



## Evaluation de l'exposition du littoral corse à la submersion marine

**Julie MUGICA**<sup>1</sup>, **Rodrigo PEDREROS**<sup>2</sup>, **Andrea Gilberto FILIPPINI**<sup>2</sup>,  
**Aurélié MASPATAUD**<sup>3</sup>, **Jessie LOUISOR**<sup>2</sup>, **Thibault LAIGRE**<sup>4</sup>,  
**Klervi HAMON KERIVEL**<sup>5</sup>

1. BRGM Corse, Immeuble Agostini, ZI de Furiani, 20600 Bastia, France.  
*j.mugica@brgm.fr*
2. BRGM Orléans, 3 Av. Claude Guillemin, 45100 Orléans, France.  
*r.pedreros@brgm.fr, a.filippini@brgm.fr; j.louisor@brgm.fr*
3. BRGM Nouvelle-Aquitaine, Parc technologique Europarc, 24 Av. Léonard de Vinci, 33600 Pessac, France. *a.maspataud@brgm.fr*
4. BRGM Guadeloupe, Parc d'activité de Colin, La Lézarde, 97170 Petit-Bourg, Guadeloupe, France. *t.laigre@brgm.fr*
5. Syndicat Mixte Baie de Somme – Grand Littoral Picard, 1 rue de l'Hôtel Dieux, 80 100 Abbeville, France. *klervihamonkerivel@baiedesomme.fr*

### Résumé :

En appui aux services de l'Etat, le BRGM a développé une stratégie adaptée à la diversité géomorphologique et météo-marine de l'île. A partir d'analyses statistiques de probabilité conjointes trivariées, les événements de référence centennaux prennent en compte l'effet combiné de la marée, de la surcote atmosphérique ainsi que de la surcote liée aux vagues. Une première approche dite « statique », au 1/10 000<sup>ème</sup> à l'échelle de la Corse fournit une cartographie des zones basses potentiellement inondables par débordement. Elle a été produite en superposant à la topographie, les niveaux marins calculés par le code SWAN, puis a été complétée par une expertise géomorphologique ainsi que par l'estimation des franchissements de paquets de mer avec le code SWASH.

Une seconde approche sur les secteurs d'Ajaccio et de Bastia, prend en compte la dynamique de submersion au 1/5 000<sup>ème</sup>. La modélisation repose sur le chainage de trois modèles (WW3, SWASH et UHAINA) qui représentent l'ensemble des processus dont la propagation des vagues, le calcul des débits franchissants et de la submersion marine. Conforme aux consignes ministérielles (guide du MEDDE de 2014), l'approche statique offre une vision globale de l'exposition à la submersion marine à l'échelle de l'île et est exploitée pour un porté à connaissance. En revanche, l'approche dynamique a vocation à être exploitée dans le cadre de PPRL et représente une base technique pour la gestion de crise en appui à la mission RRI des services de l'Etat.

**Mots-clés :** Submersion marine, Modélisation numérique, Approche globale, Franchissements de paquets de mer, Débordements.

## Thème 6 – Risques côtiers

### 1. Introduction

Afin de caractériser l'exposition du littoral Corse aux phénomènes de submersion marine en appui aux services de l'Etat, le BRGM a élaboré une stratégie de modélisation numérique déclinée à différentes échelles spatiales et prenant en compte les spécificités géomorphologiques et météo-marines locales. Une première approche dite « statique » sur tout le pourtour de la Corse a permis d'identifier l'emprise des zones basses potentiellement exposées à un événement météo-marin de période de retour centennale. Afin de limiter les incertitudes liées à cette approche sur les zones urbanisées et à enjeux particulièrement exposés, une seconde approche plus fine dite « dynamique » a été réalisée sur les secteurs du Golfe d'Ajaccio (façade ouest de la Corse) et du grand Bastia (Communauté d'Agglomération de Bastia et Communauté de Communes Marana Golo, façade est). En considérant la chronologie des événements, elle avait pour objectif de préciser la dynamique des écoulements à terre et de caractériser l'aléa submersion marine.

