^2). Pour les comparaisons altimétriques, pour chaque valeur de hauteur significative (H_s) donnée par chacun des altimètres, la valeur de $H_{s,mod}$ colocalisée sous la trace du satellite au même moment est extraite des résultats du modèle.

Les performances du rejeu à reproduire les valeurs extrêmes ont été évaluées à l'aide de plusieurs méthodes d'ajustements paramétriques appliquées sur des événements extrêmes sélectionnées via un échantillonnage en considérant le 99^e percentile comme seuil (via une méthode POT: Peak Over Threshold) et une fenêtre temporelle de 12 heures pour séparer les événements indépendants (Figure 1):

- Méthode directe univariée : La fonction de répartition des extrêmes est définie par une loi paramétrique de Pareto généralisée (GPD), telle que :

$$F_X^{GPD}(x > u_{pot}) = 1 - (1 + \xi \frac{x}{\sigma})^{-1/\xi} \quad (1)$$

avec u_{pot} la valeur seuil, ξ le paramètre de forme et σ le paramètre d'échelle. Les paramètres de la loi sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance (MLE).

Thème 6 – Risques côtiers

- Méthode par convolution : utilisée pour évaluer les périodes de retour de la hauteur d'eau statique (marée astronomique et surcote). La fonction de répartition de la marée est obtenue de manière empirique. Pour les surcotes, la partie sous le seuil est estimée de manière empirique et celle au-dessus par méthode directe univariée. La fonction de répartition de la hauteur d'eau est déduite de la convolution des fonctions de distributions des marées et des surcotes, considérant que ces signaux sont indépendants, telle que : $F_z = F_x * F_y$

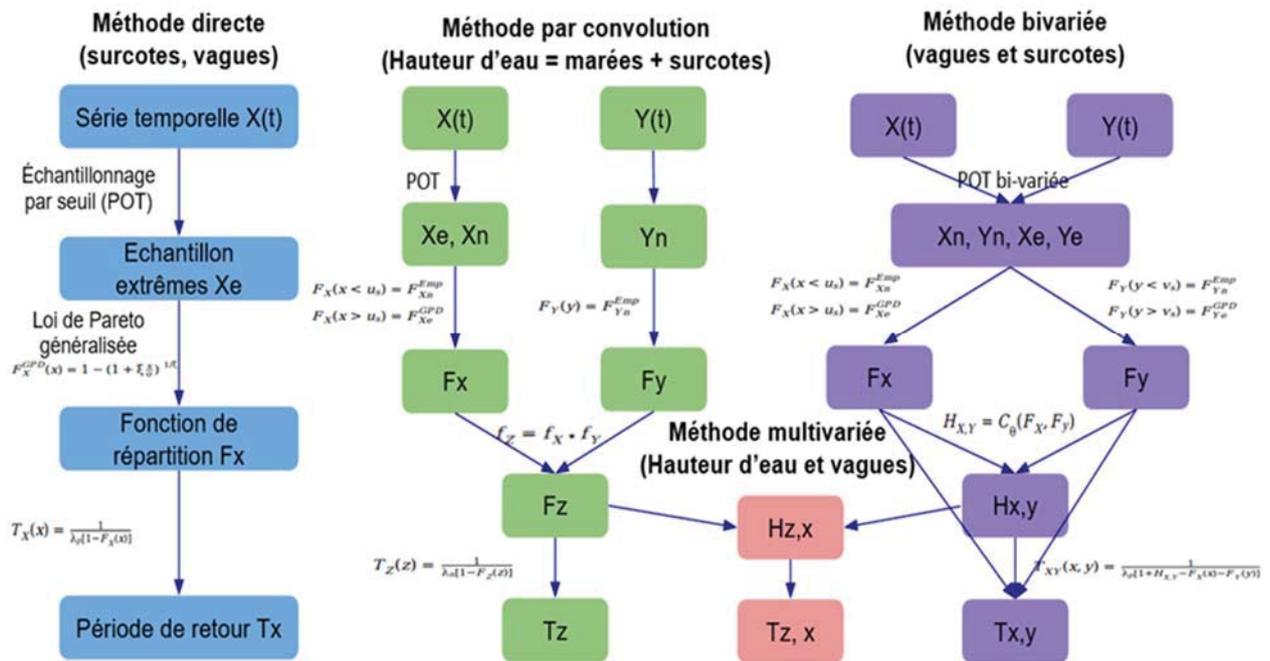


Figure 1. Méthodes statistiques des valeurs extrêmes utilisées.

