



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Caractérisation de la dynamique de la submersion dans le Golfe d'Ajaccio

Rapport final

BRGM/RP-72405-FR

Version 1 du 4 mai 2026

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

BRGM,

Ce rapport a été vérifié le 21/04/2026 et approuvé le 06/05/2026 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu contractuellement.

Le demandeur assure lui-même la diffusion qu'il souhaite des exemplaires de ce tirage initial, dont il est seul propriétaire.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur, ainsi que par les termes de la convention.

Les justificatifs du contrôle qualité de ce rapport (auteur, vérificateur, approbateur) peuvent être communiqués à titre confidentiel au destinataire du rapport, à sa demande et dans le strict respect de la réglementation applicable au traitement des données à caractères personnels.

Le BRGM ne saurait être tenu responsable de la divulgation du contenu total ou partiel de ce rapport à un tiers non-autorisé qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse [Questionnaire d'évaluation de satisfaction BRGM \(2026\) – Remplir le formulaire](#) ou par ce code :



Mots clés : Submersion marine, modélisation numérique, évènement centennal, Golfe d'Ajaccio

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

BRGM, 2026. Caractérisation de la dynamique de la submersion dans le Golfe d'Ajaccio. Rapport final V1. BRGM/RP-72405-FR

© BRGM, 2026, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
M-P2-12 – 27/01/2026

Synthèse

En raison de sa diversité géomorphologique (côte rocheuse, cordon sableux, zone lagunaire, zone portuaire, etc.), le littoral de Corse est exposé aux aléas côtiers dont la submersion marine, à des niveaux d'intensité variables. Les connaissances historiques des tempêtes majeures permettent d'illustrer les types de phénomènes auxquels est exposé le littoral de Corse. Ainsi, les observations de la tempête Adrian (29/10/2018) par exemple, ont témoigné de la forte exposition du front de mer d'Ajaccio aux franchissements de paquets de mer. La cartographie des Zones Basses Potentiellement Exposées aux Submersions Marines (ZBPESM, Rapport BRGM/RP-69376-FR, 2020) a permis d'identifier les zones exposées aux débordements, en particulier autour l'embouchure de la Gravone et du Prunelli qui représente une vaste zone humide. Cependant, basée sur une approche dite « statique » (projection des niveaux d'eau sur la topographie) ne prenant pas en compte ni la dynamique des écoulements, ni la chronologie des phénomènes, cette cartographie a été considérée insuffisante pour représenter les submersions marines combinant débordements et franchissements de paquets de mer telles qu'historiquement observées. C'est pourquoi, une méthode innovante de modélisation numérique permettant de reproduire les niveaux d'eau et la propagation des vagues du large à la côte, a été mise en œuvre à la demande de la DDT de Corse-du-Sud.

Cette méthode repose sur l'utilisation couplée des modèles UHAINA (Filippini et al., 2024) et WAVEWATCH3 (Tolman, 2009), ainsi que l'utilisation complémentaire du modèle SWASH (Zijlema et al. 2011) de propagation des vagues permettant de caractériser les franchissements par paquets de mer. De plus, l'utilisation d'un maillage non structuré pour représenter la configuration topo-bathymétrique a permis d'affiner la résolution de la modélisation dans les zones de déferlements des vagues et les zones à enjeux. Une étape importante de la méthode concerne la vérification (et la correction le cas échéant) de l'intégration des contraintes topo-bathymétriques dans la grille des modèles (fossés, route, connexions hydrauliques, etc.) qui s'appuie sur les données Litto3D du SHOM (2018) et du RGE ALTI® 1 m Corse V1 (IGN).

Conformément aux consignes ministérielles du guide du MEDDE (2014) :

- les simulations ont été réalisées pour les événements naturels dits « actuel » et « 2100 », de période de retour centennale calculés dans l'étude antérieure (ZBPESM). L'évènement « actuel » intègre une marge de 20 cm liée à l'élévation du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique. Cette marge est de 60 cm pour l'évènement « 2100 » ;
- seuls les ouvrages portuaires d'Ajaccio ont été considérés pérennes. Comme défini en concertation avec la DDT de Corse-du-Sud, aucun scénario de brèche ou défaillance d'ouvrage n'a été réalisé car aucun ouvrage de protection contre les submersions marines présentait les conditions nécessaires pour une prise en compte (classement code de l'environnement, étude de danger, etc.) sur la zone d'étude ;
- les aléas chocs mécaniques des vagues et projection qui sont des aléas distincts mais associés à l'aléa submersion marine par franchissement de paquets de mer sont également pris en compte de manière forfaitaire par l'ajout d'une bande de sécurité de 25 m maximum. Elle est réduite lorsque l'altitude dépasse 8 m/NGF. Cette bande de sécurité est associée à un aléa fort.

Cette étude a permis de caractériser l'importance des emprises concernées par les phénomènes de submersion marine qui peuvent s'étendre assez loin à l'intérieur des terres notamment à proximité de l'aéroport d'Ajaccio et au niveau des embouchures des cours d'eau (communes de Pietrosella et d'Albitreccia) sous l'effet combinés des débordements, des franchissements de paquets de mer et des débits fluviaux (Q5). Cependant, la topographie abrupte des rives nord-ouest et sud-est du golfe d'Ajaccio implique une emprise de submersion marine relativement limitée sur ces secteurs par rapport à d'autre secteur tel que le sud de Bastia par exemple (pourtour de l'Étang de Biguglia) et sans écart majeur entre l'aléa « actuel » et l'aléa « 2100 ». Les niveaux d'aléa sont forts à très forts sur les premiers mètres (voire dizaine de mètres) des rives nord-ouest et sud-est du golfe en lien avec des vitesses d'écoulements élevées (> 0.5 m/s) associées aux franchissements de paquets de mer.

Les résultats de cette étude ont vocation à être intégrés à un Plan de Prévention des Risques Littoraux. L'atlas cartographique a été produit à une échelle 1/5 000^{ème}.

Sommaire

1. Objectifs et cadre de l'étude	11
1.1. Contexte.....	11
1.2. Cadre réglementaire.....	12
1.3. Rappels théoriques sur les phénomènes de submersion marine.....	13
1.3.1. <i>Surélévation temporaire du niveau de la mer (surcote)</i>	13
1.3.2. <i>Chronologie d'un épisode</i>	14
2. Fonctionnement du littoral et principe de la méthode.....	17
2.1. Cadre géographique.....	17
2.2. Contexte géologique et morphosédimentaire	17
2.3. Contexte météo-marin.....	19
2.3.1. <i>Régime climatique global</i>	19
2.3.2. <i>Caractéristiques générales des tempêtes</i>	21
2.3.3. <i>Contexte océanographique</i>	22
2.3.4. <i>Connaissances historiques</i>	23
2.3.5. <i>Conclusion sur les phénomènes naturels et principe de la méthode</i>	26
3. Données topo-bathymétriques.....	27
3.1. Bathymétrie.....	27
3.1.1. <i>Dalles bathymétriques du Shom</i>	27
3.1.2. <i>Produit MNT Bathymétrique de façade de la Corse à 100 m (Shom, 2015)</i>	28
3.2. Topographie	29
3.3. Produit lidar topo-bathymétrique	29
4. Données météo-marines	31
4.1. Niveaux d'eau swl	32
4.2. Vagues.....	32
4.3. Vent	33
5. Evènements de références.....	35
5.1. Rappel de la méthode de calcul des probabilités conjointes.....	35
5.2. Retour d'expérience approche statique	37
5.3. Prise en compte de l'élevation du niveau de la mer.....	38
5.4. Prise en compte des débits fluviaux	38
5.5. Cordon littoral et scénario de ruine généralisée.....	39
6. Stratégie de modélisation	41
6.1. Principe de la modélisation.....	41
6.2. Modèle Uhaina	42
6.3. Modèle Wavewatch 3 (WW3).....	43
6.4. Modèle SWASH	44
6.5. Définition de l'emprise de calcul	44
6.6. Prise en compte des structures locales	45
6.6.1. <i>Identification des éléments structurants de type cours d'eau et routes</i>	45
6.6.2. <i>Ouvrages littoraux et autres éléments identifiés</i>	46
6.6.3. <i>Lignes de contraintes</i>	48
6.6.4. <i>Connexions hydrauliques</i>	49
6.7. Prise en compte de l'occupation du sol et des frottements associés	50
6.8. Maillage.....	52
6.9. Positionnement des profils	53
7. Résultats des simulations.....	57

7.1.	Simulation historique.....	57
7.2.	Simulation des événements de référence	59
7.2.1.	<i>Sélection des scénarios les plus impactant par secteur</i>	59
7.2.2.	<i>Exemples de résultats de simulation</i>	60
8.	Restitution cartographique	65
8.1.	Qualification de l’alea.....	65
8.2.	Methode de fusion des resultats d’Uhaina et de SWASH.....	66
8.3.	Post-traitement geomatique	66
8.4.	Pluvalue par rapport à l’approche « statique »	67
8.4.1.	<i>Amélioration des sous-estimations</i>	67
8.4.2.	<i>Amélioration des sur-estimations</i>	69
8.5.	Bande de securité liée aux Chocs mecaniques et projections.....	69
8.6.	Exemples de resultats.....	71
8.7.	Production du SIG et de l’Atlas numérique.....	73
9.	Conclusions	75
10.	Bibliographie	77

Liste des figures

Figure 1 :	Localisation de l’emprise de la zone d’étude (©Plan IGN).....	12
Figure 2 :	Schéma des différentes contributions induites par le passage d’une tempête sur le plan d’eau depuis le large jusqu’au rivage.	13
Figure 3 :	Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer, débordement, dégradation des ouvrages, ©BRGM).	15
Figure 4 :	Carte géologique simplifiée de la Corse (source : Carte géologique de la France 1/500 000, éditions BRGM), cadre noir : zone d’étude.....	17
Figure 5 :	Golfes d’Ajaccio, plage du Ricanto (à gauche) et plage de Mare e Sole (à droite), ©Geoportail.....	18
Figure 6 :	Exemple de plages de poche urbaine, plage du Trottet, commune d’Ajaccio.	19
Figure 7 :	Carte de répartition des vents dominants en Corse.....	20
Figure 8 :	Roses des vents calculées : au large d’Ajaccio entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).....	21
Figure 9 :	Roses des vagues calculées : au large d’Ajaccio entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).....	22
Figure 10 :	Paramètres de la houle au large d’Ajaccio entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).....	23
Figure 11 :	Illustration des franchissements de paquets de mer et projections liées aux vagues, Quai des Torpilleurs à gauche et route des Sanguinaires à droite (Ajaccio, Source Facebook).	24
Figure 12 :	Illustration des projections de débris associés aux franchissements de paquets de mer, quai des Torpilleurs à Ajaccio (Photos DDTM2A, 30/10/2018).	24