### 2. Stratégie méthodologique

#### 2.1 Détermination des événements de référence à partir de probabilités tri-variées

Conformément aux consignes ministérielles (MEDDE, mai 2014), il a été déterminé un événement de référence météo-marin centennal, aucun événement historique connu n'étant supérieur. La connaissance du terrain et les tempêtes passées amènent à considérer les vagues et les niveaux d'eau, mais également le vent comme un agent participant à la génération des niveaux marins extrêmes et des submersions marines sur le littoral Corse. A partir d'une approche statistique multivariée des extrêmes (HEFFERMAN & TAWN 2004, voir Figure 1), il a été calculé la probabilité que les trois conditions  $H_s$  (hauteur significative des vagues),  $SWL$  (niveau d'eau au repos au large incluant la marée et la surcote atmosphérique,) et  $U$  (vitesse du vent) dépassent conjointement une période de retour centennale.

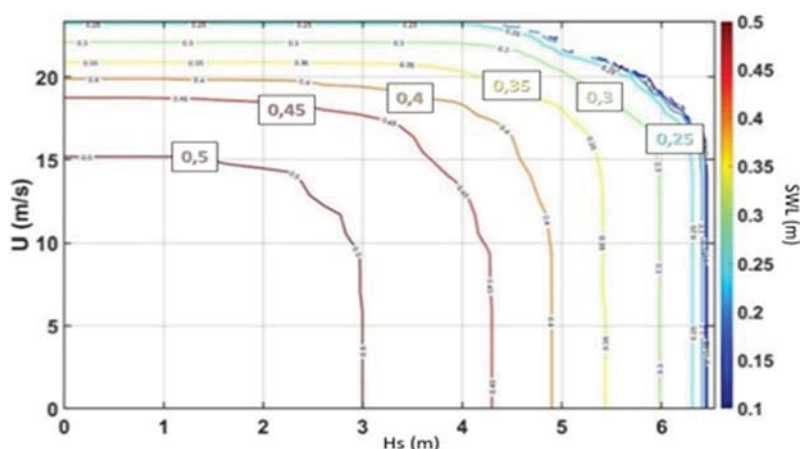


Figure 1. Représentation 2D de l'iso-contour d'iso-période de retour de dépassement conjoint centennale. Les valeurs sur les courbes sont les valeurs de niveau marin  $SWL$ .

Les co-variables  $T_p$  (période pic des vagues),  $D_p$  et  $D_u$  (directions pic des vagues et du vent) ont également été considérées. Les différentes étapes de cette approche sont décrites dans LOUISOR *et al.*, (2021). Plusieurs combinaisons centennales ( $H_s$ ,  $SWL$ ,  $T_p$ ,  $D_p$ ,  $U$ ,  $D_u$ ) représentatives ont été définies comme évènements de référence au large. Les bases de données exploitées sont les états de mer « NWW3-MED » générés par la NOAA sur 31 ans avec le modèle Wavewatch III © (1979 – 2009, <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/nopp-phase2.php>) ainsi que les niveaux d'eau au large « MARS-MED-BRGM » spécifiquement générés avec le modèle MARS\_2DH.

## 2.2 Approche statique pour l'estimation des zones basses à l'échelle de la Corse

Ces combinaisons ( $H_s$ ,  $SWL$ ,  $T_p$ ,  $D_p$ ,  $U$ ,  $D_u$ ) sont exploitées en conditions de forçage de la modélisation. Deux marges de sécurité sont rajoutées au niveau marin au large ( $SWL$ ) : 25 cm pour la prise en compte des incertitudes de la méthode puis pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique, 20 cm pour un évènement dit « actuel » et 60 cm pour un évènement « à l'horizon 2100 » (MEDDE, 2014).

