

LE PROJET HOMONIM, EN SOUTIEN DES PRÉVISIONS D'INONDATION CÔTIÈRE

The HOMONIM project to support the flood forecasts

Auteurs : PARADIS Denis^{1*}, PASQUET Audrey², DALPHINET Alice¹, KPOGO-NUWOLKO Komlan¹, MICHAUD Héloïse², BARAILLE Rémy², JOURDAN Didier², OHL Patrick¹, LE BELLEGUIC Roman², KRIEN Yann³, AYACHE David¹, BATAILLE Christophe¹, CIAVALDINI Maya², BROSSE Fabien²

* *auteur correspondant (denis.paradis@meteo.fr)*

¹Météo France DirOP/MAR, 42 av Coriolis 31057 Toulouse, France

²Shom-Toulouse, 42 av Coriolis 31057 Toulouse, France

³ LEGOS/Université de Toulouse, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France

Résumé :

Le projet HOMONIM phase 3 est mené par Météo-France et le Shom sous la maîtrise d'ouvrage de la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR). Il vise à améliorer les capacités opérationnelles de modélisation des niveaux marins et des vagues à la côte pour aider la gestion du risque de submersion marine. Les principaux travaux de R&D en cours et à venir dans le projet HOMONIM-3 sont abordés dans cet article, portant sur la configuration de façade Manche - Atlantique du nouveau modèle de niveau marin TOLOSA-SW, la calibration de la prévision d'ensemble (PE) de surcotes, la mise en place d'une PE des vagues en côtier, la modélisation couplée vagues/niveaux/courants à très haute résolution, pour le littoral Nord-Aquitain, et la modélisation non hydrostatique. Ces résultats sont susceptibles de servir aux modèles de prévision des inondations à proximité des estuaires ou des fleuves près de leur embouchure, en leur fournissant, sur leur frontière maritime, une condition limite plus réaliste, et cohérente avec les prévisions utilisées pour le dispositif de la Vigilance Vagues-Submersion (VVS), ainsi qu'une information sur la prévisibilité des modèles pour un jour donné, ou sur l'existence de scénarios océaniques alternatifs pour ce même jour.

Mots-clefs : prévision numérique, états de mer, vagues en côtier, niveau marin sur le littoral, vigilance vagues submersion

Abstract :

The HOMONIM-3 project is driven by Météo-France and Shom under the project management of the DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques) and is aiming at improving the operational capacity to model the coastal sea level and waves to help the crisis management of the marine flooding. The main project developments will be presented, concerning the new coastal atlantic configuration of the TOLOSA-SW sea level model, the calibration of the storm surges ensemble forecast, the implementation of a waves ensemble forecasting system for the coasts, the coupled modelisation of the waves and the ocean at a very high resolution for the North Aquitaine shore, and the non-hydrostatic modelisation. All these results may be useful for the flood forecasting models, near the estuaries or the river mouths, by providing them more realistic maritime boundary conditions that will be consistent with the forecasts used by the national VVS (early warning for waves and marine flooding)

system, as well as an information on the previsibility of the models for a given day or on the existence of alternative maritime scenarios for the same day.

Keywords: numerical forecast, coastal waves, sea level at coast, early warning for waves and marine flooding

1. INTRODUCTION

HOMONIM (Historique, Observation et MODélisation du Niveau Marin) est un projet national mené par Météo-France et le Shom, sous maîtrise d’ouvrage du ministère de la transition écologique par l’intermédiaire de la Direction Générale de la Prévention des Risques. Il a contribué, à son début, à l’action de l’Etat dans le cadre du plan interministériel “Submersions Rapides”.

L’objectif est d’améliorer les capacités opérationnelles de prévision du risque de submersion marine. La troisième phase de HOMONIM comporte deux axes d’amélioration : continuer à faire progresser le système opérationnel national de référence de la Vigilance Vagues-Submersion (VVS) de Météo-France, et préparer la transition vers la prévision des zones de submersions potentielles.

Il s’agit d’une part d’améliorer les capacités de prévision des niveaux marins, surcotes et vagues à proximité de la côte et pour les territoires à enjeux ou complexes (estuaires, zones semi-fermées), et de mieux évaluer et exploiter les incertitudes sur la prévision. D’autre part, ce projet vise à fournir un « écosystème de modélisation » adapté à l’alimentation de systèmes de prévision plus locaux, et ainsi préparer les futurs outils de prévision numérique aptes à décrire les processus littoraux et compatibles avec une mise en œuvre opérationnelle.

Les orientations techniques choisies dans HOMONIM-3 [Jourdan et al., 2020] visent à augmenter le réalisme des modèles, et à développer la prévision d’ensemble (PE), tout en conservant le caractère opérationnel des systèmes de prévision (simplicité, robustesse, performance), ce qui se traduit par :

le développement de la plateforme multi-modèles TOLOSA permettant de modéliser la dynamique barotrope de l’océan à l’aide de grilles non-structurées,

le développement de fonctionnalités de descente d’échelle et de couplage garantissant une simplicité de mise en œuvre opérationnelle,

la calibration de la PE de surcote et la mise en place d’une PE de vagues en côtier, pour estimer l’incertitude des prévisions.

Nous allons décrire dans cet article les principales actions menées sur la modélisation océanique dans le cadre de HOMONIM-3 et en donner les premiers résultats : la modélisation régionale de façade des niveaux d’eau (configuration TOLOSA-ATL), la calibration de la PE de surcotes, la PE de vagues en côtier, la modélisation couplée vagues/océan à Très Haute Résolution (THR, 20 à 50 m), et la représentation des effets non hydrostatiques locaux.

