

Prévision et avertissement du risque de submersion marine : la Vigilance vagues-submersion

Didier JOURDAN - Éric CAILLAUD - Audrey PASQUET - Héloïse MICHAUD - Denis PARADIS

La capacité à anticiper et avertir, en temps réel, d'un risque de submersion marine sur une portion de littoral repose, à l'échelle nationale, sur le dispositif de Vigilance vagues-submersion (VVS). La VVS est construite sur une chaîne de valeur constituée de systèmes d'observation, de systèmes de prévision des conditions météo-océaniques au plus proche du littoral et de l'expertise des prévisionnistes de Météo France pour l'analyse de la situation, la prise en compte des vulnérabilités et des remontées terrain, puis le conseil aux autorités.

Nous proposons ici de présenter l'état de l'art opérationnel de cette chaîne de valeur en décrivant chacun des maillons et en illustrant le résultat de ce processus d'expertise par un cas de Vigilance orange aux vagues-submersion.

MOTS-CLÉS

Océanographie, météorologie, surcotes, vagues, submersions marines, prévisions numériques, systèmes opérationnels.

Introduction

Dans la nuit du 27 au 28/02/2010, la tempête Xynthia frappe de plein fouet les côtes de la Vendée et de la Charente-Maritime. À La Rochelle, le marégraphe du port de La Pallice enregistre un niveau d'eau total de 4,50 m (cote IGN 69) autour de 3 h du matin, lorsque l'onde de tempête atteint son amplitude maximum, soit 1,52 m au-dessus du niveau de marée habituel pour cette date. Plus au sud, dans la baie de l'Aiguillon, le bilan post-catastrophe dénombre 41 victimes directement liées à la submersion ainsi que de nombreux dégâts sur les biens, les équipements et de lourdes conséquences économiques et environnementales, estimés à un montant total 2,5 milliards d'euros (MTECT, 2020).

Cet évènement a dramatiquement rappelé au grand public la vulnérabilité du littoral face aux submersions marines, même protégé par des aménagements anthropiques, et encore plus violemment dans ce cas, pour lequel les conséquences se sont finalement révélées d'autant plus dévastatrices que l'aléa a croisé un usage irréfléchi de l'espace naturel.

On dénombre actuellement 1,4 million d'habitants exposés au risque de submersion marine en France (PSR, 2017). Ce risque, à défaut de mesures d'atténuation, va continuer à croître en raison des modifications de l'aléa sous l'effet combiné du changement climatique (IPCC, 2023) – élévation du niveau marin et changements des caractéristiques des phénomènes initiateurs – et de la pression économique, démographique et urbaine toujours croissante à laquelle le littoral est soumis.

Du côté de l'État, cet évènement catastrophique – auquel ont succédé les crues rapides dans le Var à peine quelques mois plus tard – a accéléré la mise en œuvre des politiques publiques en vue de réduire le risque de submersion marine. L'adoption du "Plan national submersions rapides" (PSR) en 2011 a fourni un premier cadre pour travailler sur l'amélioration de la connaissance et de la caractérisation de l'aléa, de la prévision et du suivi de l'évènement et sur l'acculturation au risque, dans un objectif global de maîtriser aux mieux la préparation, la gestion de la crise, puis le retour à la normale, d'éviter des victimes et de réduire les conséquences matérielles.

Cette première réponse de la puissance publique se prolonge, sur le long terme, avec la Stratégie nationale de gestion des risques d'inondation (SNGRI) dont un des objectifs prioritaires est "d'augmenter la sécurité des populations exposées". Cette stratégie vise à consacrer des efforts et des moyens à l'anticipation et la préparation de la crise via des dispositifs de prévision et d'avertissement.

C'est ainsi que, parmi les réponses concrètes apportées à l'échelle nationale, la capacité à anticiper un évènement de submersion marine sur tout ou partie du littoral français repose sur le dispositif de la Vigilance vagues-submersion (VVS) de Météo France. Ce dispositif a été mis en place en 2011 avec le Shom, et est amélioré depuis en continu, sous la maîtrise d'ouvrage du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (MTECT).

Après un rappel sur le phénomène des submersions marines, nous présentons plus en détail le système VVS et les capacités de prévisions sous-jacentes en insistant sur la contribution des mesures marégraphiques aux différentes étapes de conception et de validation des chaînes de modélisation. Enfin, nous illustrerons le cas mis en VVS orange et l'articulation entre prévisions numériques, observations marégraphiques, houlographiques et expertise du prévisionniste.

Les submersions marines

Le phénomène de submersion marine

Les submersions marines sont des inondations temporaires par la mer d'une zone littorale habituellement émergée, lors de conditions météoro-



logiques et océaniques défavorables. Elles touchent surtout les zones basses proches du littoral, mais des inondations peuvent se propager vers l'intérieur des terres.