La propagation des combinaisons centennales depuis le large et le calcul des niveaux marins maximaux résultants au rivage (voir Figure 2) ont été simulés à partir de 2 codes numériques opérationnels, libres d'accès et régulièrement utilisés pour ce type d'étude par la communauté scientifique : SWAN (Simulating WAVes Nearshore, BOOIJ *et al.*, 2004) calcule les paramètres décrivant les vagues ainsi que le wave-setup, ce qui permet un chaînage avec SWASH-2D (Simulating WAVes till Shore) qui calcule les niveaux d'eau et la surcote liée au vent.

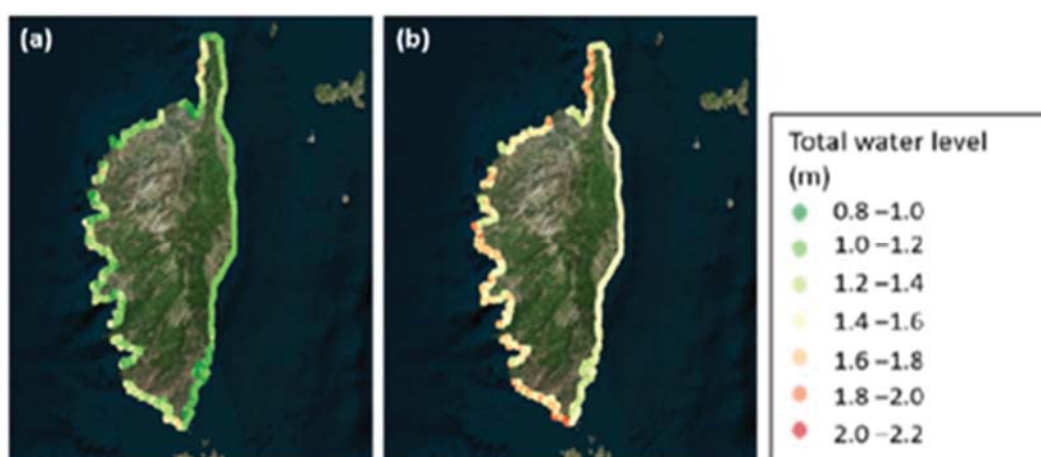


Figure 2. Niveaux marins maximaux au rivage pour un évènement (a) actuel, (b) « 2100 ».

Ces codes ont été employés de manière emboîtée sur 5 grilles de « rang 0 » (ou grilles mères) avec une résolution de 50 m et sur 26 grilles de « rang 1 » (ou grilles filles) avec

## Thème 6 – Risques côtiers

une résolution de 10 m (LOUISOR *et al.*, 2021). En complément, les niveaux d'eau maximaux instantanés atteints par les vagues (runup) ont été calculés avec SWASH en mode profil sur certains secteurs prioritaires afin d'évaluer la possibilité ou non de franchissements de paquets de mer.

La cartographie a ensuite été réalisée par superposition des niveaux de référence sur la topographie (RGE Alti® à 1 m de 2013, IGN). Elle a été ajustée par une expertise géomorphologique prenant en compte les particularités locales (cordon dunaire, infrastructures côtières, connexions hydrauliques, etc.) qui influent sur les entrées d'eau préférentielles et l'écoulement de l'eau. Elle est produite au 1/10 000 à l'échelle de la Corse (MUGICA *et al.*, 2020, 2021). En cas de franchissements de paquets de mer, il a été appliqué une bande de sécurité d'une largeur de 50 m (MEDDE, 2014) pour une altitude inférieure à 10 m/NGF.

