



Outils d’anticipation et de prévision des submersions marines sur le bassin d’Arcachon : Une méthodologie basée sur une base de scénarios précalculée

**Sophie LECACHEUX ¹, Jeremy ROHMER ¹, Eva MEMBRADO ¹,
Andrea Gilberto FILIPPINI ¹, Rodrigo PEDREROS ¹, Déborah IDIER ¹,
Denis PARADIS ²**

1. BRGM, Europarc, 24 Av. Léonard de Vinci, 33600 Pessac, France.

s.lecacheux@brgm.fr

2. Météo-France, DIROP/MAR/DAS, Toulouse, France.

denis.paradis@meteo.fr

Résumé :

Depuis 2018, les Directions Départementales des Territoires et de la Mer (DDTM) sont chargées d’apporter un appui aux préfetures sur la gestion des crises submersion marine en tant que Référent Départemental Inondation (RDI). Cette communication présente l’approche développée sur le Bassin d’Arcachon pour la prévision des submersions marines basée sur une base de scénarios de submersion précalculée (BDD) par une approche de modélisation hydrodynamique. Initialement réalisée à la demande de la mission RDI, cette BDD constitue en premier lieu un atlas cartographique de Zones d’Inondation Potentielle (ZIP) pour un ensemble de conditions météo-marines réalistes permettant d’interpréter les prévisions météo-marines (vent, surcote et vagues) en zones submergées en fonctionnant par analogie. Capitalisant sur ce travail, des méthodes de types machine learning ont été développées dans le cadre du projet ANR ORACLES, afin de remplacer les modèles numériques par des métamodèles en vue de réaliser des prévisions en temps réel. Les tests préliminaires réalisés sur la tempête Xynthia montrent que les approches proposées permettent d’estimer correctement les niveaux marins et les cartes de submersion sur le Bassin d’Arcachon à partir des conditions de tempête à l’houlographe du Cap-Ferret. Si ces résultats doivent être consolidés sur d’autres tempêtes, ils offrent des perspectives encourageantes sur l’utilisation de métamodèles pour réaliser des prévisions opérationnelles de cartes de submersion dans un cadre de prévision d’ensemble.

Mots-clés :

Bassin d’Arcachon, Submersion marine, Prévision.

1. Introduction

Depuis 2011, les Directions Départementales des Territoires et de la Mer (DDTM) sont chargées d’apporter un appui aux préfetures sur la gestion des crises “inondation” dans le cadre du dispositif d’Organisation de la Réponse Sécurité Civile (ORSEC) en tant que Référent Départemental Inondation (RDI). Si cette mission concernait initialement les crues, elle a été étendue en 2018 aux submersions marines. Le RDI doit être en mesure d’interpréter les données de prévision de Météo-France et de les traduire en conséquence attendues sur les enjeux territoriaux. Récemment, plusieurs initiatives locales ont émergé pour développer des outils d’aide à la décision pour les missions RDI ou les collectivités de l’échelle d’un site, comme la plage de Biarritz (SOMDECOSTE *et al.*, 2019), ou d’un département comme en Charente-Maritime (SURVEY17). Malgré les progrès dans le développement de nouvelles générations de modèles hydrodynamiques à hautes performances (FILIPPINI *et al.*, 2018), le principal défi reste la puissance de calcul nécessaire pour exécuter des simulations avec une chaîne de modèles de résolutions de plus en plus fines jusqu’à une résolution métrique à la côte (BROCCHINI, 2013). Ce défi est d’autant plus important pour réaliser des simulations d’ensemble (avec plusieurs dizaines de membres) permettant de prendre en compte les incertitudes de prévision dans l’aide à la décision. Pour pallier cette limite, l’approche de « métamodélisation » ouvre des perspectives encourageantes pour le calcul intensif et la prévision des submersions (LECACHEUX *et al.*, 2021). Via un apprentissage réalisé sur une base de données précalculée (BDD), les métamodèles peuvent prédire, à partir des prévisions marines, des indicateurs clés de la submersion (IDIER *et al.*, 2021) voire des cartes de submersion (PERRIN *et al.*, 2020) avec des temps de calcul négligeables. Cette communication présente l’approche développée sur le Bassin d’Arcachon basée sur une base de scénarios de submersion précalculée. Initialement réalisée à la demande de la mission RDI, cette BDD constitue en premier lieu un atlas cartographique de Zones d’Inondation Potentielle (ZIP) pour un ensemble de conditions météo-marines réalistes permettant d’interpréter les prévisions météo-marines (vent, surcote et vagues) en zones submergées en fonctionnant par analogie. Capitalisant sur ce travail, des méthodes de types *machine learning* ont été développées dans le cadre du projet ANR ORACLES, afin de remplacer les modèles numériques par des métamodèles (construits à partir de la BDD) en vue de réaliser des prévisions en temps réel. Dans cet article, on présente la construction de la BDD (section 2) et trois approches complémentaires pour son exploitation (section 3) : (1) l’identification d’un scénario analogue aux conditions prévues (2) l’utilisation d’un métamodèle pour prédire les niveaux marins dans le bassin combiné à un analogue pour prédire la carte de submersion (3) l’utilisation d’un métamodèle qui prédit directement la carte de submersion. Une démonstration est présentée sur la tempête Xynthia de février 2010 (section 4). La discussion détaille les limites et futures applications prévues pour la prévision d’ensemble des submersions marines sur le Bassin d’Arcachon (section 5).