2. TOLOSA-ATL: une configuration régionale Atlantique-Manche améliorée, un nouveau modèle Shallow Water

2.1 Description, mise au point

La modélisation régionale des niveaux d’eau utilise le modèle TOLOSA-SW, qui est un module (SW=Shallow Water) de la boîte à outils TOLOSA (Tools Library for unstructured Ocean Models and Surge Applications, <https://tolosa-project.com/>), développée essentiellement par l’IMT (Institut de Mathématiques de Toulouse) et le Shom, pour modéliser les écoulements à surface libre (Couderc, 2017).

Le modèle TOLOSA-SW résout les équations shallow-water non linéaires. Il permet, comme HYCOM qu’il doit remplacer dans le dispositif VVS, une modélisation régionale opérationnelle des niveaux d’eau à l’échelle d’une façade complète (exemple : ATL, pour la façade Atlantique-Manche), mais avec une résolution plus fine à la côte grâce aux grilles non structurées. TOLOSA-SW hérite des schémas numériques peu dissipatifs, stables et performants de type ‘bas Froude’ (Duran et al 2017, Duran et al 2020) qui ont été testés de façon préliminaire dans HYCOM, et qui ont depuis bénéficié d’améliorations continues (critères de dissipation et de stabilité, montées en ordre...); ils constituent désormais le cœur numérique de la toolbox TOLOSA. Ces schémas sont performants pour le calcul de flux non-linéaires aux régimes typiques de nos applications; le schéma ‘bas Froude’ explicite du premier ordre utilisé dans TOLOSA-SW présente un comportement énergétique d’un schéma du second ordre, ce qui le rend particulièrement efficace et peu coûteux.

Le maillage de la configuration TOLOSA-ATL a une résolution de l’ordre de 100-200m au niveau du trait de côte métropolitain et atteint jusqu’à 10-20km au large des côtes norvégiennes. Sa bathymétrie a été construite à partir du MNT à 100 m de résolution issue du projet HOMONIM (Biscara et al. 2015). Le modèle est forcé, à ces frontières ouvertes, par la marée issue de l’atlas FES2014b. La surcote due au baromètre inverse est ajoutée au niveau de marée en prenant en compte une pression atmosphérique moyenne issue d’une climatologie (ERA-5 de 2010 à 2019) comme pression de référence (au lieu de 1013,25 hPa). Enfin, le potentiel de marée est lui aussi inclus dans toutes les simulations. La friction de fond est semi-quadratique, temporellement et spatialement variable, et calculée à partir d’une longueur de rugosité obtenue par la méthode d’optimisation stochastique déjà utilisée pour HYCOM (Boutet et al, 2015, Pasquet et al, 2016, Krien et al, 2021) en utilisant les prédictions de marée du réseau marégraphique REFMAR.

2.2 Résultats

En comparant sur un an et avec le réseau de marégraphes RONIM, le nouveau modèle de marée réduit les erreurs complexes d’un facteur 2.5 en moyenne et montre des performances plus homogènes que l’ancienne configuration HYCOM-ATL; on note en particulier une amélioration significative de la marée en Manche.

Un panel de 17 événements remarquables ainsi qu’un rejeu de l’hiver 2013-2014, particulièrement agité, ont été utilisés pour valider la modélisation des niveaux d’eau. Le tableau ci-après indique quelques scores obtenus pour les surcotes modélisées (les scores sur les pics de surcotes ne sont pas évalués pour l’hiver 2013-2014). On note une **réduction de 5 % à 10 % des écarts type** et erreurs quadratiques moyennes, et une correction partielle de **~25 % des biais longs pour certains événements du panel**, via la prise en compte d’une pression de référence plus précise.

Score des surcotes (cm)	Panel de 17 tempêtes		Hiver 2013-2014	
	Hycom-ATL	Tolosa-ATL	Hycom-ATL	Tolosa-ATL
Biais arithmétique (cm)	-4	-4	-4	-3
Biais en valeurs absolues (cm)	9	9	5	4
Ecart quadratique moyen (cm)	17	16	13	12
Ecart type moyen (cm)	12	11	12	11
Erreur absolue de l’écart aux pics de surcote (cm)	17	17	-	-
Erreur aux pics de surcote (cm)	-10	-11	-	-
Déphasage aux pics de surcotes (mn)	43	41	-	-

Tableau 1: Tableau de scores obtenus pour les surcotes modélisées sur 2 rejeux (panel de 17 tempêtes et hiver 2013-2014) et pour les 2 modèles (Hycom et TOLOSA) de la façade atlantique

La légère amélioration des scores pour la configuration TOLOSA-ATL est corroborée par l'évaluation subjective des prévisionnistes de Météo-France en charge de la VVS, qui ont comparé les 2 configurations en mars et avril 2023 : ils ont conclu à un comportement de TOLOSA-ATL similaire à HYCOM-ATL renforcé de quelques points positifs pour TOLOSA-ATL : correction (jusqu'à 5 cm) de biais persistants, amélioration de la gestion des bancs découvrants, sur-réactivité moindre rendant TOLOSA-ATL plus facile à utiliser.