Figure 13 : Pression atmosphérique le 29/10/2018 à 12h UTC (Source : www.wetterzentrale.de).	25
Figure 14 : Paramètres météorologiques et météo-marins mesurés du 23/10/2018 au 05/11/2018 sur la façade ouest : Hauteur significative de la houle et direction pic des vagues (source : Houlographe de la Revellata, CANDHIS), vitesse du vent et pression atmosphériques (source : Synop MétéoFrance, station d’Ajaccio) et niveau d’eau (source : Marégraphe du SHOM à Ajaccio).	25
Figure 15 : Exemple de semis de sondes extraits des dalles bathymétriques du Shom aux abords du golfe d’Ajaccio.	27
Figure 16 : Produit MNT Bathymétrique de façade de la Corse à 100 m (Shom, 2015). Ici dans le système géodésique légal français RGF93, avec pour système de coordonnées projetées le Lambert-93.	28
Figure 17 : Extrait du produit RGE ALTI® 1 m Corse (IGN).	29
Figure 18 : Extrait du produit Lidar « partie maritime » CORSE–2017-2018 sur le secteur du Golfe d’Ajaccio (Shom - Collectivité de Corse - Dreal Corse, 2020) (Source : Shom).	30
Figure 19 : Localisation des points d’extraction des données de vagues et vents NWW3 MED (en rouge) et de niveaux d’eau MARS (en orange). Les extractions utilisées pour les Golfes d’Ajaccio et de Valinco/Propriano sont encadrées en blanc.	31
Figure 20 : Séries temporelles des conditions météo-marines utilisées pour les analyses au couple NWW3 465/ CORSE 26, et issues de l’étude BRGM/RP-69376-FR.	32
Figure 21 : Rose des vagues au point NWW3 465.	33
Figure 22 : Rose des vents au point NWW3 465.	33
Figure 23 : Extrait de la carte des Zones Basses Potentiellement Exposées aux Submersions Marines à Ajaccio (à gauche, rapport RP-69376-FR, 2020) et illustration de la submersion marine par franchissement de paquets de mer à Ajaccio lors de la tempête Adrian (29/10/2018, image de droite).	37
Figure 24 : Recommandations pour la prise en compte de l’élévation du niveau de la mer en lien avec le changement climatique (MEDDE, mai 2014).	38
Figure 25 : Débits fluviaux en amont de la confluence : A) pour La Gravona ; B) Le Prunelli. Et en aval de la confluence : C). Les flèches indiquent le sens amont vers l’aval, la confluence est indiquée par le cercle en blanc.	39
Figure 26 : MNT de l’estuaire de La Gravona – A) scénario de ruine généralisée par arasement total de la flèche sableuse ; B) scénario d’une brèche de 100m ; C) profil (trait rouge) du MNT avant (courbe noire) et après arasement (courbe rouge). Sens du profil : de la mer vers l’estuaire.	40
Figure 27 : MNT de l’embouchure de l’étang de Casavone – A) MNT sans connexion entre la mer et l’étang ; B) connexion entre l’étang et la mer par arasement du cordon sableux.	40
Figure 28 : Schéma de la stratégie de modélisation	41
Figure 29 : Emprise spatiale de la grille de calcul utilisée. En bleu : la frontière ouverte marine. En rouge : la frontière terrestre. A droite, deux focus sur les rivières Gravona et Prunelli mettent en évidence la frontière (en bleu claire) sur laquelle le débit des rivières est imposé.	45
Figure 30: Eléments linéaires structurants identifiés sur la BD Topo. Zoom sur Ajaccio.	46
Figure 31 : Ouvrages sélectionnés dans la base ouvrages du Cerema. Zoom sur Ajaccio.	47

Figure 32 : Localisation des éléments topographiques arasé pour le scénario de ruine généralisée. A gauche : muret arasé du front de mer (flèche bleu), à droite : tronçon de digue de l’aéroport (flèche noire), commune d’Ajaccio.....	47
Figure 33 : Panel de certains ouvrages ou défenses présents autour du Golfe d’Ajaccio.....	48
Figure 34 : Utilisation des lignes de contrainte : (a) secteur d’Ajaccio Est (Ricanto) ; (b) secteur du front de mer d’Ajaccio. MNT en arrière-plan.....	48
Figure 35 : Exemples de connections hydrauliques.....	49
Figure 36 : Représentation des connections hydrauliques implantées dans le modèle dans la zone de Ricanto.....	50
Figure 37 : A gauche - Données d’occupation du sol OCS-GE v1.1. ; A droite - regroupements et corrections manuelles.....	51
<i>Figure 38 : Maillage de calcul avec zoom sur les secteurs du centre-ville d’Ajaccio et de l’aéroport.</i>	53
Figure 39 : <i>Profils définis dans la baie d’Ajaccio. Les profils en jaune sont ceux dont les données</i>	55
Figure 40 : <i>Illustration des 2 types de profils : à gauche - calcul de la submersion directement avec SWASH ; à droite - segmentation du linéaire côtier, calcul des débits franchissant par SWASH pour une injection dans UHAINA.</i>	56
Figure 41 : Série temporelle des forçages météo-marins utilisés pour simuler la submersion générée par la tempête ADRIAN (L’axe des ordonnées à gauche permet de lire les variables hs, tp et XE en haut et U10 en bas, l’axe à droite représente les directions de la houle dp en haut et du vent en bas).....	58
Figure 42 : Simulation des hauteurs significatives maximales des vagues et de leur direction de propagation (A) et des submersions par franchissement lors de la tempête Adrian sur la route des Sanguinaires (B) et sur le Quai des Torpilleurs à Ajaccio (C).	59
Figure 43 : Exemple de série temporelle des forçages météo-marin centennaux obtenus pour le scénario 8.....	60
Figure 44 : Zoom sur le secteur de l’aéroport d’Ajaccio et des plages adjacentes. Résultats issus de la combinaison des scénarios 8 et 17 évènements pour « l’actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Niveau maximal du plan d’eau (SSH_max m/NGF, en haut), Hauteur d’eau maximale (h_max, au milieu) et Vitesse d’écoulement maximale (U max, en bas).....	61
Figure 45 : Zoom sur le secteur de l’aéroport d’Ajaccio et des plages adjacentes pour le scénario 17 évènements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Vitesse de montée des eaux (V_m).....	62
Figure 46 : Cartes d’aléa issue de la combinaison des scénarios 8 et 14 pour les évènements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite), zoom sur le secteur de l’aéroport d’Ajaccio et des plages adjacentes.....	63
Figure 47 : Possibilité de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d’eau et de la vitesse d’écoulement (MEDD, 2004).....	65
Figure 48 : Exemple de résultats (à droite) après fusion des sorties du modèle UHAINA (à gauche) et des profils du modèle SWASH (au centre), secteur de l’aéroport d’Ajaccio.	66
Figure 49 : Exemple (pointillés bleus) de petits polygones fusionnés avec les polygones adjacents, avant lissage à gauche, après lissage à droite.....	67

Figure 50 : Comparaison entre l’aléa 2100 calculé dans la présente étude (en couleur) et l’emprise des ZBPESM cartographiée dans l’approche « statique » (en noir) sur la plage d’Agosta (commune d’Albitreccia). 68

Figure 51 : Comparaison entre l’aléa « 2100 » caractérisé par l’approche « dynamique » et la bande de sécurité liée aux franchissements appliquée par l’approche « statique ». 68

Figure 52 : Exemple de surestimation de l’emprise de la submersion marine pour l’évènement 2100 avec en noir, la limite de l’emprise des ZBPESM de l’approche « statique » et en couleur l’emprise de l’aléa 2100, sur la commune de Grosseto-Prugna (plage de Porticcio). 69

Figure 53 : Exemple de bande de sécurité appliquée à partir du trait de côte Histolitt dont la largeur forfaitaire de 25 m est limitée lorsque l’altitude du terrain naturel dépasse 8 m/NGF. 70

Figure 54 : Exemple du secteur de la route des Sanguinaires (parking du cimetière et station d’épuration) pour l’évènement 2100 où les franchissements de paquets de mer (flèches rouges) sont dominants. 71

Figure 55 : Exemple de submersion marine pour l’évènement 2100, sur le secteur de l’aéroport d’Ajaccio, combinant les franchissements de paquets de mer (flèches rouges), les entrées d’eau par l’embouchure (flèches bleues) et l’influence des débits fluviaux (flèches vertes). 72

Figure 56 : Exemple de différence d’emprise de la submersion marine entre l’aléa « actuel » et l’aléa « 2100 » sur le front de mer d’Ajaccio (Bd Charles Bonaparte et Bd Georges Pompidou). 73

Figure 57 : Extension finale de la grille MNT produite sur le secteur du Golfe d’Ajaccio. 82

Figure 58 : Localisation des sources de données topo-bathymétriques exploitées sur l’emprise de la grille MNT à 1 m. 83

Figure 59 : Ajustements opérés sur le secteur de l’embouchure de la Gravona/Le Prunelli : A) morphologie existante dans le produit Litto3D "partie maritime" livré par le Shom ; B) morphologie d’embouchure, partiellement ouverte post-ajustements. 87

Figure 60 : MNT topo-bathymétriques à 1 m de résolution sur le secteur du Golfe d’Ajaccio. 88

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs des paramètres de vagues (Hs et Tp), de vent (U) et de niveau d’eau (SWL en m/NM) au large des golfes d’Ajaccio et de Valinco/Propriano (point NWW3 465 / CORSE 26). 36

Tableau 2 : Correspondance entre les typologies d’occupation du sol et les coefficients de Manning. 52

Tableau 3 : Paramètres météo-marins des scénarios centennaux présélectionnés. En bleu : 3 scénarios favorisant les franchissements par paquets de mer (Hs les plus forts) ; en marron : 2 scénarios favorisant le débordement (surcote la plus importante). 59

Tableau 4 : Types de dynamique en fonction des d’écoulement et des vitesses de montée des eaux d’après le guide PPRi (2024). 62

Tableau 5 : Qualification de l’aléa de submersion marine en fonction des classes de hauteur d’eau (H) et des courants à terre (V). 65

Liste des annexes

Annexe 1 Construction des modèles numériques de terrain (MNT). 81

Annexe 2 Probabilités conjointes de Hs, SWL et U au couple NWW3 465/CORSE 26 89

Annexe 3 Evolution de l'estuaire de La Gravona 93

1. Objectis et cadre de l'étude

1.1. CONTEXTE

Avec 1000 kms de linéaire, le littoral de Corse présente une grande variabilité géomorphologique associée à une exposition aux tempêtes plus ou moins forte. En 2020 et 2021, l'atlas des Zones Potentiellement Exposées aux Submersions Marine a été produit par le BRGM à l'échelle de la Corse (ZBPESM, RP-68934-FR, RP-69376-FR, RP-69915-FR) et a mis en évidence des secteurs prioritaires sur lesquels une étude de détail était recommandée. En effet, l'atlas repose sur une approche dite "statique" qui correspond à la cartographie des zones basses identifiées pour un événement naturel marin centennal. C'est-à-dire que le niveau marin résultant de la marée, de la surcote atmosphérique et de la surcote liée aux vagues (wave setup) a été calculé tout autour de la Corse puis superposé à la topographie. Cette approche ne prend pas en compte la dynamique de l'évènement (chronologie, débit, etc.) et des écoulements à terre (vitesse, entrées d'eau, exutoires) ainsi que les franchissements par paquets de mer.

Sur le littoral de la façade Ouest de la Corse dans le Golfe d'Ajaccio, comme en témoignent également les observations historiques (médias, CATNAT, archives, etc.), les vagues sont susceptibles de jouer un rôle déterminant dans les phénomènes de submersion marine (*runup*, franchissements de paquets de mer) et autres aléas associées (chocs mécaniques des vagues, projection).

Compte tenu de l'urbanisation importante du secteur, la Direction Département des Territoires de la Corse-du-Sud (DDT2A) a souhaité qu'une caractérisation de la submersion marine par une approche « dynamique » soit réalisée sur la Communauté d'Agglomération du Pays Ajaccien (CAPA¹) ainsi que sur les communes littorales de la Communauté de Commune de la Pieve de l'Ornano et du Taravo (CCPOT², cf. Figure 1).

Cette approche "dynamique" a pour objectif de prendre en compte la combinaison des différents agents météo-marins (vent, vagues et niveau d'eau), de la géomorphologie locale ainsi que de l'urbanisation afin de caractériser la dynamique des phénomènes de submersion marine par débordements et par franchissements de paquets de mer pour un événement météo-marin centennal.

=> Cette étude n'étant pas réalisée dans le cadre d'un PPRL, elle pourra néanmoins être exploitée à cette fin sous réserve d'une concertation au sein d'un groupe de travail (DDT2A, BRGM, communes par ex.) afin de définir certains choix techniques et notamment la réalisation de scénarios supplémentaires de prises en compte des structures de protection côtières.