2. Construction de la base de données

Cette section retrace de manière très succincte la construction de la BDD, le rapport de LECACHEUX *et al.*, (2023) apportant une description plus détaillée.

2.1 Détermination des scénarios

Les conditions de tempête sont construites sur la base d'une analyse statistique tri-variée des extrêmes sur les conditions de vent, de vagues et de surcotes à l'houlgraphe du Cap-Ferret située à 50 m de fond à face à l'entrée du bassin (cf. Figure 1, gauche). Les données de référence sont extraites sur la période 1979-2009 à partir des BDD CFSR (SAHA *et al.*, 2010) pour le vent, ANEMOC 3 (RAOULT *et al.*, 2018) pour les vagues et MARS30 (MUGICA *et al.*, 2014) pour la surcote. Après avoir ajusté des lois de probabilités pour les hauteurs significatives de vagues (Hs), les surcotes de pleine mer (SPM) et l'intensité du vent (U) à l'aide de la loi Pareto Généralisée (COLES *et al.*, 2001), les modèles de dépendance sont ajustés pour U, Hs et SPM selon le modèle dit « conditionnel » de HEFFERMAN et TAWN (2004) tout en gérant les co-variables (période pic T_p , directions vagues D_p et vents D_u). Enfin, un grand nombre de combinaisons possédant les mêmes caractéristiques statistiques que les données d'entrée sont générées via des simulations de Monte-Carlo. Pour constituer les scénarios de l'atlas, on sélectionne 50 conditions de tempêtes modérées à fortes ($H_s > 4\text{m}$) via un algorithme de *machine learning* (CAMUS *et al.*, 2011) visant à maximiser la diversité des scénarios (cf. Figure 1, droite). Ces 50 conditions sont croisées à 10 niveaux de marée (variant de 1 m à 2.8 m NGF au marégraphe par pas de 20 cm), portant le nombre total de scénarios à 500. Chaque scénario est donc décrit par 6 paramètres de tempête à l'houlgraphe (U, D_u , Hs, T_p , D_p , SPM) et un niveau de pleine mer au marégraphe d'Arcachon-Eyrac.