Pour illustrer cette comparaison, la figure 1 suivante reproduit les prévisions à 4 jours de la surcote à Dunkerque faites le 01 janvier 2018 à 0UTC, avec HYCOM-ATL et avec TOLOSA-ATL, en superposant les observations du marégraphe (tempête Eleanor):

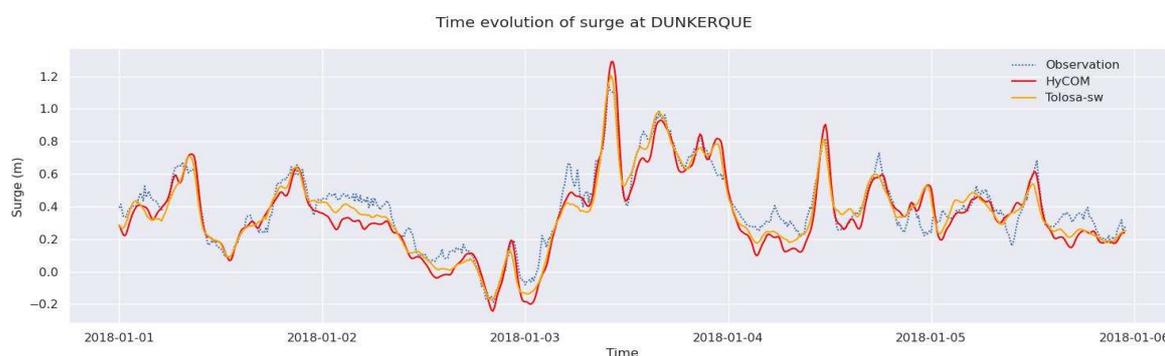


Figure 1: Surcote (m) observée à Dunkerque du 01/01/2018 au 06/01/2018 (ligne bleue), et celles prévues par TOLOSA-ATL (trait orange) et HYCOM-ATL (trait rouge) le 01/01/2018 à 0 UTC, avec le forçage atmosphérique de Arpège à 10 km de résolution

Sur cet événement, on retrouve un comportement similaire entre les deux modèles : pic de surcote observé de 1.15 m bien simulé par TOLOSA-ATL (1.2 m), légèrement plus sur-estimé par HYCOM-ATL (1.3 m), et meilleur réalisme de TOLOSA-ATL durant les presque 4 jours.

TOLOSA-ATL se distingue aussi par ses performances numériques, avec un temps calcul multiplié par 2 pour une résolution entre 5 et 10 fois plus raffinée, selon la zone.

2.3 Bilan

Une chaîne pré-opérationnelle produit actuellement en temps réel les prévisions basées sur la configuration TOLOSA-ATL forcée par Arpège au réseau 0 UTC. Elle permet aux prévisionnistes de poursuivre leur appropriation et leur évaluation de cette nouvelle configuration, en attendant une bascule opérationnelle qui aura lieu entre d'ici au printemps 2024.

3 CALIBRATION DE LA PREVISION D'ENSEMBLE DE SURCOTE

3.1 Description, mise au point

La Prévision d'Ensemble (PE) est une technique qui permet de représenter les états possibles d'un paramètre prévu (vent, surcote, état de mer...) à une échéance donnée par un ensemble d'états équiprobables (les membres). La PE Arpège (PEARP) a 35 membres et prend en compte l'incertitude sur l'état initial (ensemble d'assimilation Arpège) et sur le modèle Arpège (activation de plusieurs physiques alternatives réparties aléatoirement sur les 35 membres).

Une chaîne de PE de surcotes a été mise en place en juillet 2016 à Météo-France, pour deux domaines : Atlantique et Méditerranée. Elle utilise les forçages atmosphériques (vent à 10 m et pression au niveau de la mer) issus de la PEARP comme forçage du modèle Hycom 2D (résolution spatiale de 500 m à 1,5 km sur les côtes françaises) et produit des prévisions jusqu'à 102 h maximum, 2 fois par jour. L'incertitude décrite dans l'ensemble de surcotes, se focalise uniquement sur le forçage atmosphérique (état initial et modèle), l'une des principales sources d'incertitudes.

Les scores de la PE surcotes (comparaison avec les observations marégraphiques du réseau RONIM du Shom) ont montré que les prévisions sont sous-dispersives et souvent biaisées, conséquences de plusieurs sources d'erreurs parmi lesquelles la sous-dispersion des forçages PEARP, la dynamique 3D manquante dans le modèle Hycom 2D, la pression de référence supposée constante ou encore la non prise en compte de l'effet des vagues (via le wave setup ou la rugosité de surface liée aux vagues par exemple).

Une calibration des PE de surcotes a été développée afin de corriger à la fois le biais et la sous-dispersion des prévisions brutes par un post-traitement. Pour ce faire, deux méthodes ont été testées : EMOS (Ensemble Model Output Statistics) [Gneiting et al., 2005] et QRF (Quantile Regression Forests) [Meinshausen, 2006]. Ces deux méthodes peuvent être mises en place dans un cadre opérationnel et ont démontré leur efficacité dans plusieurs études antérieures [Taillardat et al., 2016], [Evin et al., 2021], [Gneiting et al., 2005], [Baran and Lerch, 2015]. De plus, ces méthodes ont l'avantage de pouvoir utiliser des prédicteurs météo-océaniques autres que les caractéristiques de la PE brute. Cela peut permettre de prendre en compte l'effet des vagues non modélisé.

Un échantillon de données couvrant une période de 6.5 ans (du 01/01/2016 au 30/06/2022) a été constitué pour :

- les observations de hauteur totale d'eau des marégraphes du réseau RONIM du Shom. La surcote observée est calculée en retranchant la marée prédite du Shom.
- les prévisions d'ensemble de surcotes Hycom 2D de la production opérationnelle de Météo-France aux positions des marégraphes (35 membres, seul le réseau de 18 h est utilisé afin de réduire la dépendance entre les données, prévisions jusqu'à 108 h)
- les données de vent à 10 m et de pression au niveau de la mer : analyses du modèle atmosphérique déterministe Arpège de Météo-France (point de grille le plus proche des marégraphes)
- les données de hauteur significative et de période des vagues : analyses du modèle WAVEWATCH III ® (WW3 dans la suite du papier) (configuration NORGAS-UG issue d'HOMONIM) forcé par Arpège de la production opérationnelle de Météo-France (point de grille WW3 le plus proche dans la direction des vagues dominantes)

Pour la méthode EMOS, quatre distributions paramétriques ont été testées : normale, log-normale, gamma et logistique. Le critère de performance fréquemment utilisé pour retenir la meilleure distribution, est le CRPS (Continuous Ranked Probability Score) représentant l'intégrale de l'écart quadratique entre la fonction de répartition des prévisions et la fonction de répartition de l'observation. Il est directement comparable avec l'erreur moyenne absolue d'un modèle déterministe. Les meilleurs scores ont été obtenus pour les lois normale et logistique, et la loi normale a été retenue (facilité d'emploi, coût calcul) comme distribution pour calibrer la PE de surcotes avec la méthode EMOS.