- Méthode bivariée par copule : Les valeurs extrêmes de surcotes atmosphérique et de la Hs des vagues sont extraites par méthode POT bi-variée. Les fonctions de répartition sont ensuite calculées indépendamment pour chaque variable. Elles sont estimées de manière empirique pour la partie sous le seuil et par méthode directe univariée pour la partie au-dessus du seuil. Pour prendre en compte la dépendance entre les deux signaux, on utilise une fonction de répartition conjointe. Cette fonction peut être obtenue à l'aide d'une copule tel que :

$$H_{X,Y}(x, y) = C(F_X(x), F_Y(y)) \quad (2)$$

avec $H_{x,y}$ la fonction de répartition conjointe, et C la copule. Pour cette application, nous avons considéré une copule de Gumbel-Hougaard (FRAHM *et al.*, 2005).

- Méthode multivariée : utilisée pour évaluer les périodes de retour conjointes de la hauteur d'eau statique et de la Hs des vagues. Les fonctions de répartition indépendante et conjointe des surcotes et de la Hs des vagues sont obtenues par méthode bivariée par copule, tandis que la fonction de répartition de la hauteur d'eau statique est obtenue par

convolution. La fonction de répartition conjointe de la Hs des vagues et de la hauteur d'eau est obtenue par convolution bidimensionnelle.

Les périodes de retour sont estimées à partir des fonctions de répartition obtenues à partir des différentes méthodes d'ajustements paramétriques.

3. Validation des rejeux

3.1 Validations régionales et à Saint Malo de la marée, surcote et vagues

Nous présentons ici les résultats à l'échelle régionale et sur Saint Malo (le niveau d'eau et la Hs étant respectivement regardés dans le rejeu climatologique au marégraphe de Saint-Malo et à la bouée 02202). Les valeurs aux autres sites des réseaux permanents sont présentées dans SEYFRIED & MICHAUD (2021), LOPEZ *et al.*, (2021), LEBALLEUR & MICHAUD (2023).

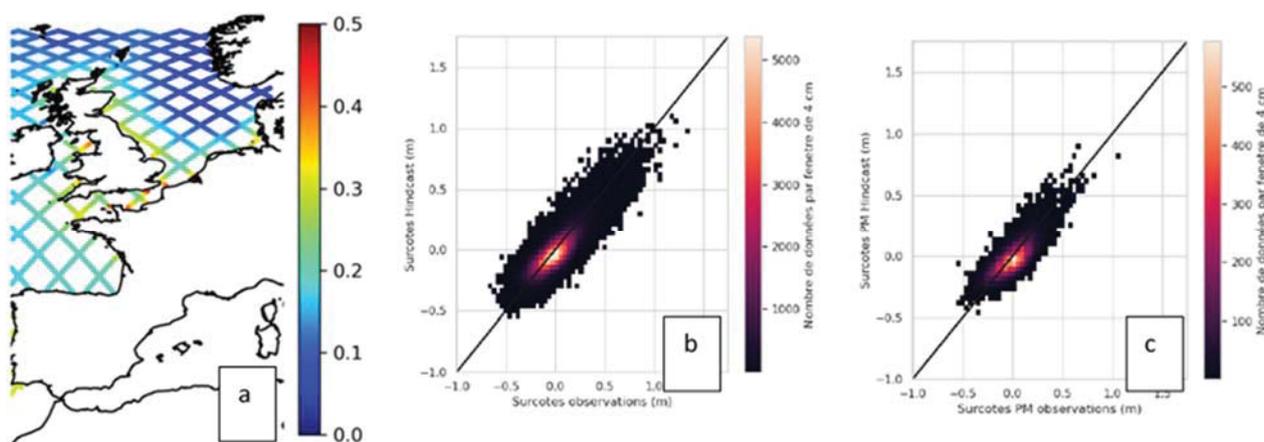


Figure 2. a. Erreurs complexes (en mètre) entre la marée prédite par le modèle et estimée par altimétrie spatiale (produit X-TRACK). b et c. Diagramme de dispersion de la surcote instantanée(b) et de PM(c) simulée en fonction des surcotes à St Malo.