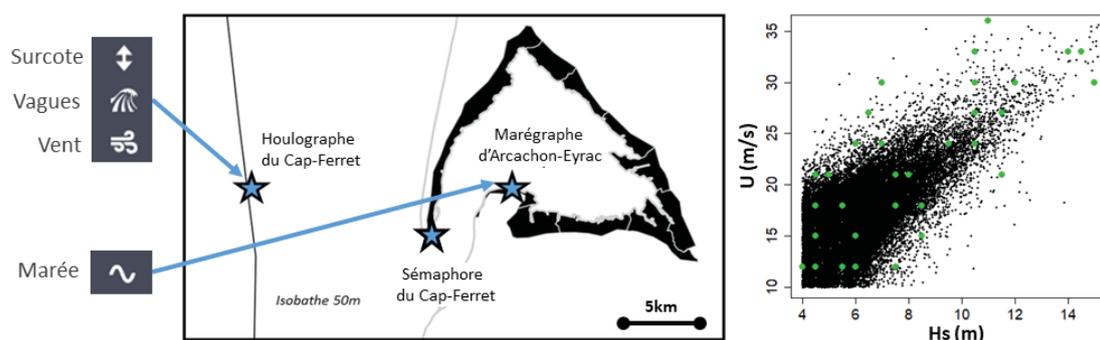


Figure 1. Gauche : Localisation des points de référence pour construire les scénarios. Droite : Simulations Monte Carlo (pts noirs) et sélection des 50 scénarios (pts verts).

2.2 Mise en place et validation du modèle de submersion

Le modèle de submersion comprend un chaînage des modèles de vague WW3 (Tolman, 2014) et d'hydrodynamique UHAINA (FILIPPINI *et al.*, 2018) sur un maillage non

Thème 6 – Risques côtiers

structuré d'une résolution kilométrique au large (isobathe 50m) à décimétrique à terre. Il permet de simuler la propagation des vagues et des niveaux de l'houlographe jusqu'à l'intérieur du bassin, la génération de la surcote liée aux vagues, du clapot et de la surcote induits par le vent local, et enfin la submersion par débordement. La validation est réalisée en simulant 4 tempêtes tests (Klaus, Xynthia, Emma, Justine), avec la marée FES2014 (LYARD *et al.*, 2021), les données observées de vent et de vagues et des réanalyses de surcote. Sur le niveau marin maximum, la comparaison entre simulations et observations au marégraphe montre des erreurs inférieures à 10 cm (ex. sur Xynthia et Justine, Figure 2). Concernant les surfaces inondées, seule Xynthia dispose d'observations. Les secteurs inondés sont globalement bien reproduits, les principales différences étant localisées sur des secteurs soumis à des processus non pris en compte comme les franchissements sur le quartier du Mauret à Andernos (Figure 4).

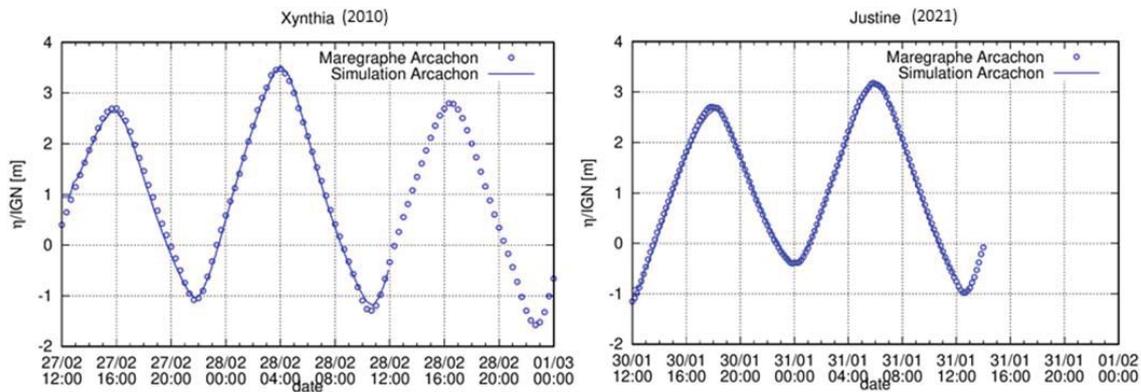


Figure 2. Comparaison des niveaux marins simulés et observés au marégraphe.