### 2.3 Approche dynamique

Afin de propager les événements « actuel » et « 2100 » depuis le large jusqu'à terre et de simuler la dynamique de la submersion marine par débordement sur l'ensemble du domaine de calcul ainsi que localement par franchissement de paquets de mer, la stratégie de modélisation pour les secteurs du Golfe d'Ajaccio et du grand Bastia, repose sur un code numérique de nouvelle génération UHAINA (FILIPPINI *et al.*, 2018 et 2024), qui présente des avantages de performance et de résolution par rapport à d'autres codes disponibles. Il permet de calculer l'ensemble des processus de submersion marine tout en représentant efficacement les éléments topographiques (protections côtières, routes, cours d'eau, etc.). Son chaînage avec Wavewatch3 (WW3), également libre d'accès, permet l'emploi d'une unique grille de calcul, construite avec un maillage non-structuré à partir du RGE Alti® (IGN, 2013) et du Litto3D (SHOM, 2018) avec des mailles plus fines (10 à 20 m) sur les zones à enjeux et des mailles de résolution inférieure (plusieurs centaines de mètres) au large. L'occupation du sol (zones urbanisées, fond marin, béton, pelouse, rivière, etc.) est représentée de manière indirecte par l'expression du frottement sur le sol à partir des coefficients de Manning (BUNYA *et al.*, 2010).

Le seul scénario de prise en compte des infrastructures côtières est la ruine généralisée : arasement de murets rehaussant des ouvrages de fixation du trait de côte, connexions hydrauliques (buse, pont cadre, par ex.) fonctionnelles et ouvrages portuaires pérennes. Paramétré suivant la configuration d'ARDHUIN *et al.* (2010), WW3 permet de simuler la propagation des vagues depuis le large, sur plusieurs centaines de mètres de profondeur jusqu'au rivage (profondeurs > 0,2 m) (voir 1 sur la Figure 3) en tenant en compte notamment du frottement au fond et du déferlement qui est ici bien reproduit compte tenu des fortes pentes et des fortes hauteurs des vagues incidentes traitées pour le calcul du wave-setup (effectué dans UHAINA, voir 4 sur la Figure 3, FILIPPINI *et al.*, 2024).

Les combinaisons centennales sont appliquées de manière homogène aux frontières du modèle pour le niveau du plan d'eau (SWL) et les spectres directionnels de

vagues construits à partir des caractéristiques des vagues (hauteur significative, période, direction pic et étalement directionnel), et sur l'ensemble du domaine pour le vent ( $U$  et  $Du$ ) instationnaire. En sortie, WW3 fournit à UHAINA les données de vagues ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $D_p$ , tensions de radiation) toutes les 10 minutes.

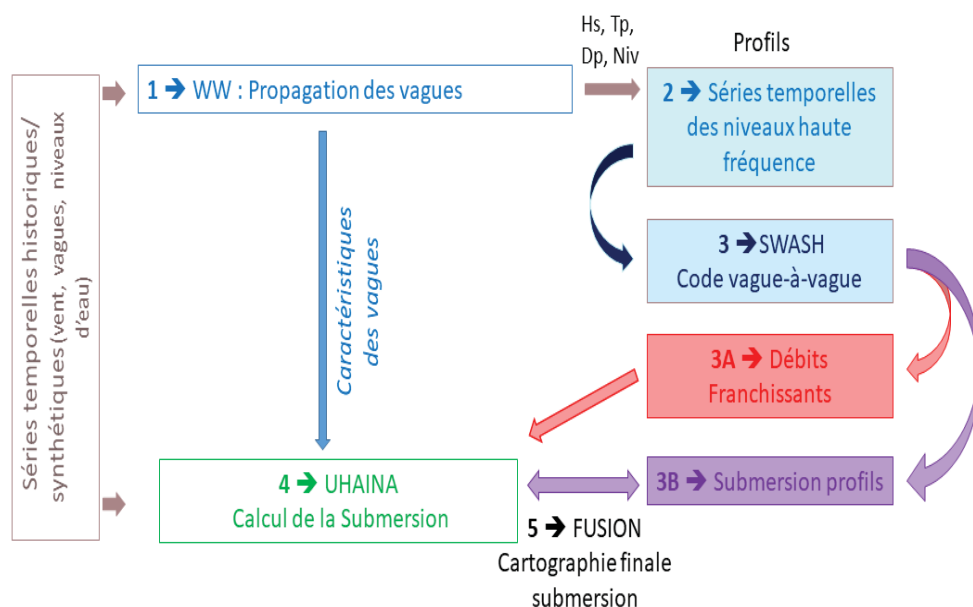


Figure 3. Principales étapes de la stratégie de calcul.