Les submersions marines sont liées à une élévation du niveau et/ou une agitation inhabituelle de la surface de la mer lors d'une tempête. Elles résultent de plusieurs facteurs :

- les facteurs préexistants à la tempête que sont :
 - la morphologie naturelle du terrain dans ses parties immergées (bathymétrie), émergées (topographie) et le trait de côte qu'elle dessine ;
 - les aménagements en mer, au niveau du trait de côte ou à terre en zone rétrolittorale.
- les facteurs concomitants à la tempête que sont :
 - l'amplitude de la marée (coefficient) et sa phase ;
 - le débit des fleuves dans les espaces estuariens ou de transition fluvio-maritime ;
 - des effets de la dynamique à grande échelle signant sur tout ou partie de la colonne d'eau, comme les courants saisonniers ou encore les effets thermiques de dilatation.
- et enfin, les facteurs directement liés à la tempête et à sa chronologie :
 - la surélévation du niveau marin statique, appelée surcote météorologique, en réponse directe aux conditions météo-océaniques, résultat de :
 - la diminution de la pression atmosphérique engendrée par le centre dépressionnaire (effet du baromètre inverse) ;
 - l'accumulation d'eau à la côte sous l'effet d'entraînement du vent s'il est d'afflux ;
 - du déferlement de la houle, dont une partie de l'énergie qu'il dissipe provoque une augmentation du niveau moyen (phénomène de *wave set-up*).
 - la surélévation du niveau marin instantanée ou haute fréquence, réponse combinée à des conditions météo-océaniques locales ou distantes :
 - le flux et le reflux des vagues qui arrivent au rivage, qui influencent l'élévation instantanée du niveau

d'eau (phénomène de *wave run-up* ou jet de rive) ;

- divers phénomènes ondulatoires à plus ou moins haute fréquence, dont les ondes infragravitaires ou les ondes de seiches portuaires...

Le niveau d'eau maximal instantané atteint au-dessus de son niveau moyen habituel est ainsi déterminé par la hauteur de marée, la surcote (d'origine atmosphérique et liée aux vagues) auxquelles se combine la hauteur des vagues. La configuration du littoral et un phasage défavorable de tous ou certains de ces facteurs (forts coefficients de marée, maximum de surcote atteint au moment de la pleine mer...) constituent des circonstances aggravantes à la survenue d'une submersion.

On distingue alors trois modes de submersions qui peuvent se combiner :

- le débordement, quand le niveau marin statique pendant l'évènement est supérieur à la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel. Il entraîne le déversement direct d'importantes quantités d'eau, dont le volume dépend de la différence entre le niveau d'eau et la cote du littoral, de la durée du débordement et de la vitesse de l'écoulement ;
- le franchissement par paquets de mer, lorsque la vague dépasse la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel. Il dépend du niveau statique et des caractéristiques locales des vagues et entraîne l'accumulation d'eau plus ou moins importante selon la hauteur du franchissement, sa durée et le linéaire côtier concerné ;
- la rupture partielle ou complète du système de protection (ouvrage ou cordons naturels), sous l'action répétée du choc des vagues, qui provoque le passage à un régime d'envahissement pour les terrains en arrière de la protection et situés en dessous du niveau marin atteint pendant l'évènement.

La concomitance d'un phénomène de submersion marine avec une crue peut également entraîner une inondation dans les zones d'exutoire des bassins versants. Ce type de submersion fluvio-maritime très spécifique se rapproche de la submersion par débordement.

■ Comment mieux prévoir les submersions marines ?

Une prévision précise des submersions marines à des fins de protection des personnes et des biens est un enjeu dont une partie de la réponse repose sur la modélisation des processus météo-océaniques. Cela requiert :

- des données topo-bathymétriques (incluant le trait de côte) fines et récentes ;
- des données de forçage pour prescrire au modèle océanique les conditions aux frontières du domaine de prévision : prévisions des conditions météorologiques, prévisions des états de mer, du niveau de la marée ;
- des données de mesure pour calibrer et valider les résultats des modèles (bouées, marégraphes, observations satellitaires...) ;
- des modèles numériques capables de générer et/ou propager la bonne physique de leur frontière jusqu'à la côte.

Des modèles numériques résolvant les équations de Navier-Stokes – qui décrivent les écoulements de façon complète – à des échelles métriques, peuvent fournir une prévision fine et précise des états de mer et de la dynamique océanique dans la frange littorale. Malgré l'augmentation continue des moyens de calcul, cette modélisation n'est envisageable pour l'instant que sur de très petites zones, à titre de démonstrateur ou d'étude "à froid". C'est une perspective de progrès des programmes de R&D, mais il est tout aussi important de pouvoir étudier et disposer des modèles proposant une physique simplifiée, compatibles avec les exigences de mises en œuvre opérationnelle, c'est-à-dire de calculer et disposer chaque jour de simulations représentant des temps cumulés (d'intégration des équations) supérieurs à la centaine de jours (*cf. paragraphe VVS*).