2.3 Réalisation de la BDD synthétique

La modélisation de la submersion est réalisée sur un cycle de marée en appliquant des forçages stationnaires de surcote, vent et vagues. Contrairement aux simulations réalisées sur les tempêtes test, les forçages (sauf la marée) ne sont pas appliqués de manière dynamique (avec des séries temporelles). Ce choix, motivé par un souci de simplification, introduit une approximation dans l'estimation de la surcote. Cela dit, des tests réalisés sur les 4 tempêtes ont montré que les niveaux marins maximums simulés avec les forçages dynamiques ou les conditions à la pleine mer (+/-1h) stationnaires étaient proches avec des différences inférieures à 10 cm à l'entrée et 15 cm en fond de bassin (LECACHEUX *et al.*, 2023). Dans la BDD ainsi générée, les niveaux marins maximums au marégraphe varient de 2.6 m à 4.4 m NGF. A titre de comparaison, les niveaux annuel et centennal sont resp. de 3 m et 3.7 m NGF (MUGICA *et al.*, 2014). La BDD permet donc de balayer une large gamme d'évènements. Une analyse de sensibilité a par ailleurs mis en évidence l'importance prépondérante des paramètres SPM, Hs et U sur les résultats, le vent étant particulièrement critique en fond de bassin.

3. Méthodes pour l'exploitation de la BDD pour la prévision des submersions

Les trois approches décrites ci-dessous (Figure 3) ont toutes pour objectif de prédire une carte de submersion sur l'ensemble du bassin à partir de conditions « cibles » caractérisées par (1) la marée prédite au marégraphe et (2) des conditions de tempête à l'houlographe à la pleine mer décrites par les 6 paramètres (U, Du, Hs, Tp, Dp, SPM).

M1 : Recherche d'analogues : Dans cette approche, l'objectif est d'identifier dans la BDD, le scénario le plus proches des conditions « cibles ». Pour cela, un calcul de similarité est réalisé sur les 6 paramètres de tempête (U, Du, Hs, Tp, Dp, SPM) avec la fonction de distance de CAMUS *et al.*, (2011), et la marée la plus proche de celle recherchée est sélectionné. A noter que les 6 paramètres ne sont pas considérés de la même manière car ils n'ont pas la même influence (cf. section 2). Le calcul fait intervenir une pondération (SPM=1.5, Hs=1, U=1.5, Tp=1, Dp=0.5, Du=1.5) déterminée notamment grâce à une analyse de sensibilité (BREIMANN, 2001).

M2 : Métamodèle niveau marin + analogue : Ici, la BDD est tout d'abord exploitée pour construire un métamodèle permettant de prédire, à partir des mêmes conditions « cibles », le niveau marin maximum sur un point de référence pour chaque commune. La méthode choisie se base sur la régression par processus Gaussien en supposant une tendance linéaire, un modèle de covariance Matérn 5/2 et une estimation des paramètres par maximisation de la vraisemblance (RASMUSSEN & WILLIAMS, 2006). La validation croisée sur les scénarios de la BDD montre une erreur de prédiction inférieure au centimètre sur l'ensemble des points du bassin. Ensuite, un analogue est sélectionné dans la BDD pour chaque commune (un par commune), en identifiant le scénario dont le niveau marin maximum le plus proche du niveau recherché.

M3 : Métamodèle cartographique : Dans cette approche, la BDD est exploitée pour construire, pour chaque commune, un métamodèle capable de prédire la carte de submersion. A partir du niveau marin maximum prédit par le métamodèle de niveau marin, la recherche d'analogue est remplacée par un second métamodèle selon l'approche décrite en détail par ROHMER *et al.*, (2023). Celle-ci est basée sur la combinaison de modèles de régression par processus Gaussien et d'une méthode de réduction de dimension. Cette dernière se base sur une méthode de *deep learning* (autoencoder) dont les paramètres de modélisation sont choisis par validation croisée.