¹ CAPA : communes d'Ajaccio

² CCPOT : communes de Bastelicaccia, Grosseto-Prugna, Albitreccia, Pietrosella, Coti-Chiavari

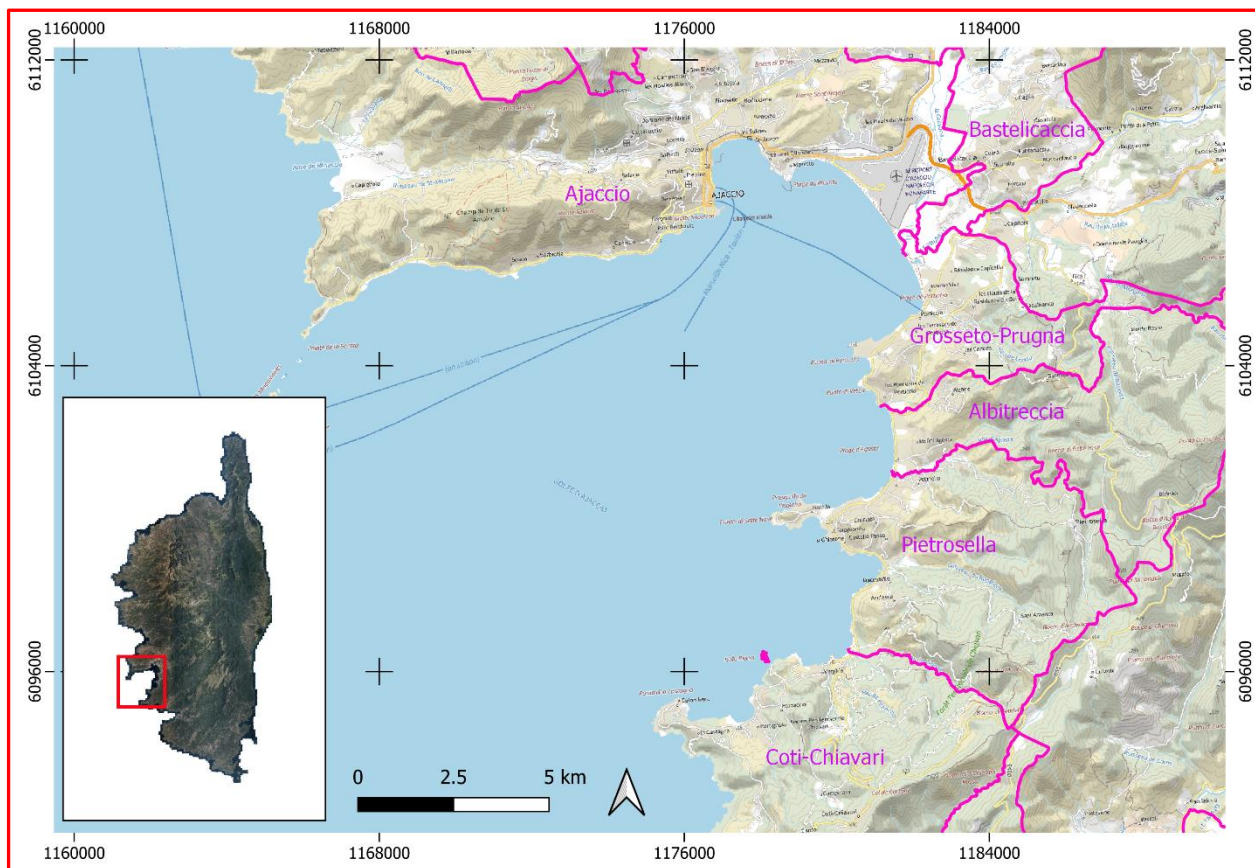


Figure 1 : Localisation de l'emprise de la zone d'étude (©Plan IGN).

1.2. CADRE REGLEMENTAIRE

La méthodologie mise en œuvre dans le cadre de cette étude s'appuie sur les documents de référence du Ministère de la Transition Ecologique :

- la circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte de la submersion marine dans les plans de prévention des risques littoraux (https://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/documents/Bulletinofficiel-0025182/met_20110015_0100_0021.pdf) ;
- le guide méthodologique relatif aux plans de prévention des risques littoraux, version de mai 2014 (MEDDE, 2014) ;
- le décret n°2019-715 du 5 juillet 2019 relatif aux Plans de Prévention des Risques concernant les aléas débordement des cours d'eau et submersion marine (décret n°2019-715) ;
- le guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation par débordement de cours d'eau (hors cours d'eau torrentiels) (2024, DGPR, MTECPR) pour le calcul des vitesses de montée des eaux.

1.3. RAPPELS THEORIQUES SUR LES PHENOMENES DE SUBMERSION MARINE

La submersion marine est un phénomène naturel, principalement lié aux conditions de marée, d'états de mer (houles et vagues), de vent et de pression atmosphérique, et se définit comme l'inondation temporaire ou définitive de la zone côtière par la mer (MEDDE, 2014).

D'après le guide méthodologique relatif aux plans de prévention des risques littoraux (MEDDE, 2014), « les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables (basses pressions atmosphériques et fort vent d'afflux agissant, pour les mers à marée, lors d'une pleine mer) ; elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours ». Elles sont le plus souvent associées à des surélévations temporaires du niveau de la mer (surcote) lors de tempêtes ou de cyclones, contrôlées par des phénomènes météorologiques (section a) ou induites par le déferlement des vagues (section b).

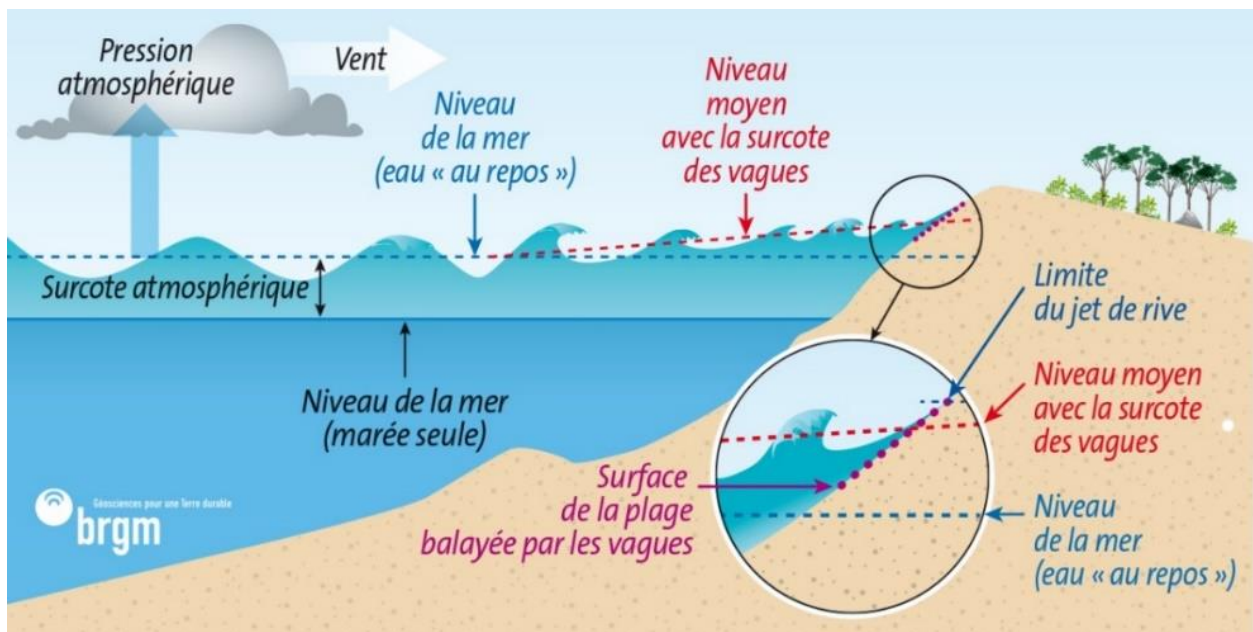


Figure 2 : Schéma des différentes contributions induites par le passage d'une tempête sur le plan d'eau depuis le large jusqu'au rivage.

1.3.1. Surélévation temporaire du niveau de la mer (surcote)

a) La surcote météorologique

Le passage d'un événement tempétueux dépressionnaire entraîne des perturbations atmosphériques faisant varier le niveau marin selon deux principaux mécanismes (Figure 2) :

- la chute de la pression atmosphérique contribue directement à la surélévation du plan d'eau. La surcote associée est particulièrement importante au centre d'un épisode cyclonique. Une diminution de 10 hPa dans l'atmosphère entraîne localement une élévation du niveau marin sur environ 10 cm ;
- le vent, en fonction de son intensité et de sa direction, peut générer des courants poussant les masses d'eau vers certains secteurs. Dans les zones de faibles profondeurs, les contre-courants ne peuvent pas s'installer et l'eau s'accumule à la côte induisant alors localement une surcote supplémentaire.

b) La surcote induite par les vagues

De nombreux mécanismes contribuent à la dissipation de l'énergie des vagues. Lorsque les vagues se propagent depuis le large vers la côte, les eaux deviennent généralement de moins en moins profondes et les vagues voient leurs vitesses de propagation diminuer par réfraction. Quand la vitesse des particules associée au mouvement des vagues dépassent celles de la vitesse de phase de l'onde, la cambrure atteint une valeur limite et la vague déferle, provoquant alors une élévation moyenne du plan d'eau (Figure 2). La surcote induite par ce mécanisme varie en fonction des hauteurs, périodes et directions des vagues à la côte.

c) La surcote totale

La part relative de la surcote météorologique (section a) et de la surcote associée au déferlement des vagues (section b) est fortement dépendante de la bathymétrie du domaine considéré. En présence d'un plateau continental large c'est-à-dire une zone de pente douce et de profondeur limitée, l'action du forçage météorologique est prépondérante. En revanche, lorsque les pentes sont fortes ou que les côtes sont protégées par des récifs, la surcote associée au déferlement des vagues est dominante. Le niveau de la mer est dans les deux cas, déterminé en sommant ces contributions avec celle induite par la marée astronomique.

d) Extension du jet de rive

Enfin, le niveau instantané du plan d'eau sur la bande côtière dépend également du flux et du reflux des vagues sur l'estran, le jet de rive (Figure 2). Ce phénomène est essentiel à prendre en compte lorsque l'énergie des vagues reste importante à proximité de la côte, permettant d'estimer la cote maximale atteinte par la mer au-dessus d'un niveau de référence, le *runup*.

1.3.2. Chronologie d'un épisode

La submersion marine des zones côtières peut se manifester de trois manières distinctes :

- le franchissement par paquets de mer : cette situation se manifeste en présence de fortes vagues. Des écoulements se produisent de manière intermittente au-dessus d'ouvrages de protection côtière ou de cordons naturels (sans que le niveau moyen soit supérieur à l'altitude du terrain naturel) ;
- le débordement : cette situation se produit lorsque le niveau d'eau moyen dépasse de manière continue les ouvrages de protection côtière ou les cordons naturels jusqu'à ce que l'intensité de l'événement diminue et que le niveau d'eau moyen revienne à une hauteur inférieure à celle des structures de protection ou des cordons naturels ;
- la rupture de structure de protection : cette situation se produit en cas de contraintes extrêmes, les ouvrages de protection ou les cordons naturels peuvent se rompre, permettant ainsi à l'eau de s'écouler librement et de submerger les zones côtières protégées.