La décennie passée a vu des avancées très importantes dans le cadre du projet HOMONIM – Historique, observation, modélisation des niveaux marins (Jourdan et al., 2020) – confié au Shom et à Météo France, sous maîtrise d'ouvrage de la DGPR – Direction générale de la prévention des risques du MTECT – et de la Direction





de la Sécurité civile et de la gestion de crise (ministère de l'Intérieur).

Elles ont conduit à une amélioration continue des capacités de prévision océaniques côtières soutenant le dispositif de la VVS, et ont amené les technologies de modélisation numérique à l'échelle des façades métropolitaines (golfe de Gascogne/Manche et Méditerranée) comme ultramarines (Antilles-Guyane, Mayotte/Réunion), à maturité.

C'est ainsi que des modèles de prévision des niveaux d'eau 2D simplifiés, de type shallow water tels que HYCOM-2D (Baraille & Filatoff, 1995 ; Bleck, 2002 ; Pasquet, 2016) et dernièrement TOLOSA-SW (module shallow water de l'outil multimodèle TOLOSA développé majoritairement par l'INSA et le Shom en collaboration avec d'autres organismes universitaires, Couderc et al., 2017 ; Duran et al., 2017, 2020), peu coûteux en temps calcul, ont été développés et sont utilisés de façon opérationnelle pour la prévision numérique des surcotes à l'échelle des façades. Ils propagent le signal de marée et les ondes de tempête de grande échelle du large vers les côtes, décrivent en partie l'évolution des masses d'eau, et permettent donc d'estimer le niveau d'eau statique, après la zone de déferlement ; ils répondent ainsi parfaitement aux besoins de prévision de façade à l'échelle nationale et peuvent être utilisés pour les problématiques d'inondation par débordement dans des systèmes plus locaux. En revanche, ils ne prennent pas en compte le *wave set-up*. Les transformations des vagues dans les zones de levage (*shoaling*) et de déferlement n'y sont pas représentées et ils ne permettent pas non plus la modélisation des franchissements par paquets de mer ; ce qui limite leur utilisation pour la modélisation de l'inondation.

La modélisation régionale des vagues est, quant à elle, basée sur le modèle spectral WAVEWATCH III (WW3DG, 2019) ; ce type de modèle à phase moyennée fournit les caractéristiques moyennées des champs de vagues, mais ne permet pas de représenter finement les processus littoraux à l'échelle d'une vague individuelle, ce qui limite son utilisation pour la modélisation fine

des inondations par franchissement de paquets de mer par exemple.

Grâce à ces avancées, la capacité opérationnelle actuelle fournit des prévisions numériques des surcotes et des vagues, avec une résolution de quelques centaines de mètres (entre 200 et 600 m suivant les façades) le long de tout le littoral français, heure par heure, jusqu'à cinq jours d'échéance, et actualisées plusieurs fois par jour.

Le couplage de ces deux types de modèles, en passe d'être opéré en routine sur une portion de façade permettra – sous quelques mois – de représenter plus complètement la surcote météorologique grâce à la prise en compte du *wave set-up* et constituera la prochaine avancée importante dans l'amélioration du réalisme des prévisions des submersions marines.

L'étape suivante passe par la représentation de la surcote instantanée, via le recours à des modèles non hydrostatiques, qui fournissent, au prix d'un coût calcul encore difficilement conciliable avec une mise en œuvre opérationnelle à grande échelle, une représentation vague à vague de la dynamique littorale, incluant jet de rive, ondes infragravitaires, etc. La prévision du risque de submersion évoluera ainsi vers la prévision de l'inondation à proprement parler. Le modèle non hydrostatique 2D TOLOSA-LCT (Richard, 2021) présente aujourd'hui des performances calculatoires significativement plus élevées que les modèles usuels de ce type, et pourra répondre aux exigences d'une mise en œuvre opérationnelle en temps réel pour des prévisions de façades aux échelles départementales, voire régionales.

La capacité opérationnelle de prévision des vagues et des niveaux marins s'améliore également en apportant une information sur l'incertitude des prévisions. Cette amélioration est actuellement réalisée par la mise en œuvre de la Prévision d'ensemble, qui est une technique permettant 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 de l'ensemble, au nombre de quelques dizaines). Cela permet de connaître la

prévisibilité des modèles pour un jour donné, ou bien mettre à jour l'existence de scénarios océaniques alternatifs pour ce même jour. Une seconde voie d'amélioration, complémentaire, porte sur l'adaptation statistique des sorties de modèle pour les corriger en s'appuyant sur des prévisions et des observations passées, via l'utilisation d'outils statistiques ou d'intelligence artificielle.