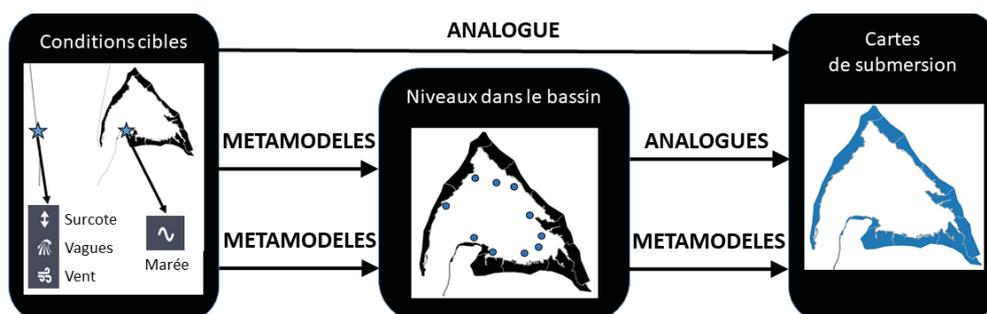


Figure 3. Illustration des 3 méthodes.

4. Démonstration sur la tempête Xynthia (janvier 2010)

Les trois méthodes sont testées pour estimer les niveaux marins et la submersion générés par la tempête Xynthia à partir de la marée prédite au marégraphe (2.63 m NGF) et des caractéristiques de la tempête à l'houlographe au moment de la pleine mer (SPM=0.44, Hs=6.7, U=23.6, Tp=12, Dp=266, Du=250). Le Tableau 1 compare les estimations de niveau marin maximum réalisées sur les 10 points de référence (un par commune) avec la simulation numérique présentée section 2, l'analogue le plus proche (tempête 25 : SPM=0.5 m, Hs=5 s, U=21 m/s, Tp=10 s, Dp=280°, Du=230° + marée : 2.6 m NGF) et le métamodèle de niveau marin. Quelle que soit la méthode, les niveaux maximaux estimés sont proches avec des différences de 10 cm à 15 cm en fond de bassin. Les différences observées sont dues:

- D'une part aux approximations inhérentes à chaque méthode sur l'estimation de la surcote dans le bassin : simulation dynamique, apprentissage sur des simulations stationnaires, scénario proche/analogue, etc. ;
- D'autre part à la manière différente de considérer la marée : dans la simulation la marée est propagée à partir des données FES2014, pour l'analogue il s'agit du niveau le plus proche disponible dans l'atlas (pas de 20 cm), alors que le métamodèle utilise directement la marée prédite au marégraphe.

Sur le cas de Xynthia, c'est le métamodèle qui fournit la meilleure estimation par rapport à la mesure du marégraphe (3.58 m NGF), alors que la simulation numérique et l'analogue (tempête 25) ont tendance à sous-estimer un peu le niveau maximum. La Figure 4 compare les résultats obtenus sur les communes d'Andernos (nord-est du bassin) et Gujan Mestras (sud du bassin) avec les levés terrain post-tempête. De manière générale les 3 méthodes reproduisent bien l'emprise et les hauteurs d'eau maximales atteintes à terre (à l'exception du quartier du Mauret car les franchissements ne sont pas considérés dans le modèle), toutes les cartes étant assez comparables. Cependant, comme attendu suite à l'analyse des niveaux marins, la simulation et l'analogue (tempête 25) prédisent des secteurs submergés un peu moins étendus que les métamodèles. Les différences les plus visibles concernent les secteurs (cerclés en orange) où le niveau marin prédit est proche du seuil altimétrique de débordement entraînant selon les cas une faible submersion ou pas de submersion. Sur ce cas, la simulation et l'approche M2 fournissent les cartes les plus proches des observations alors que les méthodes M1 et M3 respectivement sous-estime et surestime un peu l'emprise de la submersion sur Gujan Mestras.

Tableau 1. Tableau de reproduction des niveaux marins pour Xynthia.