Un épisode de submersion peut résulter de la succession de ces différents processus (Figure 3), voire de leur occurrence simultanée, sur des secteurs distincts. Lors de tempêtes, on assiste généralement à une montée progressive du niveau statique et à un renforcement de l'intensité des vagues (temps 1). Au-delà d'une certaine intensité, il peut y avoir franchissements par paquets de mer, la submersion associée restant en général limitée (temps 2). Si le niveau statique continue à s'élever et dépasse la cote maximale à terre, la submersion passe alors en régime de débordement (temps 3). Lorsque le niveau statique diminue du fait de la marée et/ou de la baisse de la surcote, on peut observer, suivant la configuration, une « vidange » partielle de l'eau accumulée à terre vers la mer ou de nouveaux franchissements jusqu'à ce que les conditions de mer diminuent en intensité. En cas de rupture d'un ouvrage de protection, il peut y avoir

submersion par débordement alors que le niveau statique ne dépasse pas la cote maximale de l'ouvrage avant rupture.

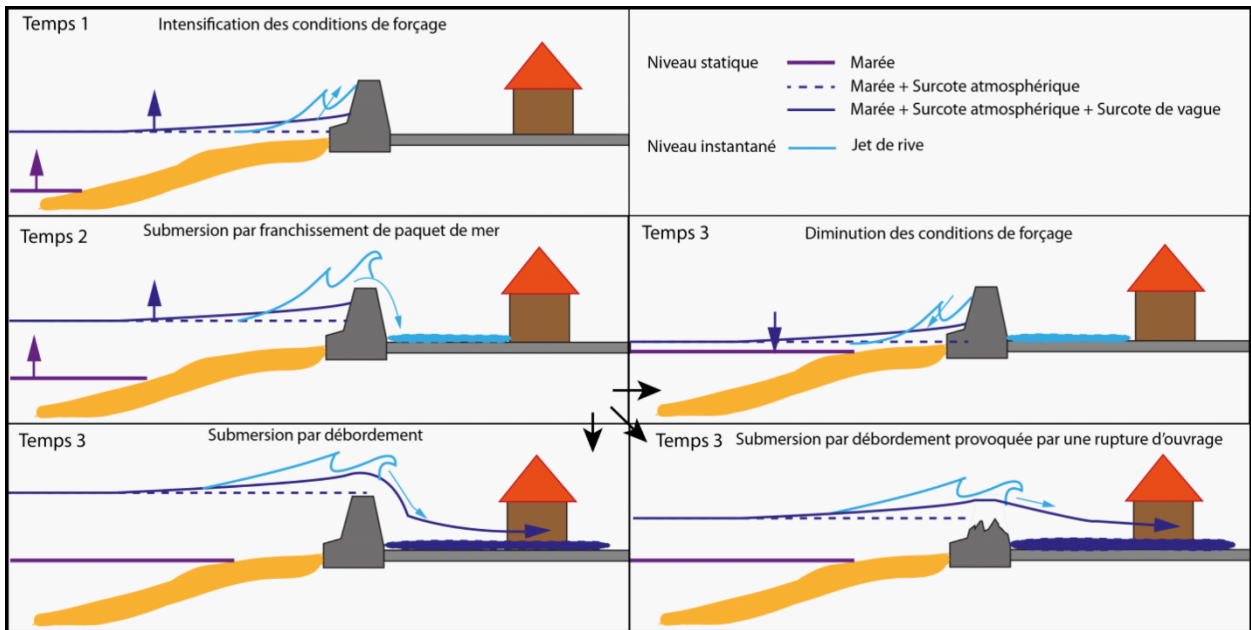


Figure 3 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer, débordement, dégradation des ouvrages, ©BRGM).

Dans le cadre de cette étude, seuls les processus de franchissements et de débordement seront caractérisés.

2. Fonctionnement du littoral et principe de la méthode

Ce chapitre a pour objectif de souligner les principales caractéristiques de la zone d'étude sur les plans géographique, géologique, morpho-sédimentaire, météorologique et océanographique sur lesquelles reposent la méthode mise en œuvre. Il s'appuie sur quelques études antérieures et les données disponibles sans intégrer de manière exhaustive l'ensemble des références traitant de la zone d'étude.

2.1. CADRE GEOGRAPHIQUE

Le littoral étudié se situe dans le département de Corse-du-Sud sur les communes d'Ajaccio, Bastelicaccia, Grosseto-Prugna, Albitreccia, Pietrosella et Coti-Chiavari (Figure 1).

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET MORPHOSEDIMENTAIRE

Le littoral de Corse-du-Sud est rocheux, et se compose principalement de granits hercyniens (Figure 4). Ce littoral rocheux abrite des plages sableuses accolées à des falaises rocheuses, à toutes les échelles spatiales, depuis les plages de poches isolées dans des criques, jusqu'aux grands golfes tels que le Golfe d'Ajaccio.

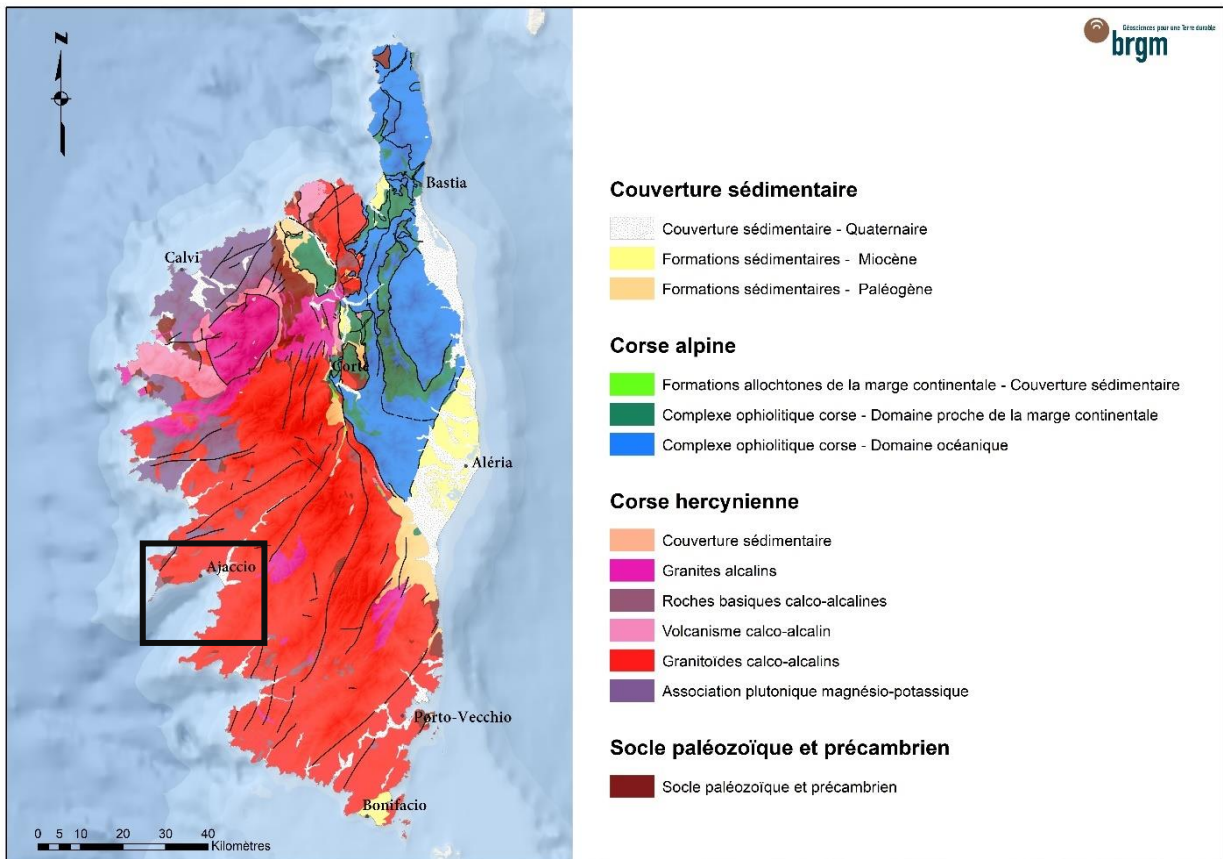


Figure 4 : Carte géologique simplifiée de la Corse (source : Carte géologique de la France 1/500 000, éditions BRGM), cadre noir : zone d'étude.

Les plages de poches (*pocket beaches*) sont des petites baies sableuses situées entre deux caps rocheux. Le transfert sédimentaire entre ces plages est généralement limité et dépend de la géométrie des caps, et de leur position plus ou moins proéminente vers le large. Les événements tempétueux les plus puissants sont responsables des transferts sédimentaires inter-plages (Belon et Bodéré, 2016).

En Corse, ces anses sableuses sont souvent situées au droit de vallées incisées par une rivière dont l'embouchure marine interrompt le cordon littoral sableux. En arrière de celui-ci se développe généralement une zone humide présentant des intérêts écologiques importants et/ou des aménagements touristiques. Au sein de la zone d'étude, plusieurs zones humides sont présentes en aval des cours d'eau en fond du golfe et sur sa rive sud : Gravone et Prunelli à Ajaccio et Bastelicaccia, Agosta à Albitreccia, Alziona à Grosseto-Prugna, Ruppione à Pietrosella, Zirione entre Pietrosella et Coti-Chiavari.

Les grandes baies constituent les échancrures du littoral de la Corse telles que le Golfe d'Ajaccio. Au sein du golfe, les plages se présentent soit sous la forme de plages de poches d'envergure limitée, soit de cordons littoraux d'environ 3 à 4 km de longueur, disposées de part et d'autre d'un grau d'embouchure, comme la plage du Ricanto (Communes d'Ajaccio) ou de Mare e Sole (communes de Pietrosella et Coti-Chiavari, Figure 5). La plupart des plages de poche du Golfe d'Ajaccio sont des plages urbaines, c'est-à-dire fortement urbanisées, sans dune ni zone humide (Figure 6).



Figure 5 : Golfes d'Ajaccio, plage du Ricanto (à gauche) et plage de Mare e Sole (à droite), ©Geoportail.



Figure 6 : Exemple de plages de poche urbaine, plage du Trottel, commune d'Ajaccio.

2.3. CONTEXTE METEO-MARIN

2.3.1. Régime climatique global

Les vents ont une action majeure sur la dynamique sédimentaire du littoral, car ils sont responsables de la génération de la houle au large. La Corse par sa position géographique est sujette à un régime de vents réputés violents avec des changements de directions fréquents et brutaux. Les vents dominants sont (Stépanian et Balouin, 2011) :

- U Libecciu (le Libeccio), vent violent de secteur ouest à sud-ouest, il touche particulièrement la façade ouest de l'île. En hiver, il est généralement accompagné de fortes précipitations alors qu'en été, il est associé à un temps doux et sec ;
- U Maestrale (le Mistral), vent de secteur nord-ouest, particulièrement intense et sec en été. Il touche la partie occidentale de la Corse ;
- A Tramontana (la Tramontane), vent de secteur nord à nord-est violent et froid. En hiver, il est responsable d'un climat humide et froid ;
- U Grecale (le Grec), vent de secteur est à nord-est qui peut être très violent entre l'automne et l'hiver ;
- U Levante (le Levant) vent de secteur est, très humide. Il peut être très violent pendant la période hivernale ;
- U Sirocco, vent de secteur sud à sud-est, chaud et humide. Il est souvent convoyeur de poussières venues d'Afrique du Nord (Figure 7).

D'autre part, le secteur des bouches de Bonifacio est réputé particulièrement venteux en raison de l'effet Venturi³ généré par l'espace restreint entre le Corse et la Sardaigne. Ainsi, le vent y souffle 300 jours par an et des records sont régulièrement enregistrés au Cap-Pertusato (par exemple 187 km/h le 29/10/2018 pendant la tempête Adrian).

³ Effet Venturi : Processus en dynamique des fluides d'accélération des particules dans un espace restreint.