A l'échelle régionale, la comparaison de la marée avec les données altimétriques donne une erreur complexe du modèle d'environ 20 cm dans le Golfe de Gascogne et de 10cm en Mer du Nord (Figure 2a). A Saint-Malo, les marées instantanées et pleine mer (PM) ont des MAE de 12.9 cm, des RMSE de 15.5 cm. Le biais des marées instantanées est de -2 cm, alors que le biais des marées de PM est de -12 cm, ce qui reste faible relativement au marnage. Les pics de surcotes instantanées et de PM sont bien représentés dans le modèle, même si on peut voir une sous-estimation de certains pics (Figures 2b et c). La forte dispersion et les faibles corrélations montrent la difficulté de reproduire certaines oscillations. Ces oscillations peuvent s'expliquer par la méthode de calcul des surcotes (des déphasages de la marée pouvant entraîner des oscillations sur les surcotes) et par

Thème 6 – Risques côtiers

l'absence de représentation de l'ensemble des processus par le rejeu climatologique et notamment les ondes longues.

A l'échelle régionale, le rejeu de vague montre une NRMSE (Figure 3a) autour de 10% et un SI inférieur à 10% pour des Hs entre 2 et 8 m, excepté près des côtes, où l'erreur est plus élevée, en lien avec la forte incertitude des mesures satellites sur ces régions mais également pour les Hs supérieures à 8 m pour lesquelles le NRMSE peut atteindre 14 %. A Saint-Malo, la Hs des vagues est surestimée par le rejeu pour les vagues les plus faibles et sous-estimée pour les vagues les plus importantes (Figure 3b). Le diagramme de dispersion de la période moyenne montre une bonne représentation de la majorité des périodes entre 3 et 10 secondes (Figure 3c).

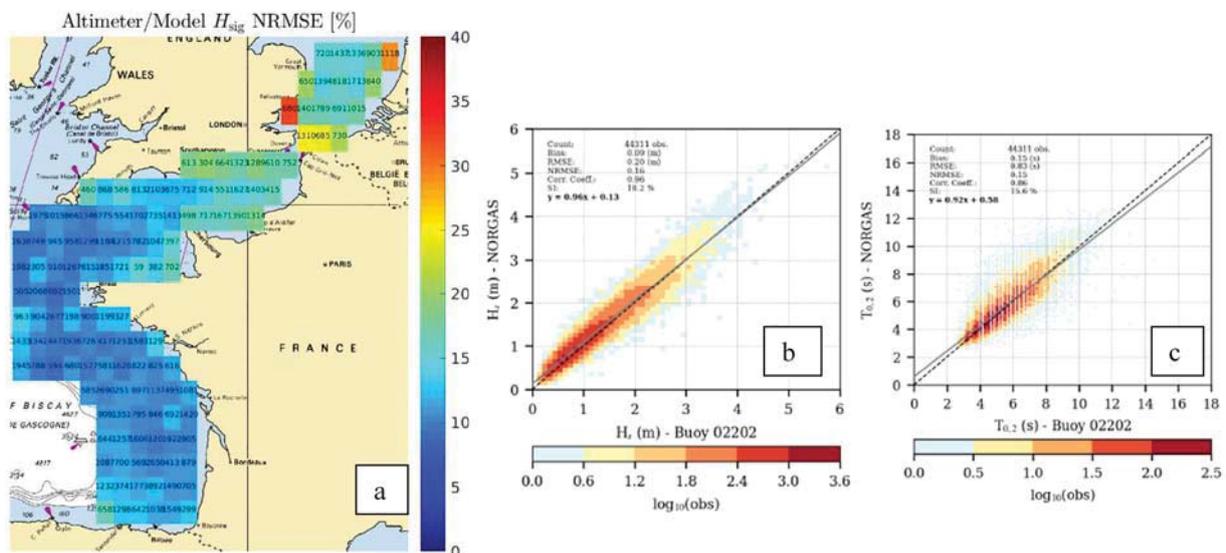


Figure 3. a. Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées NRMSE (Hs) pour l'ensemble de la période 1991-2017 avec une résolution de 0.5 degré. Les numéros indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul. b et c. Diagrammes de dispersion de la Hs et de la période moyenne (T0,2) pour la bouée Candhis 02202.