Niveau max (m NGF)	Andernos	Arcachon	Ares	Audenge	Biganos	Gujan	Lanton	La Teste	LeTeich	Lège Nord	Lège Sud
Simulation Dynamique	3.72	3.52	3.67	3.72	3.7	3.66	3.72	3.56	3.7	3.63	3.5
Analogue (tempête 25)	3.7	3.48	3.66	3.66	3.63	3.6	3.69	3.51	3.63	3.64	3.49
Métamodèle niveau	3.79	3.56	3.73	3.8	3.78	3.72	3.8	3.59	3.78	3.68	3.54
Observation	/	3.58	/	/	/	/	/	/	/	/	/

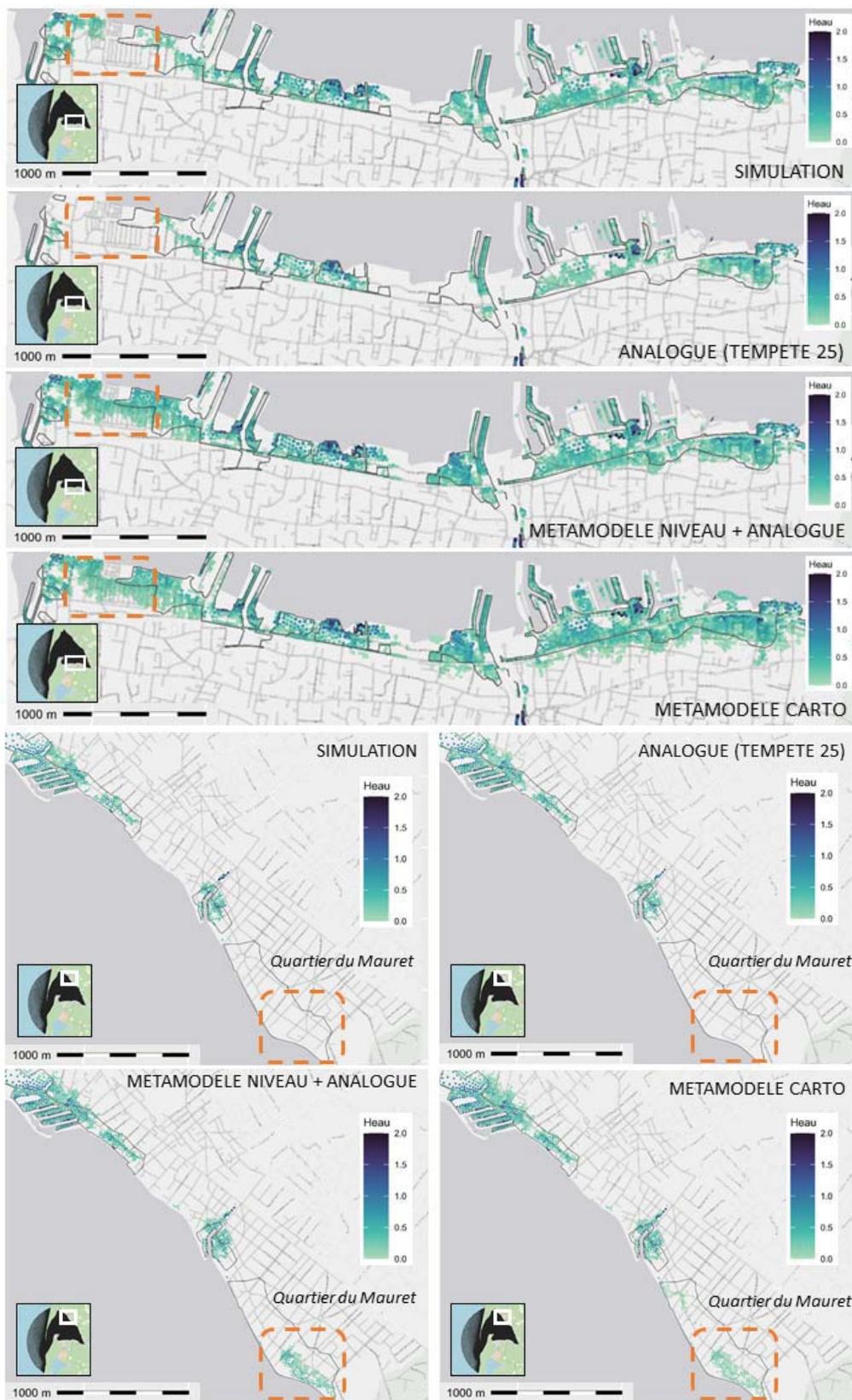


Figure 4. Cartes de submersion sur Gujan Mestras (haut) et Andernos (bas).

5. Discussion et conclusion

Les tests préliminaires réalisés sur la tempête Xynthia montrent que (1) les 3 approches proposées permettent d'estimer correctement les niveaux marins et les cartes de submersion sur le Bassin d'Arcachon à partir des conditions de tempête à l'houlographe du Cap-Ferret (2) les cartes de submersion sont cependant très sensibles à de faibles variations du niveau marin quand celui-ci est proche des valeurs seuil de débordement.

Si ces résultats doivent être consolidés sur d'autres tempêtes et sur l'ensemble des communes, ils offrent des perspectives encourageantes sur l'utilisation de métamodèles pour prédire des cartes de submersion. La méthode par métamodèles est d'autant plus justifiée qu'elle permet, grâce à ses temps de calcul négligeable (<minutes), de réaliser des prévisions d'ensemble afin de prendre en compte les incertitudes de prévision sur les forçages météo-marins (vagues, vent, surcote). En effet, les avancées récentes, en particulier en matière de calcul haute performance, ont facilité la migration des systèmes de prévision météorologiques vers un mode probabiliste (DESCAMPS *et al.