La méthode QRF est non paramétrique c'est-à-dire qu'elle ne nécessite de ne fixer aucune distribution pour la variable d'intérêt. Cette méthode mise au point par Meinshausen and Ridgeway [2006] est basée sur les forêts aléatoires. C'est une régression non-linéaire adaptée à la prévision de quantiles et a l'avantage de ne pas être dégradée par l'ajout de prédicteurs peu ou pas informatifs, au contraire de la méthode EMOS. Trois paramètres ont été optimisés par validation croisée, pour 5 sites (Dunkerque, Brest, Boulogne-sur-mer, Monaco et Sète) : le nombre d'arbres nécessaires (500), le nombre de variables tirées aléatoirement pour sélectionner la variable de segmentation de chaque nœud (5) et la taille minimale d'un nœud (20).

3.2 Résultats

La figure 2 montre le CRPS obtenus pour les 3 ensembles (brut, calibré par EMOS, et calibré par QRF), sous la forme de boîtes à moustaches, en fonction des échéances de prévision pour les sites du domaine Atlantique (résultats équivalents pour la Méditerranée). Les deux méthodes de calibration conduisent à des CRPS plus faibles donc meilleurs que la PE brute. Entre les deux méthodes, le QRF donne les meilleurs scores.

Le diagramme de rang (DR) représente la répartition des observations vis-à-vis des N membres de l'ensemble. Une PE devra avoir son DR uniforme (plat) pour pouvoir être fiable.

La figure 3 montre les DR pour le site de Dunkerque. Le DR de l'ensemble sans calibration est en forme de U avec plus d'occurrences à droite. Cela montre que l'observation est le plus souvent supérieure à tous les membres de la PE. La PE sans calibration est donc sous-dispersive et sous-estime les surcotes. Après calibration (EMOS et QRF), les DR deviennent relativement uniformes avec un léger avantage pour la méthode QRF. Ces résultats sont similaires pour tous les autres sites, non présentés ici.

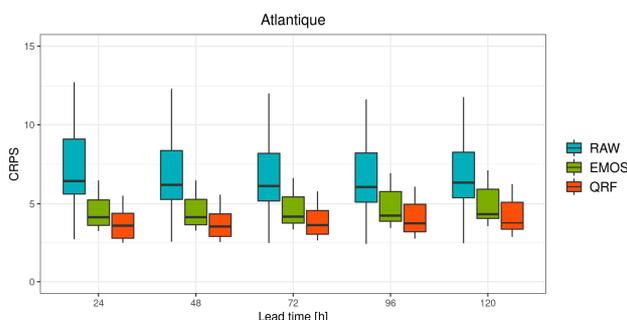


Figure 2 : CRPS (ordonnée) des 3 ensembles (brut, calibré par EMOS et par QRF) en fonction des échéances de prévision (abscisses) pour le domaine Atlantique (18 sites utilisés). Les calculs reposent sur l'échantillon complet de 6.5 ans et sont présentés sous la forme de boîtes à moustaches (quantiles 10, 25, 50, 75 et 90).

Pour illustrer l'efficacité de la méthode QRF pour calibrer la PE de surcotes, les 3 ensembles de surcotes obtenus, sans calibration, avec la calibration EMOS et avec la calibration QRF, sont reproduits ci-après (Figure 4), pour une prévision jusqu'à 108 h faite le 08/01/2017 à 18 UTC au Havre. La PE calibrée avec le QRF arrive à bien prévoir le pic de surcotes autour du 12 janvier à 18 h (presque

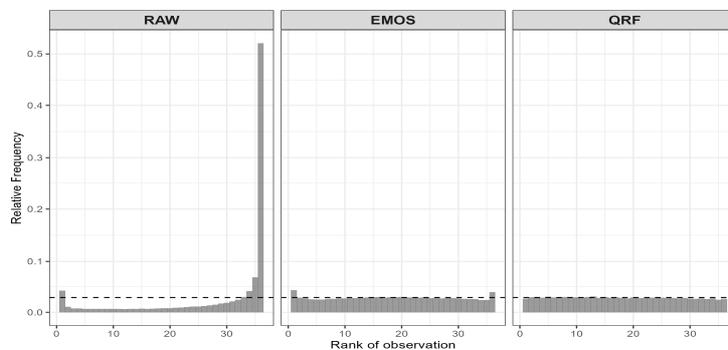


Figure 3 : Diagrammes de rang pour le site de Dunkerque : sans calibration à gauche, avec calibration par EMOS (au centre) et QRF (à droite)

4 jours d'échéance), ce qui n'est pas le cas de la prévision brute et de la PE calibré avec EMOS. Ce pic a été correctement reproduit par le QRF grâce à l'utilisation des prédicteurs comme la hauteur

significative des vagues, la vitesse du vent à 10 m et la pression au niveau de la mer qui indiquent bien la présence d'un événement tempétueux autour de cette date.