3.2 Période de retour et valeurs extrêmes de la surcote et de la Hs des vagues

Une analyse des conditions extrêmes est effectuée sur les surcotes et Hs de PM via la méthode directe univariée, sur trois jeux de données : les mesures, les simulations au même point sur toute la durée du rejeu, et les simulations sur les périodes que les observations. Des écarts inférieurs à 15 % sur la période de retour de 100 ans sont obtenus entre modèle et mesure pour la majorité des marégraphes et des houlographes sont obtenus, avec une tendance à la sous-estimation dans le modèle, excepté sur la façade Sud-Ouest pour les marégraphes (Figure 4a). Les figures 4b et 4c montrent la bonne capacité du rejeu climatologique à reproduire les périodes de retour des événements extrêmes de surcotes et Hs de PM. Pour les surcotes, la période de retour centennale est sous-estimée de 6 cm par la simulation par rapport aux observations. Pour l'ensemble des

40 ans du rejeu climatologique, celle-ci est légèrement plus faible que celle obtenue uniquement sur la période d'observation.

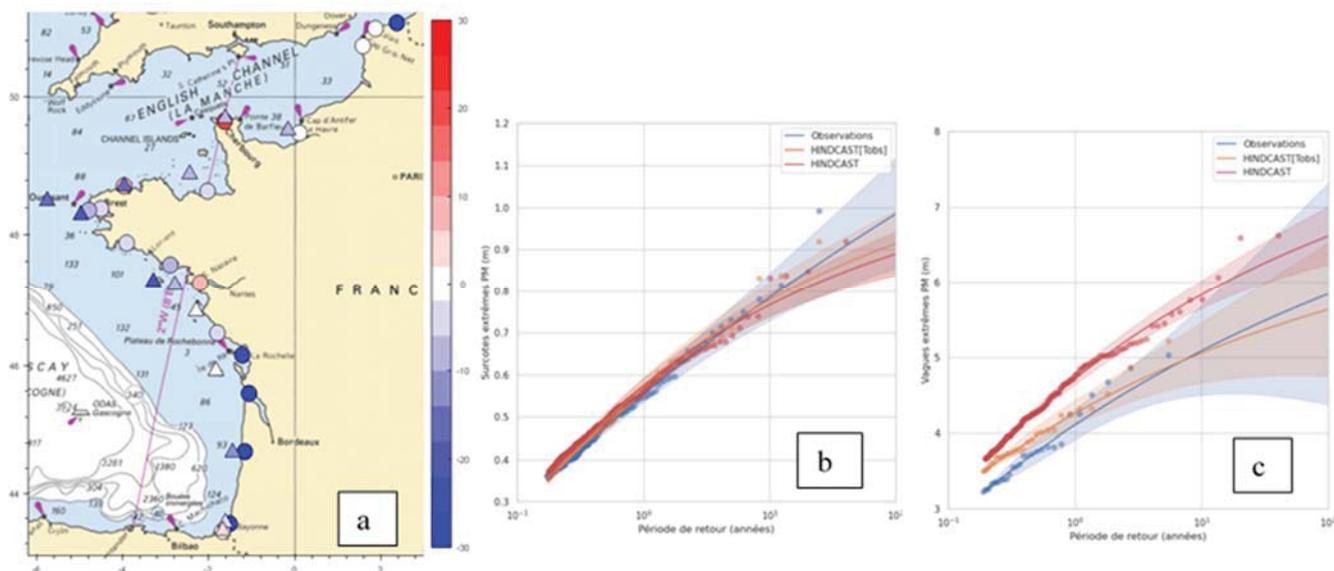


Figure 4. a. Erreurs relatives (en %) sur l'estimation de la période de retour centennale des surcotes et vagues entre le rejeu et les mesures (en triangle les bouées et en rond les marégraphes), b et c. périodes de retour de la surcote et des Hs à PM.