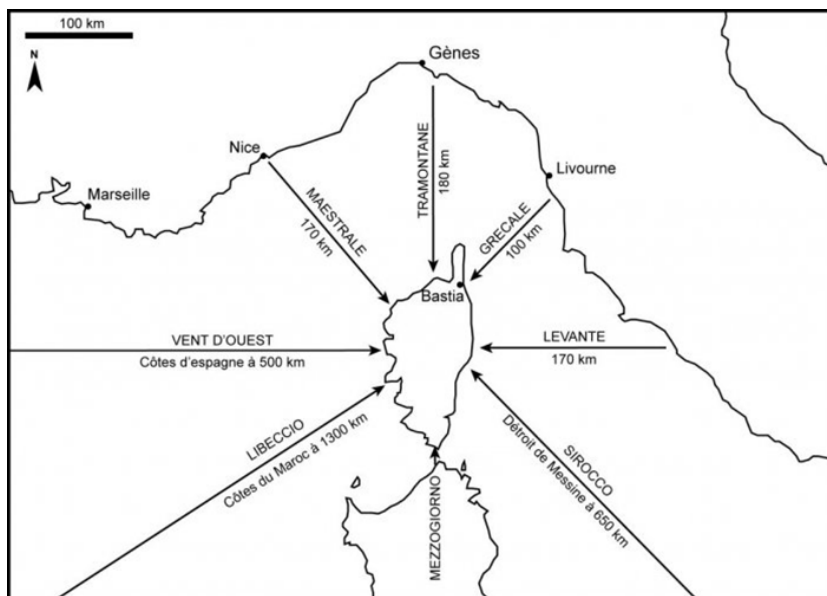
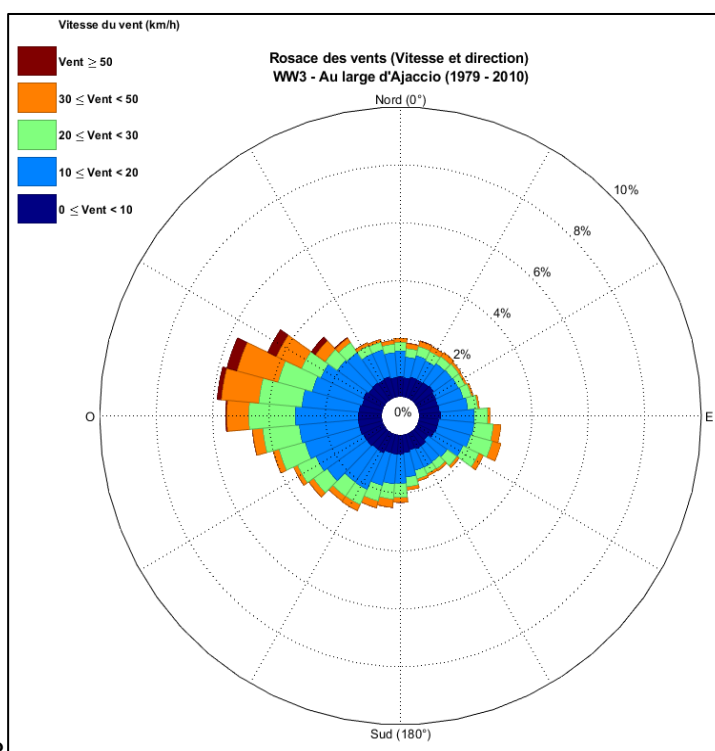


Figure 7 : Carte de répartition des vents dominants en Corse.

Concernant les secteurs de l'étude, la côte Ouest du département de Corse-du-Sud est dominée par des vent d'Ouest et Nord-Ouest (Mistral).



La Figure 8

Figure 8 présente les roses des vents provenant de la base de données NWW3 Méditerranée fournie par la NOAA (NWW3 MED, <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/nopp-phase2.php>) pour un point d'extraction au large d'Ajaccio de 1979 à 2010.

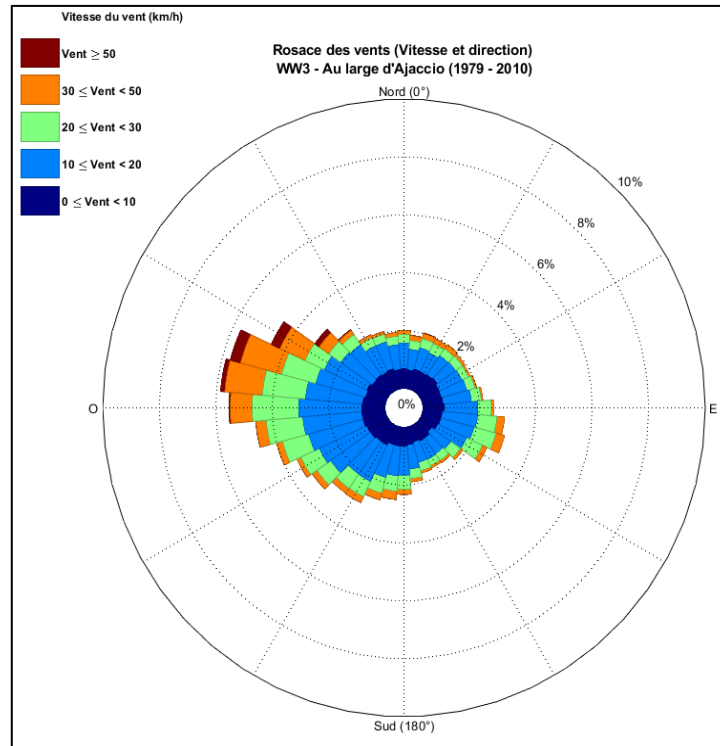


Figure 8 : Roses des vents calculées : au large d'Ajaccio entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).

2.3.2. Caractéristiques générales des tempêtes

Du fait de son caractère insulaire, la Corse est exposée aux tempêtes en provenance de tous les secteurs géographiques. Il existe ainsi une grande différence entre la côte occidentale exposée aux vents de secteur ouest, qui soufflent sur un long fetch⁴ depuis Gibraltar et la côte orientale sur la mer Tyrrhénienne, où le fetch est plus limité entre la péninsule italienne et la Corse.

Il en résulte de grandes différences en termes de caractéristiques des houles (période, hauteur, direction) et des impacts associés sur le littoral (Stéphanian et Balouin, 2011). Sur la côte occidentale où se trouve le Golfe d'Ajaccio, ces événements se produisent lorsqu'un flux d'ouest est bien établi entre un anticyclone situé sur la péninsule ibérique, et une dépression au niveau du Golfe de Gênes. Un flux de nord important est alors bien établi, et la dépression réoriente ces vents dans des secteurs nord-ouest à sud-ouest sur la Corse.

L'ensemble de la Corse peut également être balayé par de plus grosses tempêtes. Ce sont généralement des dépressions importantes qui se forment ou se régénèrent sur la Méditerranée occidentale en provenance de l'océan Atlantique. Elles sont généralement très creuses (*Patm* inférieures à 990hPa), et se déplacent rapidement d'ouest en est sur le bassin méditerranéen.

⁴ Fetch : distance en mer ou sur un plan d'eau au-dessus de laquelle souffle un vent donné sans rencontrer d'obstacle.

2.3.3. Contexte océanographique

En Méditerranée, la marée est de type microtidale⁵ (d'après le SHOM⁶) avec un marnage de 0.2 m en mortes-eaux⁷ à 0.4 m en vives-eaux⁸.

Sur la côte ouest et nord-ouest, les conditions de vagues sont bien plus énergétiques que sur la façade est de la Corse, avec des valeurs de Hs dépassant 2 m en toute saison et 4 m en hiver. La direction principale des vagues est ouest (Figure 9 et Figure 10).

Par ailleurs, l'action des vagues sur le littoral en fonction de la direction par rapport à la côte induit un courant transportant des sédiments, appelé dérive littorale. Au sein du Golfe d'Ajaccio, essentiellement constitué de cellules sédimentaires quasi-closes (plages de poche), la dérive littorale est matérialisée par une rotation de plage qui est soumise à la direction principale de la houle. Par exemple, sur une plage de poche orientée nord-sud, des vagues provenant du secteur nord engendreront un déplacement sédimentaire vers la portion sud de la plage alors que des vagues provenant du sud entraineront un déplacement vers le nord de la plage.

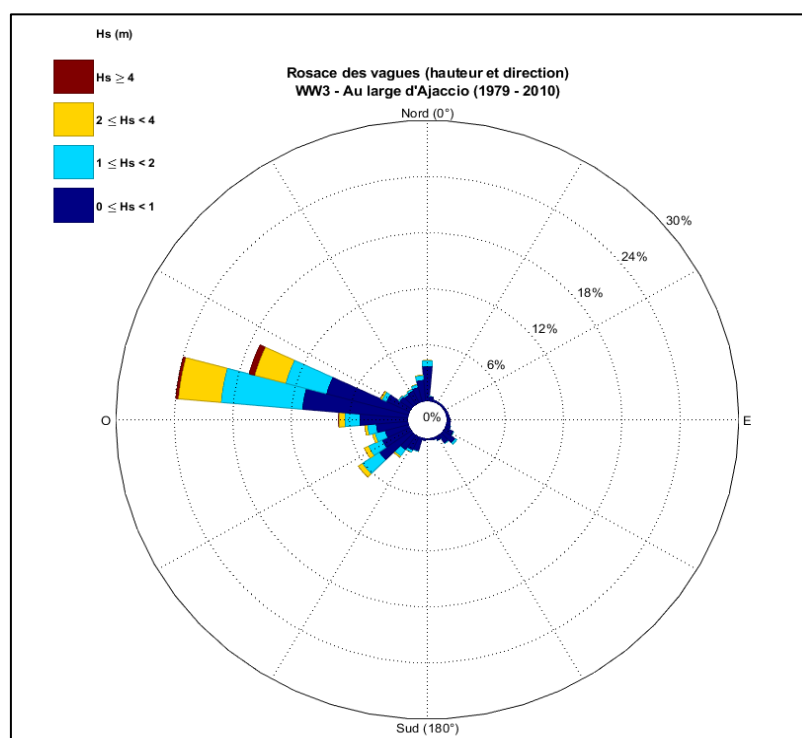


Figure 9 : Roses des vagues calculées : au large d'Ajaccio entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).

⁵ Milieu microtidal : milieu où le marnage est inférieur à 2 mètres, caractéristique des mers fermées.

⁶ Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

⁷ Marée de morte-eau : marée où le coefficient est inférieur à 70.

⁸ Marée de vive-eau : marée où le coefficient dépasse 70.