Les modèles numériques de l'océan, quelles que soient les équations plus ou moins simplifiées qu'ils adoptent, utilisent des paramétrisations, notamment pour la prise en compte des phénomènes dissipatifs (couches limites et effets des frictions de fond et de surface, déferlement), et requièrent donc une étape de calibration à l'aide de données d'observation issues notamment des réseaux pérennes – houlographiques et marégraphiques – ou bien de campagnes terrain dédiées. Ces données permettent également d'évaluer les performances physiques des modèles pour une configuration donnée, d'inter-comparer plusieurs modèles, ou encore de s'assurer de la non-régression lors des évolutions des outils numériques dans la chaîne opérationnelle.

La Vigilance vagues-submersion

■ Un dispositif d'avertissement sur le risque de submersion marine

Afin d'apporter l'information la plus simple, accessible et utile à tous, sur les dangers de phénomènes météorologiques extrêmes, Météo France a mis en place, en 2001, le dispositif national de vigilance météorologique. La Vigilance fournit simultanément à la population, aux pouvoirs publics – dont les autorités de gestion de crise et de situations sanitaires exceptionnelles – ainsi qu'aux médias, l'information de référence en cas de phénomènes météorologiques dangereux pouvant affecter le territoire. Elle indique, pour chaque département, le niveau de danger d'une situation météorologique, les conséquences des événements dangereux annoncés et les précautions pour se protéger. En 2011, le dispositif a été complété avec la Vigilance vagues-submer-



sion (VVS) – en partenariat avec le Shom et la DGPR – pour avertir des dangers sur le littoral, liés aux vagues et aux submersions marines. La VVS évolue depuis en continu, avec les progrès des capacités de modélisation (page 55, § *Comment mieux prévoir les submersions marines ?*) pour fournir une information plus raffinée géographiquement, à plus longue échéance et au profit de nouvelles missions de l'État (RDI-L : référent départemental inondation-littoral). La VVS est la résultante d'une phase de mise en place – régulièrement révisée – et d'un processus quotidien d'expertise et de production des prévisionnistes Marine de Météo France, pour élaborer le niveau d'avertissement synthétique, pertinent et accessible au plus grand nombre.

La mise en place de la VVS a nécessité plusieurs travaux :

- pour chaque portion de littoral, un inventaire des événements de référence et de leurs impacts a d'abord été réalisé. Un recensement des zones vulnérables à l'aléa vagues-submersion a également été accompli avec l'appui des différents services de l'État (DREAL, DDTM, préfetures) ;
- des rejeux par modélisation des situations répertoriées les plus intéressantes

ont été effectués afin de disposer des caractéristiques météo-océaniques à l'origine de ces situations de submersion ;

- des données statistiques de durée de retour de niveaux marins calculées par le Shom et d'état de la mer calculées par le CEREMA ont été mises à disposition et exploitées pour caler parfois les niveaux de vigilance à la fréquence d'occurrence des événements de submersion ;
- enfin, l'ensemble de ces données a permis d'établir des tableaux de seuils pour chaque portion de littoral du territoire couvert par la VVS.

La résultante d'un processus d'expertise

La VVS est produite deux fois par jour, hors actualisation intermédiaire lorsque l'évolution de la situation en cours l'exige, et fait l'objet d'une organisation et d'un suivi opérationnels H24 au centre national de prévision de Météo France.

Pour élaborer la VVS, les prévisionnistes disposent des prévisions numériques de niveau, surcote et vagues sous différentes formes. Ces prévisions résultent de la mise en œuvre quatre fois par jour (réseaux 00 06 12 et 18) des

modèles hydrodynamiques décrits supra (page 55, § *Comment mieux prévoir les submersions marines ?*), alimentés par les prédictions de marée du Shom et les prévisions d'évolution des conditions météorologiques (vent et pression), telles que vues par plusieurs modèles atmosphériques européens (IFS du ECMWF) et nationaux (ARPEGE et AROME de Météo France).

L'étude croisée, par le prévisionniste Marine, de ces prévisions numériques à proximité du littoral, des tableaux de seuils ainsi que d'autres facteurs conjoncturels, combinée à sa connaissance de la vulnérabilité du littoral et des événements passés permet d'établir un niveau de risque de l'aléa vagues-submersion par portion de littoral.

Cette étude inclut l'étape indispensable de confrontation des prévisions numériques avec la situation terrain en cours, afin de valider le comportement des modèles de vagues et de surcotes. Pour cette phase, le prévisionniste s'appuie sur les observations temps réel, en mer et à la côte, d'état de mer (hauteur, direction, période, des vagues et de la houle) mesuré par les bouées météo et houlographiques et sur les observations de la hauteur d'eau mesurée par les marégraphes côtiers du réseau RONIM du Shom.