*, 2015) mais leur utilisation, bien que de plus en plus répandue pour le risque d'inondation fluviale, reste encore marginale pour la submersion marine en raison des problématiques de temps de calcul. Dans cette optique, une analyse de sensibilité permettra de caractériser les incertitudes associées aux différentes étapes de la chaîne de traitement (prévision météo-marine, choix de modélisation, type de métamodèle, etc.) et de définir quelle approche répond le mieux aux besoins opérationnels des utilisateurs.

Au-delà des cartographies de ZIP, l'atlas de scénarios d'inondation sur le bassin d'Arcachon offre de nombreuses perspectives d'utilisation pour (1) améliorer la compréhension des processus de submersion, du rôle relatif des conditions de forçage et des effets de seuils (2) identifier des niveaux de gravité ou des typologies de submersion permettant de décliner des plans d'action pour la gestion de crise des événements d'intensité modérée à extrême (3) développer des modèles de prévision rapide. Quelle que soit l'application, l'utilisation sur le long terme de la base de données produite nécessitera des mises à jour pour prendre en compte les futurs aménagements côtiers et l'évolution de la topo-bathymétrie locale.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet de cartographie des ZIP submersion marine sur le Bassin d'Arcachon financée par la DDTM 33 ainsi que dans l'ANR ORACLES (ANR-21-CE04-0012-01).

5. Références bibliographiques

BREIMAN L. (2001). *Random Forests*. *Machine Learning*, 45, 5–32, <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