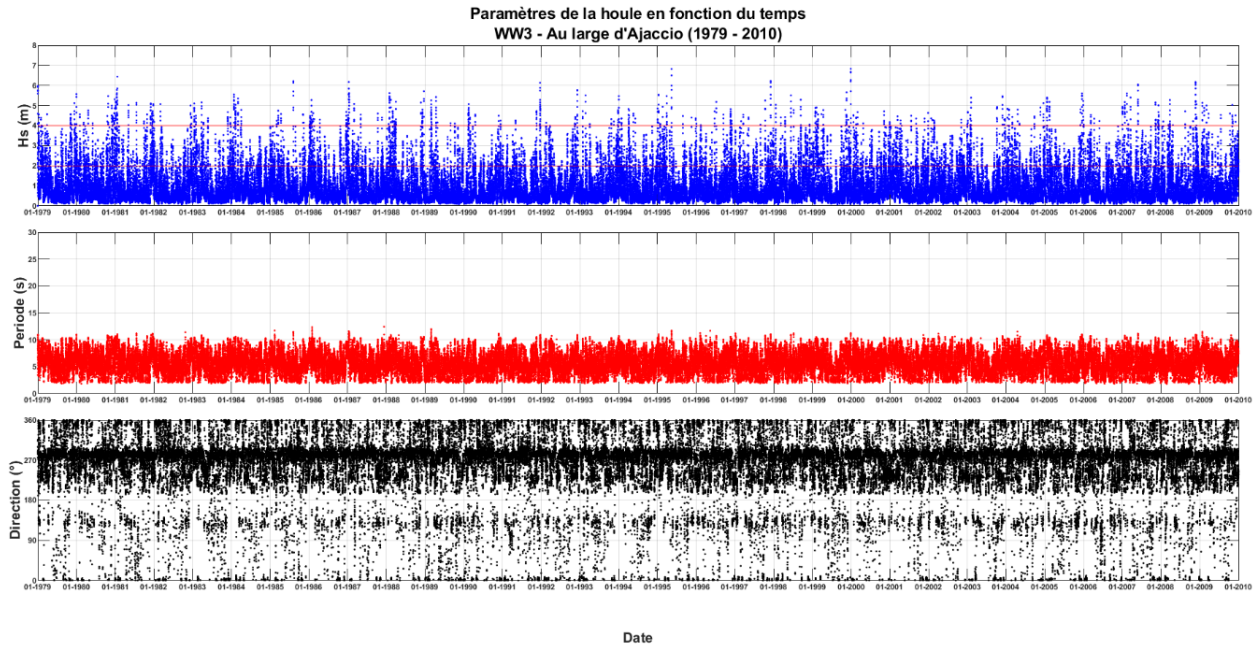


Figure 10 : Paramètres de la houle au large d'Ajaccio entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).

2.3.4. Connaissances historiques

Bien que beaucoup de tempêtes soient recensées en Corse par Météo-France et visibles sur les jeux de données de vagues (Figure 10), peu d'articles dans les médias ou sur les bases de données de catastrophes naturelles témoignent de leurs impacts. Même si le secteur d'Ajaccio est bien documenté, il n'existe pas de témoignage dans les médias pour la majorité des pics de hauteur significative supérieure à 2 m. Il est donc compliqué de déduire en termes d'impacts pour chaque événement marquant, un caractère généralisé à la Corse-du-Sud ou bien seulement localisé au niveau de secteurs plus exposés. Treize événements majeurs survenant en Corse-du-Sud ont pu être identifiés entre 1962 et 2018 (un tous les 4 à 5 ans en moyenne). Seul celui de la tempête Adrian (29/10/2018) pour lequel un maximum de données, de témoignages et de mesures sont disponibles, est présenté ci-dessous.

Tempête du 29 octobre 2018

Cette tempête a été baptisée « Adrian » par Météo-France. Elle a déclenché une vigilance rouge pour « vents violents », une vigilance orange « vagues submersion » et « pluie et orages » sur l'ensemble de la Corse. Cette tempête exceptionnelle a engendré des dégâts matériels importants sur presque l'ensemble du littoral de la Corse et notamment sur le pourtour du Golfe d'Ajaccio (Figure 11). Cet événement a fait l'objet d'observations post-tempêtes détaillées dans le rapport Mugica et Laigre (2019, RP-69445-FR). Ainsi, des franchissements de paquets de mer ont été enregistrés sur plusieurs sites du Golfe d'Ajaccio, notamment sur le front de mer d'Ajaccio et le long de la route des Sanguinaires. Les nombreux débris observés témoignent de l'exposition aux chocs mécaniques et projections associés aux franchissements de paquets de mer (Figure 12). Aucune submersion par débordement n'a été enregistrée mais les témoignages ne garantissent pas une vision exhaustive à l'échelle du Golfe d'Ajaccio.



Figure 11 : Illustration des franchissements de paquets de mer et projections liées aux vagues, Quai des Torpilleurs à gauche et route des Sanguinaires à droite (Ajaccio, Source Facebook).



Figure 12 : Illustration des projections de débris associés aux franchissements de paquets de mer, quai des Torpilleurs à Ajaccio (Photos DDTM2A, 30/10/2018).

Le dimanche 28 octobre 2018, une intense dépression se creuse à l'est des Baléares. Elle sera responsable de la tempête en Corse du lundi 29 octobre 2018 (vents violents et fortes vagues s'ajoutant au contexte très pluvieux et orageux) (Figure 13). Des rafales dépassant 130 km/h sont enregistrées dans l'après-midi, une pointe de 188 km/h est observée au Cap-Corse.

L'impact considérable de cette tempête provient de la conjonction de plusieurs facteurs environnementaux et météo-marins simultanés (vent, dépression, vagues et niveaux d'eau) qui pris indépendamment ne présentaient pas de caractère exceptionnel. La direction sud-ouest pour la façade ouest a induit une configuration plus défavorable à l'origine des nombreux dégâts.

La Figure 14 présente en parallèle la hauteur et la direction des vagues (données CANDHIS), la vitesse du vent et la pression atmosphérique (données Synop MétéoFrance) ainsi que le niveau d'eau (données marégraphiques REFMAR) pour la façade ouest. La hauteur significative de la houle atteint 5.8 m et les houles sont de secteur sud-ouest (houlographe de la Revellata). La vitesse du vent moyen enregistrée à la station d' Ajaccio atteint 50 km/h lors de cet évènement, avec une très forte dépression (980 hPa).

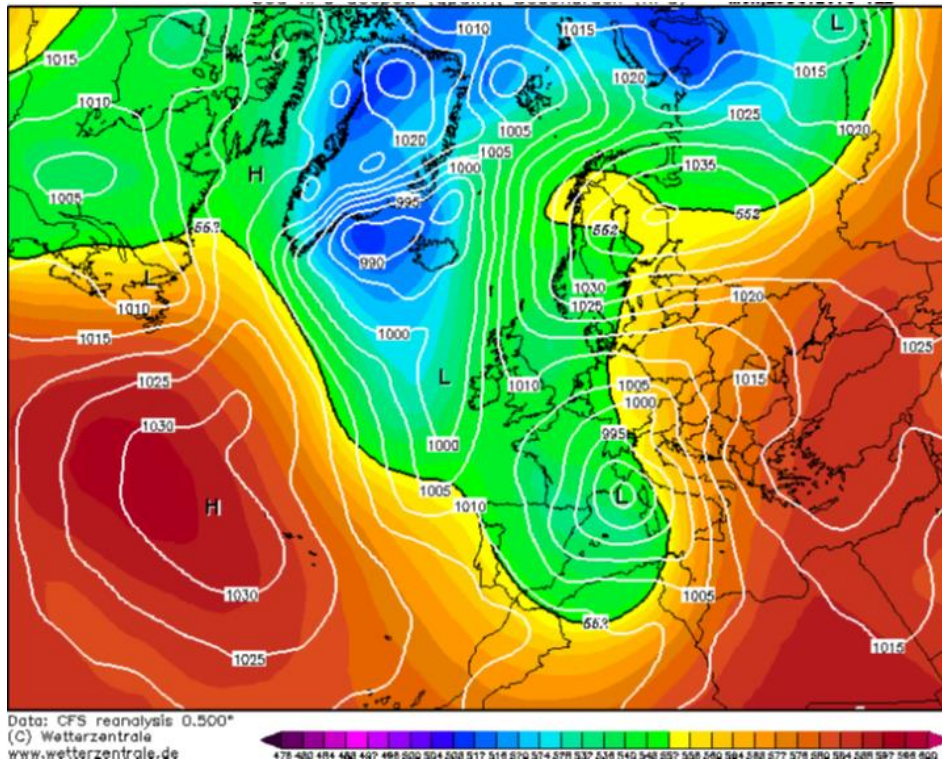


Figure 13 : Pression atmosphérique le 29/10/2018 à 12h UTC (Source : www.wetterzentrale.de).

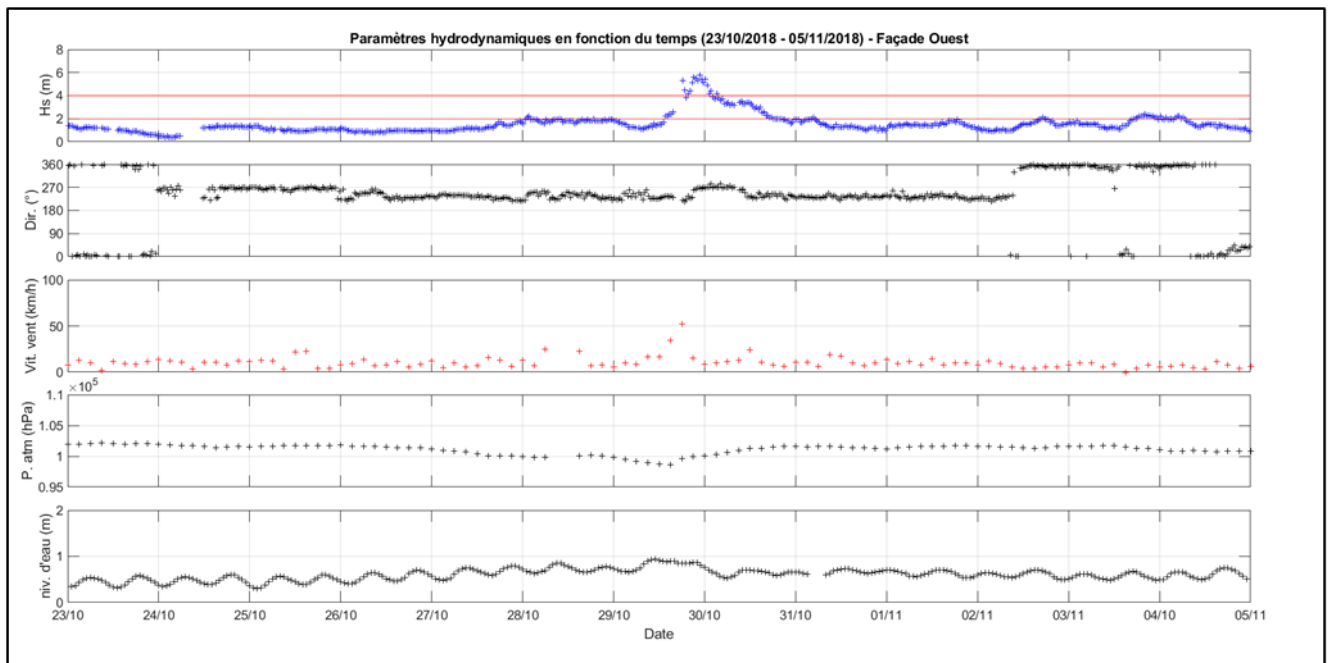


Figure 14 : Paramètres météorologiques et météo-marins mesurés du 23/10/2018 au 05/11/2018 sur la façade ouest : Hauteur significative de la houle et direction pic des vagues (source : Houlographe de la Revellata, CANDHIS), vitesse du vent et pression atmosphériques (source : Synop MétéoFrance, station d'Ajaccio) et niveau d'eau (source : Marégraphe du SHOM à Ajaccio).

2.3.5. Conclusion sur les phénomènes naturels et principe de la méthode

L'approche historique et l'analyse des données météo-marines sur les événements les plus récents soulignent l'association de surcote atmosphérique aux événements de tempête majeurs. La résolution des données disponibles ne permet pas de distinguer dans la surcote atmosphérique, la part de la surcote liée au vent de la part de la surcote due à l'effet de baromètre inverse⁹. Cette surcote atmosphérique peut atteindre 25 cm comme ce fut le cas lors de la tempête des 27-28 novembre 2008 (Météo France, 2008).

Les impacts recensés lors des événements de tempête majeurs ne mettent pas en évidence de submersion marine par débordement qui est un phénomène potentiellement non négligeable sur certains secteurs très bas tels que les zones humides et les embouchures évoqués précédemment (cf. paragraphe 2.2.) D'autre part, aucune submersion marine par rupture d'ouvrage ou brèche dans le cordon dunaire n'a été recensée autour du Golfe d'Ajaccio.