UHAINA simule ensuite la submersion marine (niveaux et courants) avec le calcul des niveaux d'eau (voir 4 sur la Figure 3) à partir des niveaux de marées et des séries temporelles de vent, vagues, niveaux d'eau des combinaisons centennales, ainsi que des caractéristiques de vagues calculées par WW3 appliquées sur l'ensemble du domaine et des débits franchissant sous l'effet des paquets de mer calculés par SWASH sur des profils perpendiculaires à la côte (voir 3A sur la Figure 3). Après analyse des conjonctions entre les phénomènes fluviaux et marins à dire d'expert et en concertation avec les services de l'Etat, sur la base de la connaissance historique (tempête Adrian, 29/10/2018), une période de retour biennale des débits a été retenue sur les trois principaux fleuves de la Gravone, du Prunelli et du Golo.

Ce code vague-à-vague SWASH (ZIJLEMA *et al.*, 2011) est également utilisé pour le calcul des caractéristiques de la submersion (voir 3B sur la Figure 3). Son utilisation se fait en chainage avec UHAINA/WW3. Il utilise en entrée les conditions de vagues spectrales et de niveaux d'eau issues des modélisations couplées niveau-courant-vague. Les profils ont une résolution spatiale de 1 m tenant compte de la topo-bathymétrie et du frottement au fond. La cartographie finale de l'aléa est produite à partir d'une matrice croisant les vitesses et hauteurs d'eau (MEDDE, 2014). Les résultats des profils SWASH sur les zones topographiquement élevées sont fusionnés manuellement à dire d'expert

## Thème 6 – Risques côtiers

avec la cartographie directement produite par UHAINA, pour un rendu au 1/5 000<sup>ème</sup> (voir 5, Figure 3).

### 3. Résultats et discussion

Les zones particulièrement exposées aux submersions marines mises en évidence par l'approche « statique » sont les zones basses avec des débordements et des entrées d'eau préférentielles au niveau des embouchures de la plupart des plages de poche de la façade ouest et des fleuves et étangs côtiers de la Plaine orientale. Les zones basses en arrière des cordons dunaires susceptibles d'être défaillants ont été considérées exposées. Les emprises exposées les plus étendues se trouvent sur les secteurs de Saint-Florent, de Porto-Vecchio, de l'Étang de Biguglia et du sud de la Plaine orientale entre Aléria et Solenzara, par exemple. En dehors de ces secteurs, les zones exposées sont limitées aux premiers mètres du front de mer, ce qui n'est pas systématiquement conforme aux observations historiques (médias, CATNAT, archives, MUGICA & LAIGRE, 2019, etc.). Cette approche sous-estime l'exposition de certains secteurs présentant une topographie plus élevée (côte rocheuse non abrupte, front de mer urbanisé, cordon dunaire par ex.) car le déferlement des vagues qui joue un rôle déterminant sur les submersions marines (*runup*, franchissements de paquets de mer) et les aléas associés (chocs mécaniques des vagues, projection) ainsi que la chronologie des événements (cycle de marée et durée de la tempête) qui permet de calculer les volumes débordant réellement, ne sont pas pris en compte (voir Figure 4). D'autre part, des incertitudes supplémentaires sont liées notamment à la non prise en compte de l'occupation du sol (rugosité) influençant la dynamique des écoulements à terre ainsi que d'éventuelles conjonctions avec des crues. Néanmoins, cette approche a permis d'identifier pour chaque secteur le type de combinaison vent, vagues et niveaux d'eau la plus défavorable, ce qui représente une connaissance indispensable pour la définition d'indicateurs dans le cadre de la gestion de crise : les secteurs abrités sont généralement exposés à des forts niveaux d'eau combinés aux petites hauteurs de vagues alors qu'à l'inverse, les secteurs ouverts sur la mer sont plus exposés aux fortes hauteurs de vagues combinées aux plus petits niveaux d'eau.