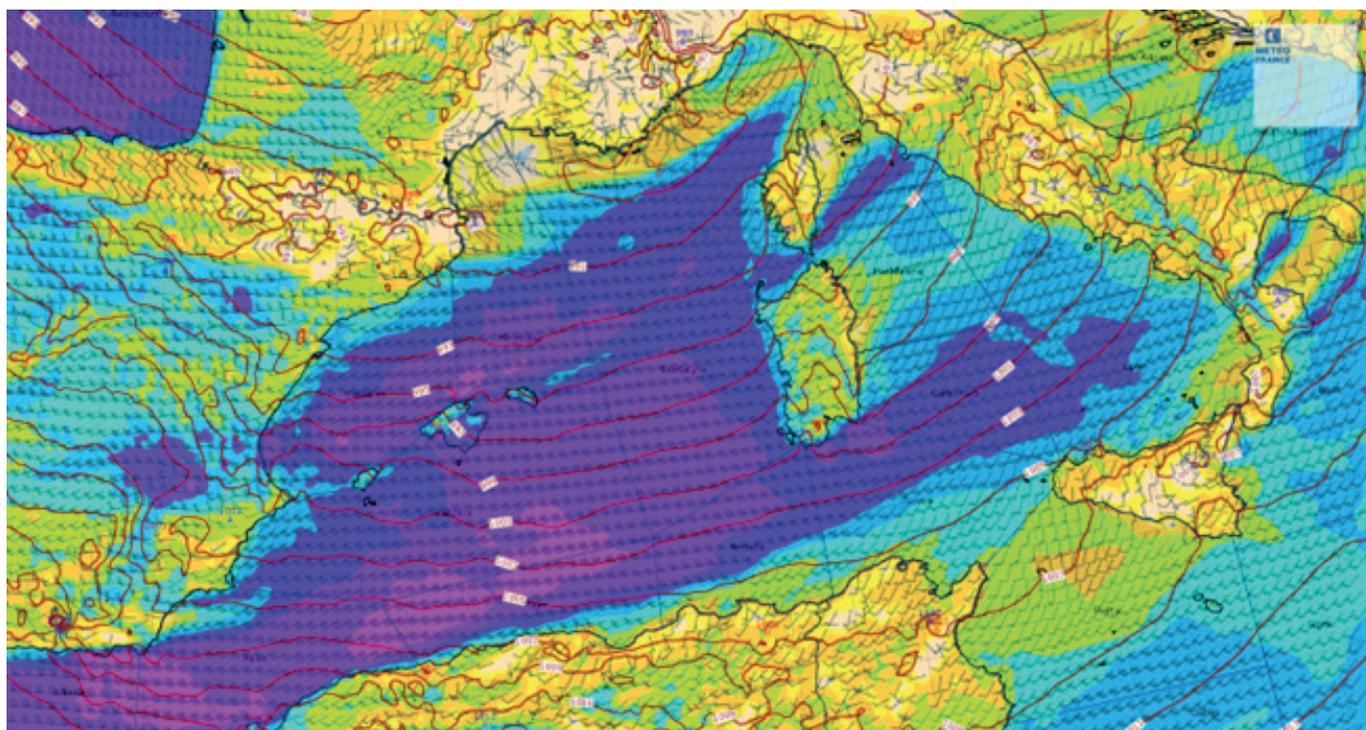


Figure 1. Carte de pression (isolignes), vitesse et direction du vent (et barbules) prévues par le modèle ARPEGE pour le 17/01/2023 à 06 H UTC (prévisions à 06H d'échéance) sur la Méditerranée occidentale.



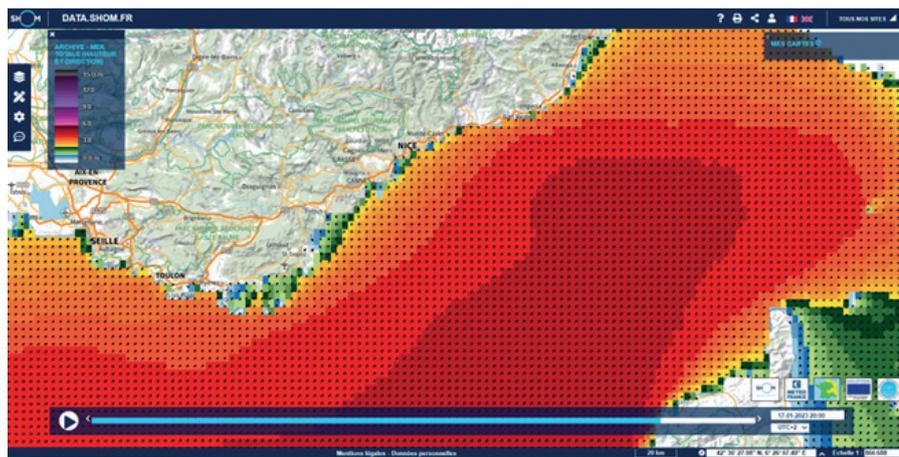


Figure 2. Carte de hauteur et direction des vagues prévues par le modèle de vague de la VVS (modèle WAVEWATCH III) pour le 17/01/2023 à 20 H UTC (prévisions à 20H d'échéance) sur le nord du bassin Liguro-Provençal.