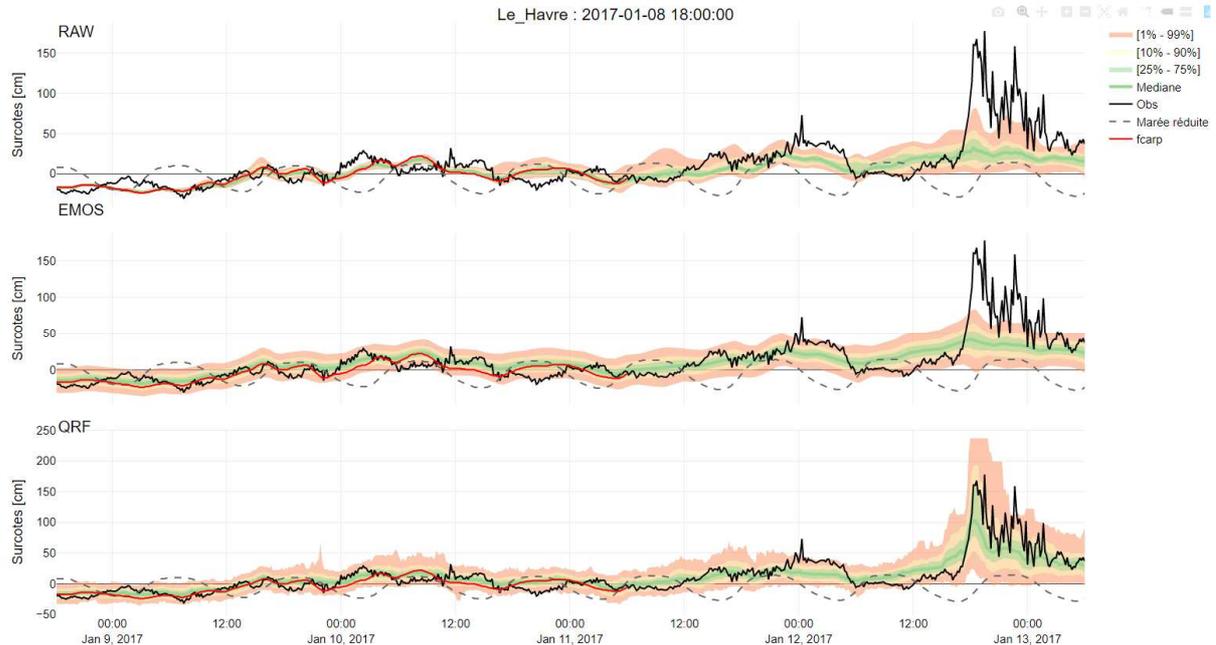


Figure 4: Quantiles de la PE surcotes ($Q1$, $Q10$, $Q25$, $Q50$, $Q75$, $Q90$, $Q99$) au Havre, produite le 08/01/2017 à 18 UTC jusqu'à +108 h: prévisions brutes (en haut), EMOS (au milieu) et QRF (en bas). L'observation au marégraphe du Havre (en noir) est superposée, ainsi que la prévision déterministe (en rouge) et la marée réduite (en pointillés noirs) pour repérer les phase de PM et de BM

3.3 Conclusion

A partir des scores comme le CRPS, le diagramme de rang, le diagramme de fiabilité ou encore la courbe ROC, il ressort que la calibration de la PE surcotes avec ces deux méthodes permet de réduire le biais et d'avoir une dispersion plus uniforme. Le QRF a donné les meilleurs résultats sur l'ensemble de ces scores aussi bien en Atlantique qu'en Méditerranée.

Il faut souligner que le QRF ne peut pas prévoir une valeur supérieure au maximum de surcotes de l'échantillon d'apprentissage. C'est la raison pour laquelle l'échantillon d'apprentissage doit être aussi large que possible. Quant à la méthode EMOS, la loi normale qui a été retenue comme distribution des surcotes, n'arrive pas à modéliser correctement la queue de la distribution. Il pourrait être intéressant de tester une distribution mixte du type Normal-Pareto afin de mieux capter aussi bien la queue que le reste de la distribution des surcotes.

4 DEVELOPPEMENTS EN COURS

4.1 Prévision d'ensemble de vagues

Le projet HOMONIM-3 cherche également à mettre en place une PE de vagues en côtier, basée sur le modèle WW3 pour les façades françaises Atlantique NE, Manche, Mer du Nord et Méditerranée. Pour ce faire, l'étape préalable consistait à développer une PE de vagues au large dans laquelle imbriquer le côtier. Après plusieurs tests et études de sensibilité, les caractéristiques retenues de la PE de vagues au large sont les suivantes :

- modèle de vagues MFWAM, avec une grille globale de résolution horizontale de 0,2° (compromis coût/performance), forcé par la PEARP. Deux physiques de vagues alternatives sont utilisées dans l'ensemble de vagues pour introduire l'incertitude sur le modèle de vagues : l'actuelle physique du modèle MFWAM déterministe opérationnel (appliquée à 18 membres) et l'ancienne physique opérationnelle ECWAM (modèle du ECMWF), plutôt meilleure pour la mer du vent (vagues en cours de croissance sous l'effet du vent), mais moins bonne pour la houle (appliquée aux 17 autres membres)
- 4 réseaux de production pour une échéance maximale de 102 h, avec des conditions initiales identiques pour les 35 membres MFWAM, correspondant à celles du modèle déterministe bénéficiant de l'assimilation des données.

La validation a été faite sur une période de 4 mois (janvier à avril 2021), en utilisant les observations des bouées Brittany, Gascogne et Azur et les altimètres proches de la zone France. Les diagrammes de rang montrent une tendance à la sous-dispersion aux premières échéances, jusqu'à 48 h environ. Ce résultat était attendu car il n'y a pas d'assimilation d'ensemble MFWAM : tous les membres partent en effet du même état initial. On remarque une tendance à la surestimation sur la zone Atlantique et à la sous-estimation dans la zone Méditerranée. La possibilité de calibration en post-traitement pourra être étudiée ultérieurement.