La connaissance historique a mis en évidence la prédominance des phénomènes de submersion marine sous l'action des vagues avec des franchissements de paquets de mer sur certains secteurs de fronts de mer urbanisés et/ou de configuration de côte rocheuse (non abrupte). L'approche « dynamique », validée grâce à ces données d'évènement historique (tempête Adrian, 29/10/2018 par ex.), a permis de préciser en termes d'emprise, de hauteur et de vitesse d'eau, les zones exposées aux franchissements de paquets de mer sur les secteurs du Golfe d'Ajaccio et du grand Bastia (voir Figure 4).

Dans plusieurs zones la bande de sécurité de 50 m liée aux franchissements sur la cartographie de l'approche « statique » (MEDDE, 2014) s'est révélée insuffisante. Que ce soit dans des configurations de côte rocheuse (Place Miot à Ajaccio par ex.) ou de cordon dunaire (site du Ricanto à Ajaccio par ex.), l'approche « statique » a

significativement sous-estimé l'exposition aux submersions marines comme le met en évidence l'approche « dynamique ». La majorité du linéaire du Golfe d'Ajaccio est exposée aux franchissements de paquets de mer. La prise en compte de ce type de submersion est donc impérative pour les fronts de mer relativement élevés. Ce constat de sous-estimation de l'exposition aux phénomènes de submersion marine par l'approche « statique » est également valable au niveau des zones basses autour des embouchures.

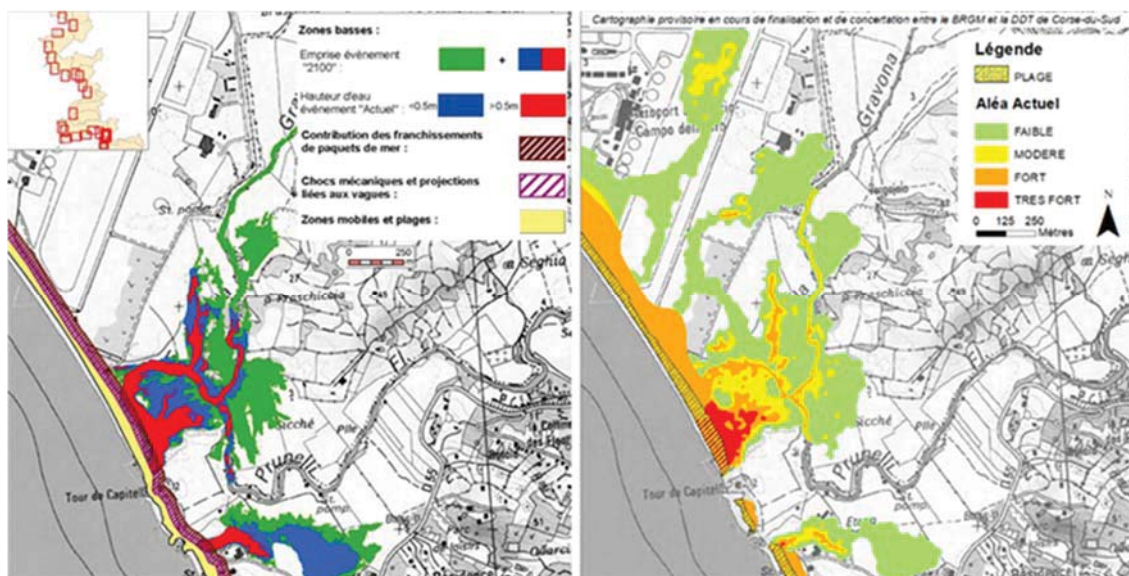


Figure 4. Cartographie des zones basses exposées aux submersions marines à gauche (aléa actuel en rouge et bleu, aléa 2100 en vert, franchissements et chocs mécaniques en hachurés) et de l'aléa submersion marine actuel à droite, sur le secteur d'Ajaccio.