L'ajout de 15 ans de données entre 1979 et 1995 n'apporte pas d'événements extrêmes capables de modifier significativement les périodes de retours et montre la robustesse de l'estimation des valeurs extrêmes. Pour les vagues, on observe une sous-estimation dans le rejeu des Hs pour les vagues comprises entre 3 et 5 m et au contraire une surestimation pour les vagues plus importantes. La Hs centennale est sous-estimée de 20 cm par la simulation par rapport aux observations. La comparaison entre les périodes de retour observée et simulée reste difficile au vu de la faible couverture temporelle des observations (7 ans). Avec l'ensemble du rejeu climatologique, la Hs centennale est de 6,6 m, soit 1 m de plus que pour le rejeu pris uniquement pendant la période d'observation. Le rejeu climatologique permet d'apporter de l'information supplémentaire sur les vagues extrêmes, même si en absence d'observations, il est difficile de valider le modèle.

4. Application aux risques de submersion côtière

4.1 A l'échelle nationale

L'analyse climatologique permet de réaliser des calculs de période de retour classiques pour les vagues et la surcote (Figure 5). Des calculs de périodes de retour conjointes de la marée, surcotes et vagues sont réalisés. Sur St Malo, vu l'importance de la marée, il était indispensable de considérer simultanément vagues et hauteur d'eau pour avoir des statistiques pertinentes.

Thème 6 – Risques côtiers

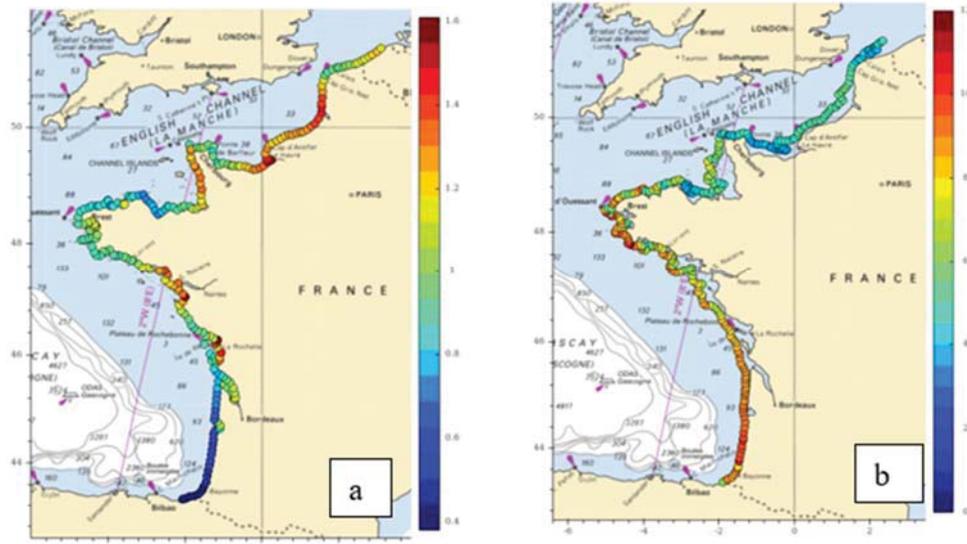


Figure 5. Valeurs de la surcote de PM (a.) et de la Hs (b) centennale simulées par les rejeux (à l'isobathe 0m pour la surcote de PM et 30m pour la Hs).

4.2 A Saint Malo

On calcule les périodes de retour conjointes de la surcote et de la Hs par méthodes directe (Figure 6a) et bivariée par copule. Les événements ayant causé des submersions (carré) peuvent avoir des périodes de retour conjointes inférieures à 1 an. Les conditions météo-océaniques de surcotes et vagues pouvant causer des submersions marines ont donc de fortes chances de se produire à Saint-Malo. Mais ces conditions n'interviennent pas forcément, conjointement avec des conditions de marées importantes, ce qui limite fortement la hauteur d'eau et donc le risque de submersion marine. Une analyse multivariée sur la hauteur d'eau statique (marée et surcote) et la Hs permet de calculer les périodes de retour conjointes de la hauteur d'eau et de la Hs (MAZAS & HAMM, 2017). Les périodes de retour de la hauteur d'eau statique sont estimées par convolution entre la marée et la surcote. Ces périodes de retour sont corrigées en tenant compte des interactions non-linéaires (ARNS *et al.*, 2020).