Cette PE de vagues au large est produite en opérationnel à Météo-France depuis novembre 2022 et va permettre de développer, tester, valider une PE de vagues en côtier pour la métropole d'ici 2024. Cette dernière aura les caractéristiques suivantes :

- grille unique pour couvrir tout le littoral français de métropole (Atlantique et Méditerranée : fusion des grilles des 2 configurations WW3 déterministes actuelles), avec une résolution spatiale allant jusqu'à 200 m à la côte, imbriquée dans la grille au 1/5° de la PE MFWAM, et utilisant le modèle WAVEWATCH III,
- forçage par la PE de Arpège (35 membres) ou de Arome (17 membres), selon rapport bénéfice/coût,
- forçage de la partie Atlantique-Mer du Nord par les courants et les niveaux marins du modèle déterministe de surcotes HYCOM-ATL puis TOLOSA-ATL,

En parallèle, une réflexion est en cours dans un groupe de travail comportant des modélisateurs et des prévisionnistes pour utiliser au mieux la PE de vagues et de surcotes dans les productions de sécurité de Météo-France : paramètres particuliers, probabilité de dépassement de seuils, indice de dangerosité, visualisation, concept d'emploi, méthodologie...

4.2 Modélisation couplée niveaux/courants/vagues TOLOSA-WW3

Les courants influent sur les états de mer en modifiant la réfraction, le déferlement, et la croissance des vagues. De même, le niveau d'eau agit sur de nombreux processus liés aux vagues, notamment en eaux peu profondes et en zones tidales. Réciproquement, les vagues agissent sur les couches limites de surface et de fond via la modification de l'énergie cinétique turbulente et des rugosités de surface et de fond. La dérive de Stokes vient également s'ajouter au courant de surface, et une décote est générée peu avant le déferlement des vagues (wave setback), tandis que le déferlement crée une surcote due aux vagues, le wave setup.

Pour les prévisions de surcote, le wave setup est essentiel et représente une part importante des erreurs de prévision, en certains sites, dans les modèles de hauteurs d'eau simplifiés non couplés avec un modèle de vagues (Michaud H. & Pasquet A., 2021, Pasquet et al, 2021). Un couplage entre les modèles de circulation et d'états de mer à une résolution de l'ordre de quelques dizaines de mètres permet d'en représenter une partie, même si l'hypothèse barotrope des modèles de circulation peut en limiter la précision (intégration sur la verticale pour aboutir à une représentation 2D). Un des attendus

d’HOMONIM-3 est la mise en place d’une configuration couplée THR (entre 20 et 30 m de résolution) entre les modèles TOLOSA-SW et WW3 sur les côtes Nord Aquitaine (NAQ), incluant le Bassin d’Arcachon et l’estuaire de la Gironde. Cette configuration permettra d’évaluer l’apport du couplage, sur le plan scientifique (réalisme des prévisions) et opérationnel (amélioration de la VVS). Elle fournira également une preuve de faisabilité pour mettre en œuvre un tel système, plus coûteux, à l’échelle d’une façade de plusieurs centaines voire milliers de kilomètres, en routine pré-opérationnelle (i.e. comme base à l’ensemble de la production, y compris la PE). Elle profitera à la VVS infra-départementale (plus précise) et aux services avals (alimentation ou intégration dans des systèmes d’alerte de submersion marine à l’échelle locale).

La réduction des coûts de calcul nécessaire à l’emploi opérationnel de cette capacité est possible grâce à une refonte par le Shom de ses outils numériques (modèles numériques, outils de descente d’échelle), refonte financée par la Direction Générale de l’Armement dans le cadre de l’amélioration des outils numériques de prévision pour les besoins de Défense. Ces outils sont ensuite transférés au programme HOMONIM et bénéficient in fine au dispositif de la VVS. Dans cette approche duale, la validation de ces développements est assurée par et pour les objectifs HOMONIM-3. TOLOSA a ainsi été pensé dans l’objectif de faciliter la descente d’échelle sur zones complexes à moindre coût de calcul avec, en plus de la performance intrinsèque des schémas numériques nouvellement développés (schémas ‘Bas Froude’), une parallélisation optimisée sous CPU (Central Processing Unit), et structurée pour faciliter son évolution vers du calcul sous GPU (Graphics Processing Unit). Des fonctionnalités de calcul asynchrone (par utilisation de pas de temps locaux dans le modèle) sont aussi en cours de développement, afin de diminuer le coût calcul très contraint par le respect de conditions CFL (Courant–Friedrichs–Lewy) très locales. Le coupleur OASIS (Valcke et al. 2015) permettant à la fois la descente d’échelle et le couplage entre les modèles TOLOSA et WW3, y a été implémenté. Enfin, l’adaptation des schémas numériques aux régimes dynamiques propres aux zones fluviales ou lagunaires, (i.e. écoulements avec nombre de Froude élevé) permettra d’étendre leur utilisation optimale dans les estuaires et les lagons (dont Mayotte, par exemple).

Le modèle spectral WW3 opérationnel de la VVS devrait également migrer vers une mise à jour majeure, basée sur la dernière version communautaire adoptant un schéma numérique implicite et une parallélisation nettement améliorée (WW3DG, 2019, Abdolali et al., 2020). À cette version s’ajoutent des développements importants relatifs à la modélisation des vagues en zone côtière et macro-tidale. Une nette amélioration de la représentation des vagues en zone littorale et une réduction en temps de calcul d’un facteur 5 à 10 selon la configuration ont ainsi pu être obtenues. Les méthodes d’intégration, le wave setup et le limiteur numérique ont également été reformulés selon la méthode de Hersbach & Janssen, 1999. La réflexion à la côte a été introduite et homogénéisée avec un nouveau schéma pour les bancs découvrants, permettant un meilleur couplage avec les modèles de circulation. Une sous-relaxation (e.g. Moukalled et al. 2016) pour les termes forts et non-linéaires décrivant les interactions de triplets quasi-résonnants et le déferlement des vagues en eaux peu profondes ont été introduits. Enfin, les modules OASIS ont été réadaptés et réinstallés dans cette future version WW3.