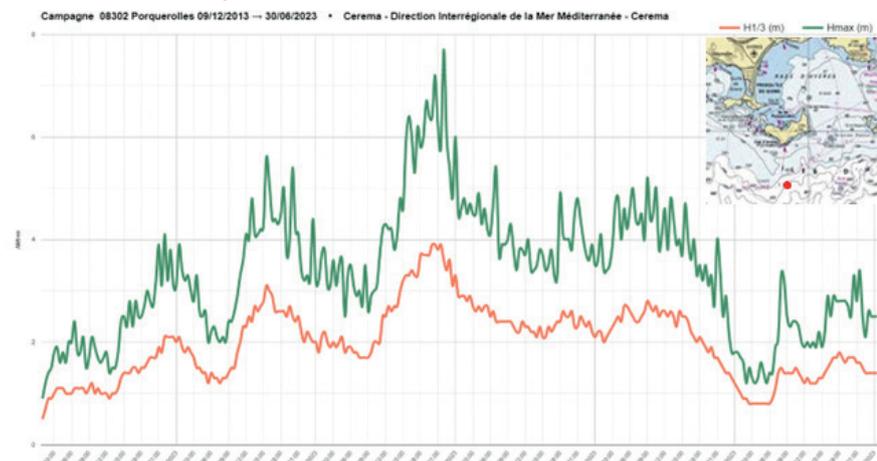


Figure 3. Observation des hauteurs significatives (H1/3) en rouge et maximale, en vert, des vagues à la bouée Porquerolles entre le 15 et le 20/01/2023.



Figure 4. Carte des surcotes prévues par le modèle de surcote de la VVS (modèle HyCom-Med HOMONIM) pour le 17/01/2023 à 13 H UTC (prévisions à 13H d'échéance) sur le nord du bassin Liguro-Provençal.

néen, avec des vents de 7 à 8 Beaufort, localement 9 sur le sud du bassin (figure 1). Ces vents forts se maintiennent toute la journée de mardi et génèrent une puissante houle de sud-ouest, atteignant l'ouest de la Corse dès le mardi matin, puis grossissant en cours de journée.

Cette houle puissante, de période supérieure à 10 s, se propage également vers le continent en s'orientant au sud à sud-ouest (figure 2) et touche, à la mi-journée, l'est du département des Bouches du Rhône et l'ouest du département du Var. La mer devient forte dans l'après-midi près du littoral, croisée avec le renforcement du vent consécutif à une bascule au secteur Ouest du vent dans le golfe du Lion. En soirée, la mer totale approche 4 m (H1/3) à la bouée côtière de Porquerolles et atteint des hauteurs maximales de 7,7 m (figure 3). La mer devient forte également en soirée sur le littoral de la Côte d'Azur, dominée par la houle de sud-ouest.

Des niveaux marins élevés sont généralisés sur le nord du bassin Liguro-Provençal (figure 4), résultats de l'onde de tempête générant des surcotes de 25 à 30 cm, dont le maximum est atteint du nord de la mer de Ligure jusqu'au département du Var et le nord de la Corse. Le niveau des plus hautes mers astronomiques (PHMA)¹ est dépassé partout.

La figure 5 illustre comment le marégraphe de Toulon a mesuré cet évènement en termes de surcotes et de hauteur d'eau totale, avec une signature de l'onde de surcote sur les journées du 17 et 18/01 dont le maximum est atteint le 17/01 vers 11H30 (UTC). Sur cette même période, on peut voir que la hauteur d'eau totale est maximale le 17/01/2023 à 15h20 (84 cm), amplifiée par une surcote de 30 cm, et dépasse le niveau des PHMA.

Ce niveau maximum observé correspond, d'après les données de statistiques de niveaux marins extrêmes à disposition, à un niveau marin de période de retour inférieure à 5 ans.

¹ Plus hautes mers astronomiques. Niveau théorique atteint par une pleine mer de coefficient 120. Ce niveau peut être dépassé lors d'évènements météorologiques exceptionnels générant des surcotes de tempêtes.



C'est grâce à cette chaîne d'expertise que le niveau de risque vagues-submersion est défini, puis restitué sous forme de la carte de vigilance, des bulletins de suivi et du bulletin dédié vers le RDI-L (<https://vigilance.meteofrance.fr/>).

Un cas de VVS orange

Dans la nuit du lundi 16 au mardi 17 janvier 2023, en marge de la tempête Fien qui a circulé en Manche en journée, un flux rapide d'ouest à sud-ouest se met en place sur le bassin méditerranéen,



Figure 5. Séries temporelles haute fréquence des prévisions et des observations au marégraphe de Toulon. En haut sont représentées la hauteur moyenne sans effet atmosphérique (marée, en marron), les prévisions de la hauteur d'eau totale hauteur d'eau à 00H UTC pour les 24 heures à suivre (rouge) et les observations de la hauteur d'eau totale (bleu) mesurées par le marégraphe. En bas sont représentées les prévisions de surcote à 00H UTC pour les 24 heures à suivre (rouge) et les surcotes calculées par différence des courbes des hauteurs d'eau totale observées et de la hauteur de la marée locale.