En revanche, les submersions marines par franchissements de paquets de mer ainsi que les chocs mécaniques et les projections liés au déferlement des vagues représentent les principaux phénomènes recensés auxquels sont exposés le littoral de Corse-du-Sud, comme l'a mis en évidence l'approche historique (route des Sanguinaires et front de mer d'Ajaccio par exemple).

Afin de considérer les spécificités locales et les différents types de submersion marine (débordements et/ou franchissements de paquets de mer), le BRGM a donc mis en œuvre une méthode de modélisation numérique mixte basée sur (voir Chapitre 6) : 1/ le code Uhaina en mode Saint-Venant couplé avec WaveWatch 3 (WW3) pour la simulation des débordements et l'écoulement de l'eau à terre (vitesse d'écoulement, hauteurs d'eau, durée de submersion, entrées d'eau préférentielles) et 2/ le code SWASH en mode vagues à vagues (profil) pour la simulation des franchissements de paquets de mer dont les débits franchissant calculés seront introduits dans le couplage WW3/Uhaina.

Une réflexion et une concertation a été menée avec la DDT2A sur les scénarios à considérer (configuration géomorphologique des embouchures, modalités de prise en compte des structures de protection et des connexions hydrauliques, cf. paragraphes 6.6.2 et 6.6.4).

Afin de prendre en compte la conjonction de submersion marine et de crue, le choix de la période de retour des débits fluviaux (Q) de la Gravone, du Prunelli et des cours d'eau côtiers a été fait en concertation avec la DDT2A sur la base des données et études existantes (cf. paragraphe 5.4).

La méthode mise en œuvre bénéficiera de tâches réalisées dans le cadre de la convention entre le BRGM et la DREAL (06/07/2018, rapport BRGM/RP-69376-FR, 2020) à savoir l'analyse historique des événements de tempêtes ainsi que les analyses statistiques pour déterminer les événements de référence au large.

⇒ *Cette méthode ne permet pas la caractérisation de l'aléa chocs mécaniques et projections. Une bande de sécurité a été définie au niveau des secteurs potentiellement exposés à cet aléa telle qu'imposée par le décret n°2019-715 et recommandée par le guide PPRL du MEDDE (mai 2014).*

⁹ Effet de baromètre inverse : une chute de pression de 1hPa génère une élévation du plan d'eau de 1 cm.

3. Données topo-bathymétriques

Ce chapitre présente les données topo-bathymétriques exploitées et combinées pour la production du MNT à partir duquel les grilles des modèles ont été élaborées. La méthode de production de ce MNT est détaillée en Annexe 1.

3.1. BATHYMETRIE

3.1.1. Dalles bathymétriques du Shom

Le Shom entretient un fond de connaissance bathymétrique, enrichi au fil des levés et des campagnes, composé de semis de sondes dont la densité d'informations est supérieure à celle figurant sur les cartes marines. Un certain nombre de ces données est stocké dans la Base de Données Bathymétrique du Shom (BDBS). Elles constituent une base source de description du relief sous-marin nécessaire à de nombreuses applications.

Les dalles bathymétriques sont des produits composés d'un échantillonnage de semis de sondes extraits de cette base (Figure 15). Afin de limiter les volumes à diffuser, la décimation des données s'effectue en conservant les sondes les plus courtes à une résolution maximale de 25 m. Les informations ne sont pas modélisées et il s'agit donc ici de semis de sondes mesurées sur le terrain et validées. Les lots bathymétriques qui composent les dalles correspondent à l'extraction de la BDBS des sondes bathymétriques du Shom (aucun levé extérieur), valides, non protégées (ne présentant pas de contrainte de diffusion, ni commerciale ni militaire), issues de sondeurs variés (plomb de sonde pour les plus anciens, sondeurs monofaisceau et/ou multifaisceaux). Les sondes constituent un jeu de données hétérogène, à la fois dans le temps et en termes de technique d'acquisition.

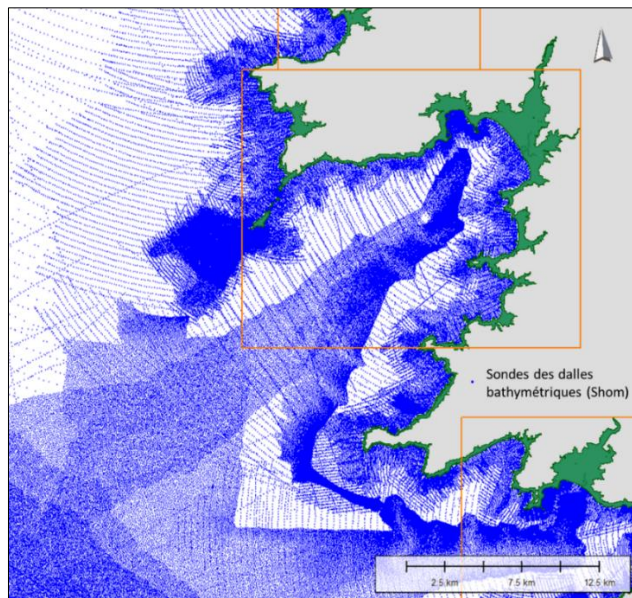


Figure 15 : Exemple de semis de sondes extraits des dalles bathymétriques du Shom aux abords du golfe d'Ajaccio.

Les sondes sont référencées verticalement par rapport au zéro de réduction des sondages (zéro des cartes marines), qui correspond généralement au zéro hydrographique de la zone

considérée. Les positions des sondes sont fournies en positions géographiques, rapportées au système WGS84¹⁰.

3.1.2. Produit MNT Bathymétrique de façade de la Corse à 100 m (Shom, 2015)

Le MNT bathymétrique de façade de la Corse d'une résolution de 0.001° (~ 111 m) a été réalisé dans le cadre du projet HOMONIM (Shom, 2015), et développé afin d'être implémenté dans les modèles hydrodynamiques afin de produire des prévisions aussi précises que possible des hauteurs d'eau et d'états de mer à la côte et donc d'améliorer la pertinence de la Vigilance Vagues-Submersion. Il couvre l'intégralité de la marge Corse, du littoral jusqu'à environ 3000 m de profondeur (Figure 16). Disponible gratuitement au téléchargement sur les portails de données (<https://data.shom.fr/> et <https://diffusion.shom.fr/>) du Shom, son utilisation est libre, sous licence ouverte / Open Data.

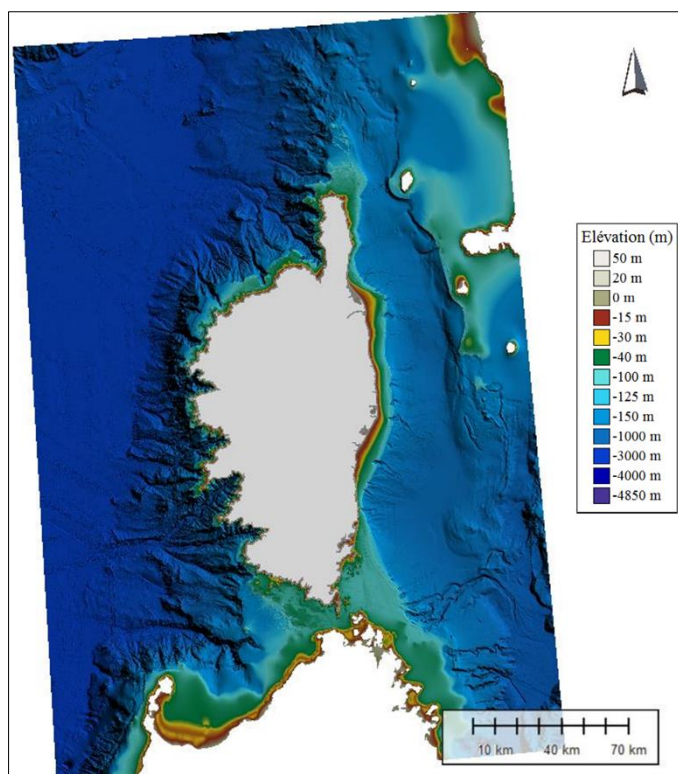


Figure 16 : Produit MNT Bathymétrique de façade de la Corse à 100 m (Shom, 2015). Ici dans le système géodésique légal français RGF93, avec pour système de coordonnées projetées le Lambert-93.

Les sources des données exploitées dans ce MNT sont indiquées dans le fichier de métadonnées associé. Ce produit est rendu disponible selon deux références verticales : niveau moyen (NM) et niveau des plus basses mers astronomiques (PBMA). Quatre formats sont proposés : asc, glz, bag, grd. Les positions des nœuds de la grille bathymétrique sont fournies en positions géographiques, rapportées au système WGS84¹¹.

¹⁰ Spécifications techniques externes des dalles bathymétriques du Shom : https://diffusion.shom.fr/media/wysiwyg/pdf/specs_externes_dalles_bathymetriques_2015_1.pdf

¹¹ Spécifications techniques externes du produit MNT bathymétrique de façade de la Corse à 100 m : https://diffusion.shom.fr/media/wysiwyg/pdf/Descriptif_Contentu_MNT_facade_2015.pdf

3.2. TOPOGRAPHIE

La principale source de données exploitée sur la partie terrestre des MNT, y compris sur la zone intertidale située à l'interface terre-mer, est le produit RGE ALTI® 1 m (IGN) (Figure 17). Les dalles de la version V1 du RGE ALTI® 1 m pour la Corse ont été ici exploitées.

Le RGE ALTI® est composé initialement du MNT issu de la BD ALTI® à 25 m, ré-échantillonné au pas de 1 m, auquel sont intégrées progressivement les données nouvelles, au rythme des réfections. L'objectif est une couverture (V2) de l'ensemble du territoire national concerné par le RGE® avec un modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 1 m ayant partout une précision d'au moins 50 cm. Le découpage du produit est effectué en dalles jointives d'un kilomètre de côté. Les données sont proposées de façon standard au format ESRI Ascii Grid (.asc) dans le système géodésique RGF93, projection Lambert 93, avec pour système altimétrique l'IGN78 en Corse. Sur les zones inondables et littorales, des besoins spécifiques liés à la mise en œuvre de la directive européenne inondation et aux problématiques d'aménagement et de gestion des risques sur le littoral ont été identifiés. Ils requièrent une précision plus grande, de l'ordre de 20-30 cm, qui est obtenue par les levés LIDAR aériens. Sur le littoral, le RGE ALTI® et la composante terrestre de Litto3D®, lorsque disponible, sont identiques.

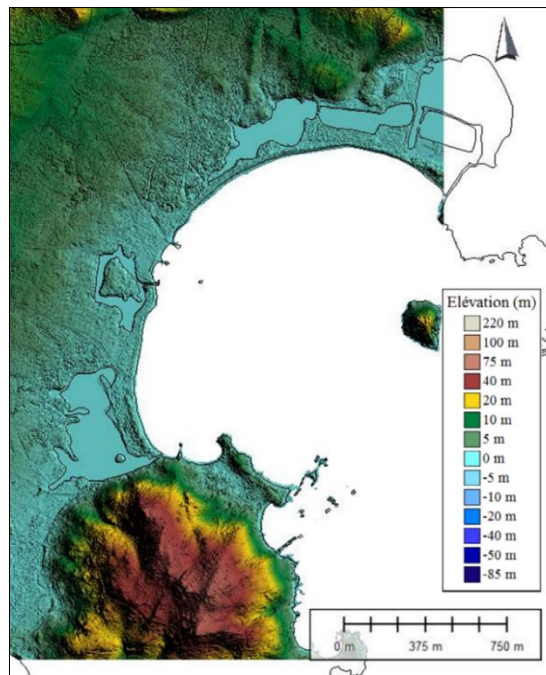


Figure 17 : Extrait du produit RGE ALTI® 1 m Corse (IGN).