4.3 Modélisation non-hydrostatique

Les modèles shallow water (de type Saint-Venant, hydrostatique) comme TOLOSA-SW propagent le signal de marée et les ondes de tempête de grande échelle du large vers les côtes. Ils suffisent aussi à décrire l’évolution des masses d’eau après la zone de déferlement. Ils répondent ainsi aux besoins de prévision à l’échelle nationale et peuvent répondre à certaines problématiques d’inondation par débordement. En revanche, ces systèmes ne permettent pas de représenter les transformations des vagues dans la zone de levage (shoaling) avant le déferlement, processus fondamental qui conditionne la dynamique au-delà de cette zone. Ces modèles ne permettent donc pas une modélisation unique du large jusqu’au trait de côte et aux zones d’inondation potentielles.

La modélisation non hydrostatique à phase résolue permet en revanche de représenter de façon explicite à la fois la circulation (niveaux, courants) et les vagues, et résout des processus littoraux essentiels mais négligés ou mal représentés dans les modèles spectraux comme WW3 et hydrostatiques, citons entre autres le déferlement, les transferts d'énergie entre les bandes fréquentielles, les interactions air/eau/fond, le franchissement d'obstacles par paquet de mer, le jet de rive, etc. Ce type de modélisation prometteuse est encore trop coûteux pour l'opérationnel sur de larges bandes littorales, et reste limité à des systèmes de prévision très locaux (de un à quelques dizaines de kilomètres de côte) ou à de l'étude de processus. L'objectif d'HOMONIM-3 est d'étendre l'expertise scientifique spécifique à la prévision opérationnelle des submersions marines de l'échelle côtière à l'échelle littorale afin de faciliter la cohérence technique, scientifique et stratégique nécessaire à l'articulation entre le système de prévision national et les systèmes locaux finement résolus.

Pour ce faire, le modèle TOLOSA-LCT a été développé ; c'est un modèle non hydrostatique moyenné sur la verticale, et bénéficiant de la puissance des schémas numériques de la suite TOLOSA avec une technique numérique efficace consistant à séparer les modes hydrostatiques et non hydrostatiques. Ce code discrétise les équations du modèle théorique Leucothéa (Richard et al. 2021). Il a une structure mathématique relativement simple (conservation de l'hyperbolicité du système), comparativement à des approches plus conventionnelles comme le modèle de Serre-Green-Naghdi (SGN). Le coût de calcul de TOLOSA-LCT est estimé à seulement 5 à 6 fois le coût du TOLOSA-SW. Il présente également la particularité de dégénérer vers TOLOSA-SW lorsque les effets non hydrostatiques deviennent faibles, garantissant une modélisation 'sans couture' du large au littoral. La paramétrisation du déferlement devrait être significativement améliorée en introduisant une nouvelle quantité, l'entrophie, qui mesure le niveau d'énergie turbulente dans l'écoulement.

La validation de ces développements est en cours sur des cas académiques. En parallèle, les données de la campagne de mesures RiCoRé, menée durant l'hiver 2020-2021 sur la façade Ouest de l'île de Ré par le Shom dans le cadre d'HOMONIM-3, en collaboration avec les laboratoires universitaires LIENSs et GLADYS, ont été traitées et analysées. Elles font déjà l'objet d'études visant à mieux comprendre et modéliser la transformation des vagues et l'évolution des niveaux d'eau au-dessus d'un fond rocheux (Le Goff Le Gourriec et al. 2022). Ces données permettront de valider le modèle TOLOSA-LCT, et de le comparer à d'autres modèles non hydrostatiques et éventuellement 3D tels que Symphonie (Marsaleix et al., 2019).

5 CONCLUSION

Les principales actions du projet HOMONIM-3, en cours et à venir, ont été présentées :

- description et résultats de la configuration de façade “ATL” du modèle de niveau marin TOLOSA-SW,
- calibration de la prévision d'ensemble de surcotes,
- mise en place de la prévision d'ensemble des vagues en côtier,
- modélisation couplée vagues/niveaux/courants à très haute résolution, pour le littoral Nord-Aquitain (NAQ) et pour l'estuaire gironдин,
- modélisation vague à vague non hydrostatique.

Ces travaux contribuent à améliorer le réalisme des prévisions du niveau marin au travers de nouvelles capacités de prévision (voir la validation des simulations de la marée et des surcotes avec la configuration TOLOSA-ATL, l'implémentation pré-opérationnelle d'une configuration couplée TOLOSA/WW3 pour la zone à enjeux Nord Aquitaine, NAQ), à simplifier les chaînes de production opérationnelles de Météo-France (grille non-structurée et performance calculatoire de TOLOSA, descente d'échelle et couplage TOLOSA/WW3), à évaluer l'incertitude des prévisions de surcotes et de vagues (connaissance de la prévisibilité de l'événement en cours, et de l'existence de scénarios alternatifs) et à préparer la prévision des submersions marines.