La figure 6b montre la hauteur d'eau statique simulée en fonction de la Hs des vagues simulées pour chaque PM. On peut définir une zone à fort risque de submersion regroupant l'ensemble des événements (représentés par des carrés) ayant causé des submersions (zone en rouge sur la Figure 6b). Cette zone est définie par des périodes de retour conjointes supérieures à 4 ans et par des seuils de hauteur d'eau et de Hs de vagues de 12,5 m et 2,5 m, respectivement.

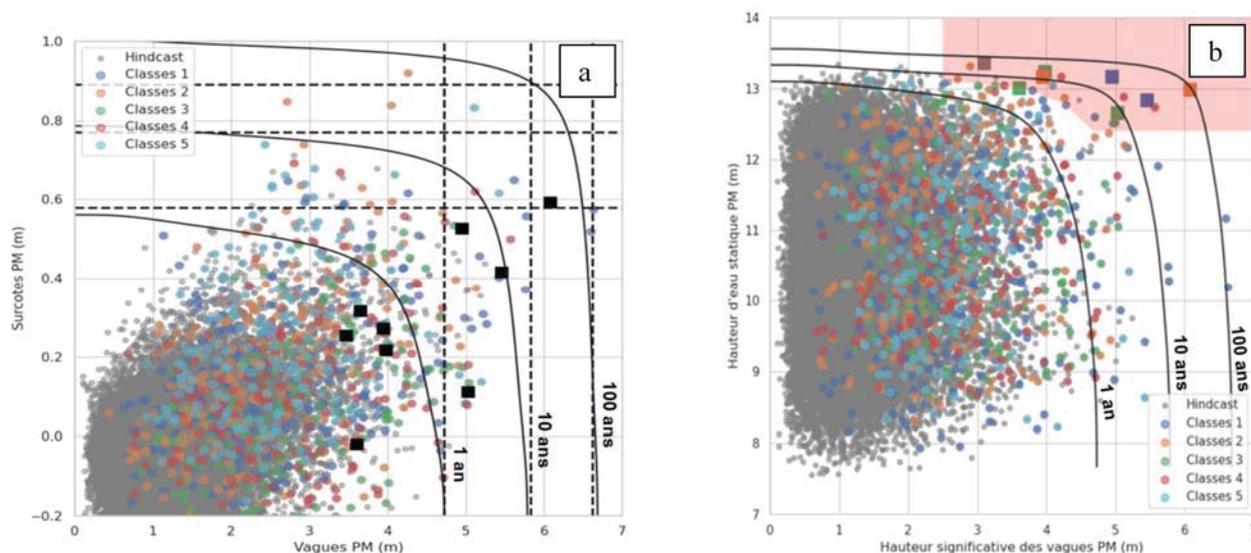


Figure 6. Analyse multivariée à Saint-Malo : a. Surcotes en fonction de la Hs à PM simulée pour chaque cycle de marée. Périodes de retour à 1 an, 10 et 100 ans des surcotes atmosphériques et de la Hs à PM par méthode directe (trait en tiret) et par méthode bivariée (trait continu). b. Hauteur d'eau statique en fonction de la Hs à PM simulées pour chaque cycle de marée (en gris). Périodes de retour à 1 an, 10 et 100 ans des hauteurs d'eau et de la Hs à PM par méthode multivariée (trait continu). La zone rouge représente une zone à fort risque de submersion. Pour chaque classe de tempêtes, une couleur a été associée au cycle de marée et les carrés représentent les épisodes de submersions.

5. Conclusions

Le rejeu climatologique de marées, surcotes atmosphériques et vagues fournit un rejeu cohérent de plus de 40 ans des conditions météo-océaniques sur la façade atlantique française. La comparaison aux mesures et aux satellites indique une représentation satisfaisante des surcotes et des états de mer, malgré une tendance à la sous-estimation pour les fortes vagues. Ce rejeu permet de calculer des périodes de retour classiques pour les vagues et la surcote sur tout le linéaire atlantique français, et en particulier, une analyse statistique multivariée de la marée, de la surcote et de la Hs des vagues à PM, permet de définir des conditions météo-océaniques à fort risque de submersion à Saint-Malo qui sont caractérisées par des périodes de retour conjointes supérieures à 4 ans, des seuils de hauteur d'eau et de Hs de vagues de 12,5 m et 2,5 m respectivement. Ces informations permettent ainsi de pouvoir définir de nouveaux seuils d'alerte qui pourraient être utilisés lors de la mise en place du service local de prévision des submersions.