L'effet combiné d'un niveau marin dépassant la PHMA et des fortes vagues a engendré un risque de submersion pour les départements littoraux de la région PACA et la Corse : les départements du Var et de la Corse du sud ont alors été placés en vigilance orange vagues-submersion (figure 6). En retour d'expérience, il sera reporté des submersions par franchissement de paquets à Ajaccio et Cannes où une demande de catastrophe naturelle a été émise par la commune.

L'exploitation des données d'observation marégraphique en temps réel est donc un des piliers du dispositif VVS.

Ces données sont indispensables aux prévisionnistes Marine pour le suivi en temps réel de l'évènement et pour corriger, si besoin, les prévisions de surcotes. Sur ce cas (figure 5), on peut voir que les observations (en rouge) confirment les prévisions du modèle par la très bonne superposition des deux courbes (rouge et marron en haut : rouge et bleu en haut) pendant l'évènement. Dans d'autres cas, le modèle peut présenter des biais qui sont parfois relativement stables sur quelques jours, et qui peuvent être ainsi corrigés par l'observation.

Ces écarts entre prévisions numériques de modèles et réalité sont dus

à certaines limitations intrinsèques des modèles à représenter la complexité des phénomènes, en raison d'hypothèses physiques simplificatrices (l'absence de modélisation de la surcote due aux vagues, etc.), imposées par les contraintes de rapidité et de mise en œuvre opérationnelle (cf. paragraphe modélisation). Elles trouvent aussi leur source dans les incertitudes des forçages atmosphériques qui alimentent les modèles de vagues et de surcote. Dans les modèles actuels, l'erreur de la prévision numérique des niveaux d'eau et des vagues par rapport aux observations marégraphiques et houlographiques est de l'ordre de 10 à 20 cm et 20 à 25 cm respectivement, en erreur quadratique, avec une répartition non homogène le long des façades.

A posteriori, les données marégraphiques contribuent également à l'évaluation systématique des épisodes VVS à partir du niveau orange, ainsi que de certains épisodes jaunes. Ces évaluations peuvent conduire à l'évolution des critères de vigilance.

Conclusion

Les dix dernières années ont vu, sous l'impulsion des politiques publiques de prévention et gestion des risques, des progrès importants des capacités opérationnelles de prévision numérique pour anticiper le risque de submersion marine. Sur cette période, la résolution

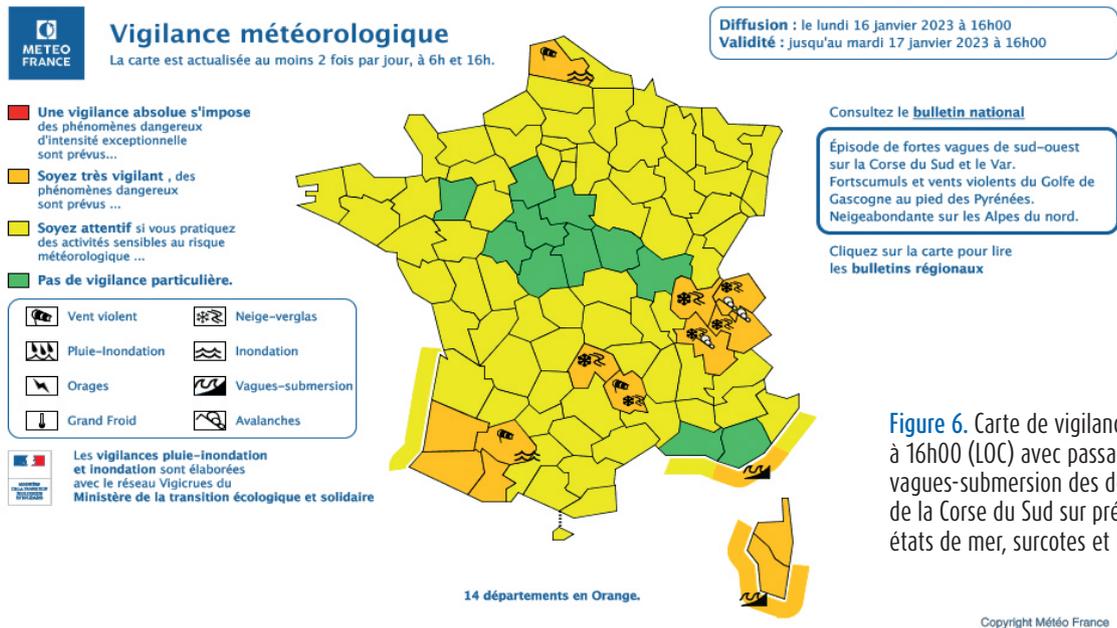


Figure 6. Carte de vigilance émise le 16/01/2023 à 16h00 (LOC) avec passage en vigilance orange vagues-submersion des départements du Var et de la Corse du Sud sur prévision et expertise des états de mer, surcotes et hauteur d'eau totale.