La Vigilance Vagues-Submersion (VVS) pourra ainsi bénéficier d'une information plus précise avec l'augmentation de la résolution spatiale (TOLOSA-ATL), la prise en compte du wave-setup (TOLOSA/WW3-NAQ) et disposer d'une information sur la confiance à apporter aux prévisions. De même, les usagers de la VVS (mission RDI-L, services en charge de la gestion de crise des agglomérations, des collectivités locales) pourront s'appuyer sur des données de prévision déterministe et ensembliste (météo, niveau marin, vagues) à la fois plus réalistes et à très haute résolution localement (inférieure à 50 m), pour mieux alimenter leurs applications aval en charge d'évaluer la submersion marine (outils d'aide à la décision). En outre, l'accès à l'expertise du prévisionniste de Météo-France sur les modèles météorologiques permettra aux usagers autorisés de sélectionner les bons forçages et d'être plus cohérents avec les prévisions du dispositif VVS.

6 REFERENCES

- Abdolali A., Roland, A., Van Der Westhuysen, A., Meixner, J., Chawla, A., Hesser, T., Smith, J.M. and M. Dutour Sikiric (2020), Large-scale Hurricane Modeling Using Domain Decomposition Parallelization and Implicit Scheme Implemented in WAVEWATCH III Wave Model, *Coastal Engineering*, 157, 103656, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103656>
- Baran, S. and Lerch, S. (2015). Log-normal distribution based ensemble model output statistics models for probabilistic wind-speed forecasting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141(691) :2289–2299.
- Biscara, Laurie, (2015). MNT bathymétrie de façade Atlantique (Projet Homonim). Doi :10.17183/MNT_ATL100m_HOMONIM_WGS84.
- Boutet (2015). Bottom friction estimation for barotropic tide modelling. PhD Thesis, DOI: 10.13140/RG.2.1.1105.0488
- Couderc F, Duran A, Vila J-P (2017). An explicit asymptotic preserving low Froude scheme for the multilayer shallow water model with density stratification. *Journal of Computational Physics*, 343 : 235–270.
- The WAVEWATCH III® Development Group (WW3DG), 2019: User manual and system documentation of WAVEWATCH III® version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp. + Appendices
- Duran A, Vila J-P, Baraille R (2017). Semi-implicit staggered mesh scheme for the multi-layer Shallow Water system. *Comptes Rendus Mathématique*, 355 : 1298–1306.
- Duran, A., Vila, J.P., Baraille, R. (2020). Energy-stable staggered schemes for the shallow water equations. *Journal of Computational Physics*, 401: 109051. DOI:10.1016/j.jcp.2019.109051
- Evin, G., Lafaysse, M., Taillardat, M., and Zamo, M. (2021). Calibrated ensemble forecasts of the height of new snow using quantile regression forests and ensemble model output statistics. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 28(3) :467–480.
- Gneiting, T., Raftery, A. E., Westveld, A. H., and Goldman, T. (2005). Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum crps estimation. *Monthly Weather Review*, 133(5) :1098 – 1118.
- Hersbach, H. and P.A.E.M. Janssen, 1999. Improvement of the short-fetch behavior in the wave ocean model (WAM). *J. Atm. Ocean. Techn.*, 16, 884-892
- Jourdan D., Paradis D., Pasquet A., Michaud H., Baraille R., Biscara L., Dalphiné A., Ohl P., 2020. La phase-3 du projet HOMONIM : définition et contenu, pp 779-788, doi :10.5150/jngcgc.2020.087.
- Krien, Y., Pasquet, A., LeBelleguic, R., Ciavaldini, M., Jourdan, D., HOMONIM – Phase III – Système de prévision des surcotes – Configuration TOLOSA ATL. Rapport SHOM
- Le Goff Le Gourrierc, L., Michaud, H., Sous, D., Dealbera, S., Bouchette, F., Bertin, X., Marsaleix, P., Seyfried, L., Leballeur, L., Krien, Yann, Meulé, S., Lavaud, L., Pasquet, A., Biscara, L., Brosse, F,

- SHOM, Team. (2022). Transformation des vagues et processus de dissipation sur une côte rocheuse : premiers résultats issus de la campagne de terrain RiCoR. 95-104. 10.5150/jngcgc.2022.011.
- Marsaleix, P., H. Michaud et C. Estournel (2019). « 3D phase-resolved wave modelling with a nonhydrostatic ocean circulation model ». In : *Ocean Modelling* 136, pp. 28-50. doi : <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2019.02.002>
- Meinshausen, N. (2006). Quantile regression forests. *J. Mach. Learn. Res.*, 7 :983–999.
- Meinshausen, N. and Ridgeway, G. (2006). Quantile regression forests. *Journal of machine learning research*, 7(6).
- Michaud H., Pasquet, A. (2021). Modélisation couplée états de mer - surcote dans le prototype très haute résolution Charentes. Rapport Shom, 87 pages
- Moukalled F., L. Mangani, M. Darwish, 2016. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6>
- Pasquet, A., Michaud, H., Seyfried, L. Biscara, L, Krien, Y., Baraille, R., Jourdan, D. (2021). Improving storm surge and wave forecasts from regional to nearshore scales. 9th EuroGOOS Conference, 3-5 may 2021
- Pasquet, A. (2016). HOMONIM – Phase II – Version V4 du système de prévision des surcotes – Configuration ATL. Rapport SHOM, 52 pages.
- Richard GL. (2021). An extension of the Boussinesq-type models to weakly compressible flows. *European Journal of Mechanics - B/Fluids* 2021 : 217–240.
- Taillardat, M., Mestre, O., Zamo, M., and Naveau, P. (2016). Calibrated ensemble forecasts using quantile regression forests and ensemble model output statistics. *Monthly Weather Review*, 144(6) :2375 – 2393.s
- Valcke S., Craig T., Coquart L. (2015). OASIS3-MCT User Guide, OASIS3-MCT 3.0, Technical Report, TR/CMGC/15/38, May 2015, CERFACS/CNRS SUC URA No1875, Toulouse, France