Cependant, certains processus non représentés dans ces modèles ne doivent pas être négligés pour l'étude de la submersion, et en particulier le wave setup. Ainsi, une nouvelle version du rejeu est en cours de réflexion, utilisant le modèle hydrodynamique barotrope Tolosa qui remplace Hycom dans les prévisions opérationnelles, avec la prise en compte du wave setup et une correction du champ de vent pour les forts vents.

Thème 6 – Risques côtiers

Financements

Ce produit est issu des travaux menés par le Shom dans le cadre du PAPI d'intention St Malo. Il est financé par le Shom, Saint-Malo, Saint-Malo Agglomération, le Conseil Départemental d'Ille et Vilaine, la région Bretagne et l'Etat français.

6. Références bibliographiques

- ARNS A., WAHL T., WOLFF C., *et al.* (2020). *Non-linear interaction modulates global extreme sea levels, coastal flood exposure, and impacts*. Nature communications, 11(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15752-5>
- BARAILLE R., FILATOFF N. (1995). *Modèle shallow-water multicouches isopycnal de Miami*. Rapport technique. Shom.
- BIROL F., FULLER N., LYARD F., *et al.* (2017). *Coastal applications from nadir altimetry: Example of the X-TRACK regional products*. Advances in Space Research 59, no. 4, 936–953. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.11.005>
- BISCARA L., SCHMITT T., CORREARD S., CREACH R. (2014). *Modèles numériques de bathymétrie pour la prévision hydrodynamique du dispositif vigilance vagues-submersions*. Actes des XIIIème Journées Nationales Génie Côtier-Génie, 155, 2–4, doi: 10.5150/jngcgc.2014.060
- BOUTET M. (2015). *Estimation du frottement sur le fond pour la modélisation de la marée barotrope*. Thèse Université de Bretagne Occidentale, Brest. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1105.0488>
- FRAHM G., JUNKER M., SCHMIDT R., (2005). *Estimating the tail dependence coefficient: properties and pitfalls*, Insur. Math. Econ. 37(1) 80–100, <https://doi.org/10.1016/j.insmatheco.2005.05.008>
- HERSBACH H., BELL B., *et al.* (2023). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), doi: 10.24381/cds.adbb2d47
- LECKLER F., ARDHUIN F., FILIPOT J-F, MIRONOV A. (2013). *Dissipation source terms and whitecap statistics*. Ocean Modelling, 70, 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.03.007>
- LEBALLEUR L., MICHAUD H. (2023). *Dossier de l'état de connaissance initiale de la zone de potentiel éolien en mer Fécamp Grand Large. Volet Houle. Lot 2-référence T2.H*. Rapport technique Shom.
- LOPEZ G., LEBALLEUR L., SEYFRIED L., MICHAUD H. (2021). *Dossier de l'état de connaissance initiale des zones d'implantation du parc et de raccordement de la zone éolien en mer de Bretagne Sud. Volet Houle. Lot 2 – référence T2.H*. Rapport technique Shom. https://www.eoliennesenmer.fr/sites/eoliennesenmer/files/fichiers/2022/01/Rapport_DECI_EMR_AO5-BretagneSud_Lot2_Houle_v2_octobre2021.pdf

MAZAS F., HAMM L. (2017). *An event-based approach for extreme joint probabilities of waves and sea levels*. Coastal Engineering, 122, 44-59.

<https://doi.org/10.9753/icce.v35.management.20>

MICHAUD H., DALPHINET A., HUCHET M., *et al.* (2015). *Implementation of the new French operational coastal wave forecasting system and application to a wave-current interaction study*. 14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. Key West, Florida.

PASQUET A. (2016). *HOMONIM – Phase II – Version V4 du système de prévision des surcotes – Configuration ATL*. Rapport technique. Shom.

SEYFRIED L., MICHAUD H. (2021). *PAPI Saint-Malo – Axe2/Action2.1/Livrable4-Réanalyse et modélisation des surcotes et états de mer*. Rapport technique Shom.

TOLMAN H.L., WAVEWATCH III® Development Group. (2016). *User manual and system documentation of wavewatch iii® version 5.16* Technical report.

Thème 6 – Risques côtiers