- BROCCHINI M. (2013). *A reasoned overview on Boussinesq-type models: the interplay between physics, mathematics and numerics*. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 469 (2160), <https://doi.org/10.1098/rspa.2013.0496>
- CAMUS P., MENDEZ F.J., MEDINA R., COFINO A.S. (2011). *Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate*. Coastal Engineering, 58(6), 453-462, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003>
- COLES S. (2001). *An introduction to statistical modeling of extreme values*, Vol. 208, 209 p., London: Springer, <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>.
- DESCAMPS L., LABADIE C., JOLY A., BAZILE E., ARBOGAST P., CEBRON P. (2015). *PEARP Météo-France short range ensemble prediction system*. Q.J.R. Met. Soc, (141), 1671-1685, <https://doi.org/10.1002/qj.2469>
- FILIPPINI A.G., de BRYE S., PERRIER V., MARCHE F., RICCHIUTO M., LANNES D., BONNETON P. (2018). *UHAINA : A parallel high performance unstructured near-shore wave model*. Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, May 2018, La Rochelle, France. pp.47-56, [10.5150/jngcgc.2018.006](https://doi.org/10.5150/jngcgc.2018.006)
- HEFFERMAN J.E., TAWN J.A. (2004). *A conditional approach for multivariate extreme values (with discussion)*, J. Roy. Stat. Soc. Ser. B, 66, 497–546. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2004.02050.x>
- IDIER D., AUROUET A., BACHOC F., BAILLS A., BETANCOURT J., GAMBOA F., KLEIN T., LOPEZ A.F., PEDREROS R., ROHMER J., THIBAUT A. (2021). *A user-oriented local coastal flooding early warning system using metamodelling techniques*, J. Mar. Sci. Eng., 9(11):1191, <https://doi.org/10.3390/jmse9111191>
- LECACHEUX S., ROHMER J., PARIS F., PEDREROS R., QUETELARD H., BONNARDOT F. (2021). *Toward the probabilistic forecasting of cyclone-induced marine flooding by overtopping at Reunion Island aided by a time-varying random-forest classification approach*. Natural Hazards, 105, 227-251, doi: [10.1007/s11069-020-04307-y](https://doi.org/10.1007/s11069-020-04307-y)
- LECACHEUX S., PEDREROS R., FILIPPINI A.G., ARPAIA L., ROHMER J., LOUISOR J., NICOLAE-LERMA A., QUIQUE R., PRAGOUT J. (2023). *Appui à la mission RDI de Gironde : Cartographie des ZIP « submersion marine » pour le Bassin d’Arcachon*. Rapport final. BRGM/RP-73272-FR, 56 p.
- LYARD F.H., ALLAIN D.J., CANCEY M., CARRERE L., PICOT N. (2021). *FES2014 global ocean tide atlas: Design and performance*, Ocean Science, vol.17 (3), pp. 615--649, <https://os.copernicus.org/articles/17/615/2021/>
- MUGICA J., BULTEAU T., PARIS F., PEDREROS R. (2014). *Caractérisation de l’aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du Bassin d’Arcachon, (Gironde)*. BRGM/RP-61408-FR.

Thème 6 – Risques côtiers

- PERRIN T.V.E., ROUSTANT O., ROHMER J., ALATA O., NAULIN J.P., IDIER D., PEDREROS R., MONCOULON D., TINARD P. (2020). *Functional principal component analysis for global sensitivity analysis of model with spatial output*. arXiv preprint arXiv:2005.10285, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.10285>
- RAOULT C., JOLY A., ANDREEVSKY M., LAUGEL A. (2018). *ANEMOC-3 : Amélioration de la base de données d'états de mer ANEMOC-2 par prise en compte des effets de la marée*. Acte de conférence des 16èmes Journées de l'Hydrodynamique.
- RASMUSSEN C.E., WILLIAMS C.K., (2006). *Gaussian processes for machine learning*, Cambridge, MA: MIT press, <https://doi.org/10.7551/mitpress/3206.001.0001>
- ROHMER J., LECACHEUX S., IDIER D., FILIPPINI A.G., PEDEROS R. (2023). Fast prediction of flood maps based on machine learning techniques: application to marine flooding at Arcachon Lagoon (Gironde, France). In Simhydro 2023.
- SAHA S., MOORTHY S., PAN H.-L., WU X., WANG J., *et al.* (2010). *The NCEP climate forecast system reanalysis*. Bulletin of American Meteorological Society, 91, 1015-1058, <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>
- SOMDECOSTE T., DANGLADE N., DELPEY M. (2019). *Projet POCTEFA MAREA*, Rapport de synthèse Rivages Pro Tech, Décembre 2019.
- TOLMAN (2014). User manual and system documentation of WAVEWATCH- III version 4.18.