spatiale des modèles de surcotes et des vagues a augmenté d'un facteur 10 en domaine côtier, suivant les zones, portée par les développements de schémas numériques plus performants – moins dissipatifs, plus stables et plus rapides – et l'accroissement des capacités des calculateurs qui ont permis de faire chuter les temps de calcul dans des délais acceptables pour une mise en œuvre opérationnelle au quotidien. La capacité opérationnelle actuelle, qui sous-tend le dispositif de la Vigilance vagues-submersion, permet ainsi de produire en 2023 des prévisions numériques des surcotes et des vagues, avec une résolution de quelques centaines de mètres le long de tout le littoral français, heure par heure, jusqu'à 4 à 5 jours d'échéance, et actualisées plusieurs fois par jour. Cette capacité reste cependant basée sur une modélisation non couplée, empêchant les prévisions numériques d'intégrer les effets réciproques entre vagues et niveaux/courants ou de modifications des conditions de rugosité en surface.

Une prochaine étape est donc de porter en opérationnel, d'abord à l'échelle d'une portion de façade, puis progressivement de l'ensemble des côtes françaises, une modélisation couplée vagues, niveaux et courants. Cela permettra d'améliorer la représentation des processus physiques dans les modèles et le réalisme des prévisions opérationnelles sur le littoral. Cela demande un gain d'environ un facteur 10 supplémentaire dans la résolution des grilles des modèles. En parallèle, un autre axe d'amélioration consistera à mieux décrire l'incertitude des modèles (météo, vagues, niveau marin) grâce à la prévision d'ensemble.

Au-delà, l'objectif consiste à passer de la prévision des conditions susceptibles d'engendrer une submersion marine à une prévision des zones rétrolittorales effectivement submergées. Cela demande de représenter la surcote instantanée, via le recours à des modèles non hydrostatiques, qui fournissent une représentation vague à vague de la dynamique littorale, incluant jet de rive, ondes infragravitaires, etc.

Dans toutes ces étapes, la mise au point

et la qualification des configurations des modèles reposent sur la confrontation à une vérité terrain qu'apportent les observations, qu'elles soient mesurées *in situ* par les marégraphes et houlographes ou bien acquises par satellite. Combiné aux travaux sur l'amélioration de l'estimation des incertitudes de prévision au travers de l'approche ensembliste, le dispositif Vigilance vagues-submersion pourra ainsi bénéficier d'une information plus précise sur les valeurs de surcotes et vagues de tempêtes, mais aussi sur la confiance à accorder à ces prévisions.

De même, les autres usagers (services déconcentrés, gestionnaires d'ouvrages, services et autorités de gestion de crise) pourront disposer de l'information adéquate pour alimenter leurs applications et outils avuls d'aide à la décision de manière cohérente avec le dispositif national. ●

Contacts

Didier JOURDAN¹, didier.jourdan@shom.fr,
Éric CAILLAUD², Audrey PASQUET¹,
Héloïse MICHAUD¹, Denis PARADIS²

¹ Shom-Toulouse, 42 av Coriolis 31057
Toulouse, France

² Météo France DirOP/MAR, 42 av Coriolis
31057 Toulouse, France

Références

IPCC, 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

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.

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 p. + Appendices

MTECT, 2020 : "Tempête Xynthia : 10 ans d'action pour renforcer la prévention des risques d'inondations et de submersion marine" - <https://www.ecologie.gouv.fr/xynthia-10-ans-daction-renforcer-prevention>.

PSR, 2017 : "Bilan du plan Submersion Rapide" - https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/170427__livret_Bilan_PSR.pdf.

Baraille R., Filatoff N. (1995): *Modèle shallow-water multicouches isopycnal de Miami*. Technical Report. 003/95.

Bleck R. (2002). *An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnal-Cartesian coordinates*. Ocean Modelling, Vol. 4(1), pp. 55-88. [http://dx.doi.org/10.1016/S1463-5003\(01\)00012-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1463-5003(01)00012-9)

Pasquet, A. (2016). *HOMONIM - Phase II - Version V4 du système de prévision des surcotes - Configuration ATL*. Rapport SHOM, 52 pages.

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.

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

Richard GL. (2021). *An extension of the Boussinesq-type models to weakly compressible flows*. European Journal of Mechanics - B/Fluids 2021 : 217-240.

ABSTRACT

The ability to anticipate and warn, in real time, of a risk of storm surge on a part of coastline is based, at national level, on the Vigilance Vagues-Submersion (VVS) system. The VVS is built on a value chain comprising observation systems, forecasting systems for combined weather and ocean conditions as close as possible to the coast, and the expertise of Météo-France forecasters in analyzing the situation, considering vulnerabilities and the feedback from the field, in order to advice the authorities. We propose here to present the operational status of this value chain, describing each component and illustrating the results of this expertise process with a case of orange warning report for waves and storm surge.