#### 4. Conclusions

La stratégie de modélisation a permis de doter l'île d'une vision globale de son exposition aux phénomènes de submersion marine ainsi que d'une connaissance approfondie de l'aléa sur les secteurs à enjeux les plus exposés. L'approche « statique » réalisée à l'échelle 1/10 000<sup>ème</sup> sur tout le pourtour de l'île a été exploitée par les services de l'Etat pour un porté à connaissances. En accompagnement de cette cartographie sur laquelle des incertitudes ont été soulignées, des recommandations techniques ont été émises pour permettre à des tiers de compléter la connaissance de la dynamique des phénomènes indispensables en cas de projets d'aménagement compris dans les bandes de sécurité.

La réduction des incertitudes sur les secteurs du Golfe d'Ajaccio et du grand Bastia grâce au chaînage des 3 codes UHAINA/WW3/SWASH a permis de prendre en compte l'ensemble des phénomènes de submersion marine (débordement et franchissements de paquets de mer) et de caractérisation de l'aléa submersion marine en appui à l'élaboration par les services de l'Etat de Plans de Prévention des Risques Littoraux. Les résultats ont également vocation à être exploités dans le Plan d'Action de Prévention des Inondations

## Thème 6 – Risques côtiers

de la Communauté de Communes Marana Golo et représentent un socle de connaissance nécessaire pour la gestion de crise.

### 5. Références bibliographiques

- ARDHUIN F., ROGERS E., BABANIN A., *et al.* (2010). - *Semi-empirical dissipation source functions for wind-wave models: part I, definition, calibration and validation*. J. Phys. Oceanogr., 40(9):1917–1941. doi.org/10.1175/2010JPO4324.1
- BUNYA S., DIETRICH J.C., WESTERINK J.J., EBERSOLE B.A., SMITH J.M., *et al.*, (2010). *A high-resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave and storm model for Southern Louisiana and Mississippi: Part I – Model development and validation*. Monthly Weather Review, Volume 138, 345 – 377. doi.org/10.1175/2009MWR2906.1
- 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*, XV<sup>ème</sup> Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, doi:10.5150/jngcgc.2018.006
- FILIPPINI A.G., ARPAIA L., PERRIER V., PEDREROS R., BONNETON P., *et al.*, (2024). *An operational discontinuous Galerkin shallow water model for coastal flood assessment*. Ocean Modelling, (under review), <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4808242>
- HEFFERNAN, J.E., TAWN J.A. (2004). *A conditional approach for multivariate extreme values (with discussion)*. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology), 497-546. doi.org/10.1111/j.1467-9868.2004.02050.x
- LOUISOR J., ROHMER J., BULTEAU T., BOULAYA F., PEDREROS R., MASPATAUD A., MUGICA J. (2021). *Deriving the 100-Year total water level around the Coast of Corsica by combining trivariate extreme value analysis and coastal hydrodynamic models*. J. Mar. Sci. Eng., 9, 1347. doi.org/10.3390/jmse9121347
- MEDDE (2014). *Guide Méthodologique, Plan de Prévention des Risques Littoraux*. Version de mai 2014, 169p.
- MUGICA J., LAIGRE T. (2019). *Rapport d'observation post-tempête sur le littoral Corse. Évènement Adrian – 29 octobre 2018*. Rapport final. BRGM/RP-69445-FR, 76 p., 55 ill., 2 ann.
- MUGICA J., LOUISOR J., MASPATAUD A., PEDREROS R., KOECHLER F. (2020). *Caractérisation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines en Corse-du-Sud. Communes d'Osani à Bonifacio et communes de Conca et Sari-Solenzara. Rapport final*. BRGM/RP-69376-FR, 200 p., 91 fig., 4 tabl., 6 ann., 1 CD.
- MUGICA J., LOUISOR J., MASPATAUD A., PEDREROS R., KOECHLER F. (2021). *Caractérisation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines en Haute-Corse. Rapport final*. BRGM/RP-69915-FR, 248 p.
- ZIJLEMA M., STELLING G., SMIT P. (2011). *SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters*. Coast. Engng., 58, 992-1012. doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.015