3.3. PRODUIT LIDAR TOPO-BATHYMETRIQUE

Un extrait du produit « Partie maritime Litto3D – Corse 2017-2018 » a été mobilisé lors de la production de grille MNT de cette étude (Figure 18). Il s'agit d'une base de données altimétrique unique et continue terre-mer, acquise à partir de levés réalisés par les technologies lidar bathymétriques ou sondeur multifaisceau côté mer et lidar topographiques aéroportés côté terre.

Ces données proviennent de produits géographiques acquis par lidars topographique, topo-bathymétrique et bathymétrique aéroportés dans le cadre de l'opération « Risques côtiers, LITTO3D® ». Ces données ont été acquises par lidars aéroportés lors de campagnes

d'acquisition entre octobre 2017 et octobre 2018. Les produits sont fournis dans le système géodésique RGF93, projection Lambert 93, avec pour système altimétrique l'IGN78 en Corse.

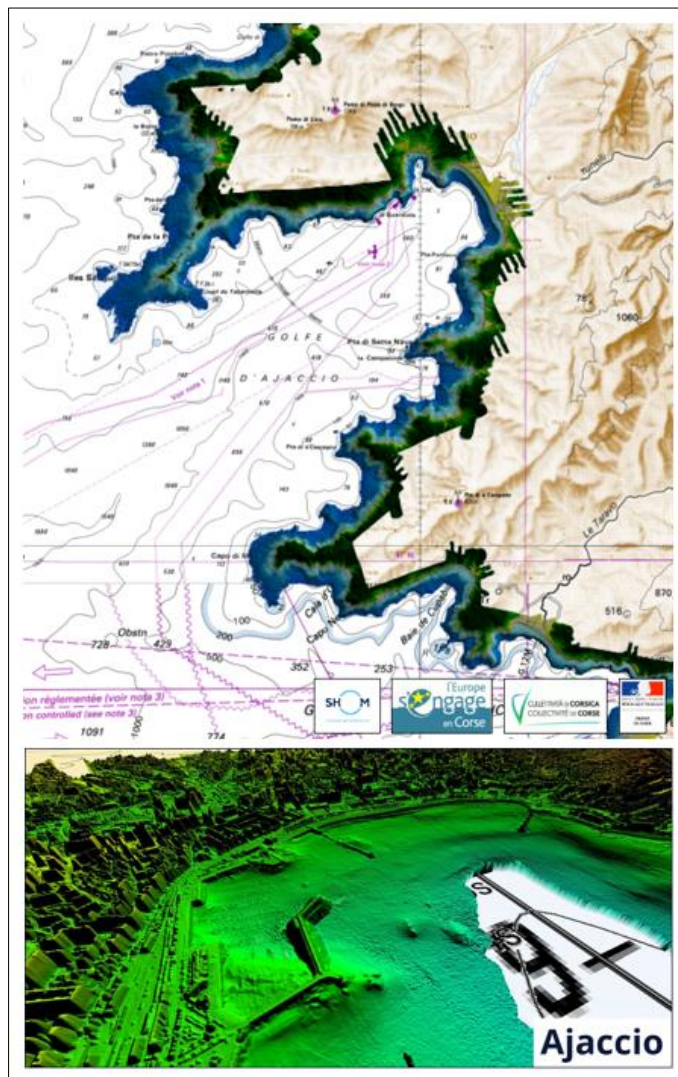


Figure 18 : Extrait du produit Lidar « partie maritime » CORSE–2017-2018 sur le secteur du Golfe d'Ajaccio (Shom - Collectivité de Corse - Dreal Corse, 2020) (Source : Shom).

La donnée acquise par le Shom dans le cadre de ce projet fait l'objet de traitements spécifiques en fonction de sa nature : en mer ou à terre¹². Les zones (maritimes) de bathymétrie sont traitées dans leur totalité et sur l'ensemble du produit (retrait de la surface d'eau, nettoyage du bruit au-dessus de la surface d'eau, dans la colonne d'eau et en dessous du fond, etc.). En ce qui concerne les zones topographiques (terrestres), il a été convenu par convention que le traitement serait effectué jusqu'à une limite de 20 m à l'intérieur du trait de côte Histolitt® (séparation du sursol (bâtiments, voitures, piétons, arbres, ...) du sol) ; au-delà de cette limite, la séparation sol/sursol n'est pas réalisée. Au-delà de cette limite c'est donc le produit RGE ALTI® 1 m (IGN) qui est utilisé.

¹² Spécifications techniques externes du produit Lidar « partie maritime » CORSE–2017-2018 (Shom - Collectivité de Corse - Dreal Corse, 2020) : <https://services.data.shom.fr/static/specifications/Readme-Produit-maritime-Litto3DCorse-2017-2018.pdf>

4. Données météo-marines

Les données météo-marines ont notamment vocation à permettre la caractérisation du contexte météo-marin avec entre autres, les événements de tempêtes marquants à partir d’une approche historique. Ces éléments ont précédemment été présentés dans le paragraphe 2.3. Ce chapitre présente les données météo-marines spécifiquement utilisées dans la présente étude pour la réalisation des analyses statistiques ainsi que la calibration et la validation des modèles numériques.

Les observations in situ (marégraphes et houlographes), trop peu nombreuses et pas assez anciennes sur le pourtour de la Corse, sont complétées par des simulations rétrospectives. Il s’agit de données de niveaux d’eau, de vagues et de vent générées par modélisation numérique afin de pallier l’insuffisance des observations in-situ en offrant une large couverture spatiale et temporelle ainsi qu’une fine résolution spatiale et temporelle.

Dans l’étude portant sur les zones basses potentiellement submersibles en Corse-du-Sud (BRGM/RP-69376-FR), le couple de points présenté sur la Figure 19, a été sélectionné afin de générer des événements centennaux de vagues, niveaux et vents forçant les modèles numériques pour les Golfes d’Ajaccio et de Valinco/Propriano. Les données extraites au niveau de ces points sont les suivantes :

- Les séries temporelles de vagues et de vents issues de la base de données NWW3_MED générée par la NOAA sur une période de 31 ans (1979 – 2009) ont été extraites au point NWW3 465 ;
- La série temporelle de niveau d’eau au repos issue de la base MARS_MED_BRGM, spécifiquement générée par le BRGM, a été extraite au point Corse 26.

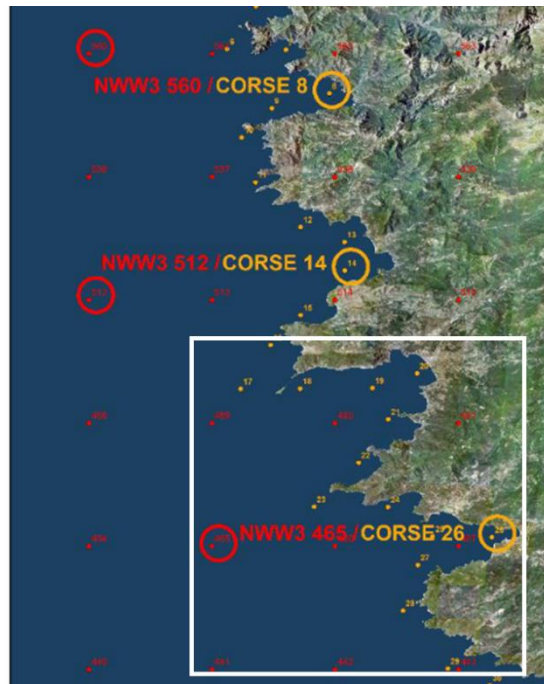


Figure 19 : Localisation des points d’extraction des données de vagues et vents NWW3 MED (en rouge) et de niveaux d’eau MARS (en orange). Les extractions utilisées pour les Golfes d’Ajaccio et de Valinco/Propriano sont encadrées en blanc.

Les séries temporelles des données extraites pour le couple NWW3 465/CORSE 26 sont présentées à la Figure 20 et décrites dans les paragraphes suivants.

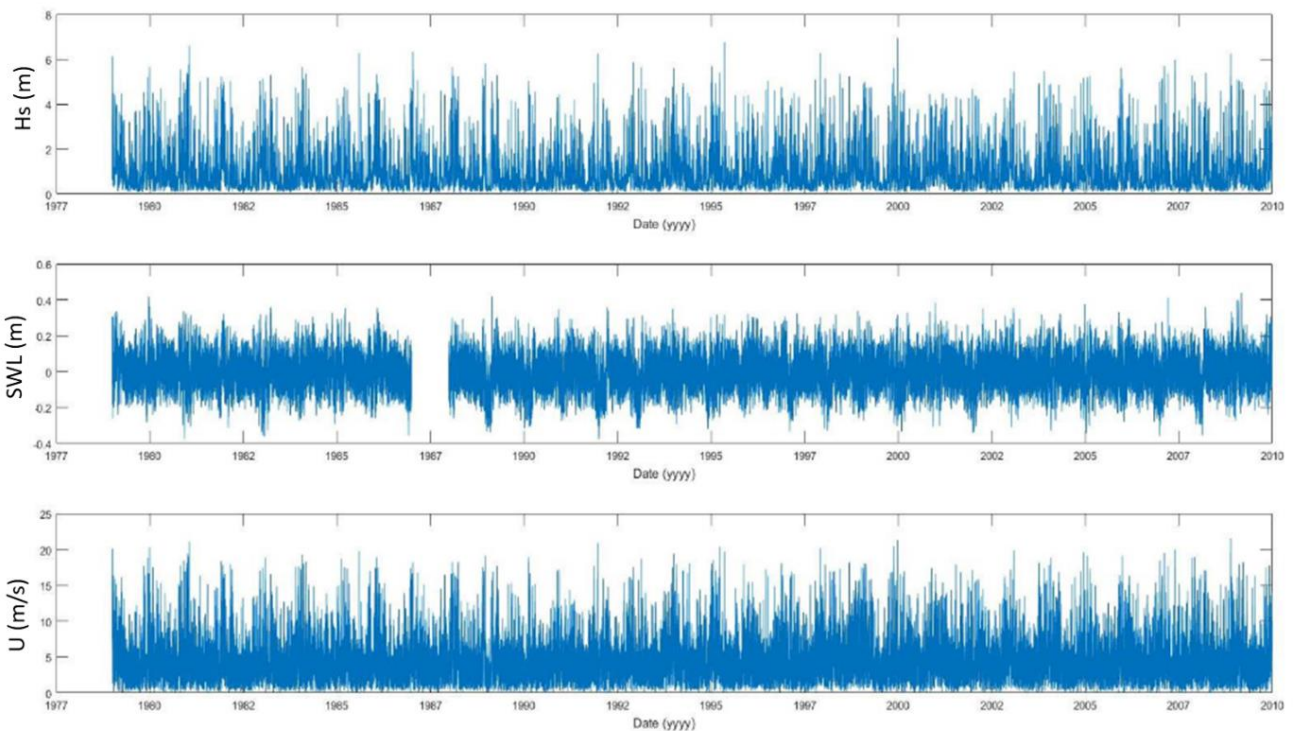


Figure 20 : Séries temporelles des conditions météo-marines utilisées pour les analyses au couple NWW3 465/ CORSE 26, et issues de l'étude BRGM/RP-69376-FR.

4.1. NIVEAUX D'EAU SWL

La série temporelle de niveaux d'eau au repos ou *Still Water Level* SWL (combinaison du niveau de marée et de la surcote atmosphérique), utilisée est issue des simulations rétrospectives MARS_MED_BRGM (simulation « hindcast ») d'une durée de 31 ans, sur la période 1979 - 2009.

Une analyse préliminaire ayant révélé un biais des données simulées sur l'année 1987 par rapport à celles des autres années, les données de l'année 1987 n'ont pas été exploitées. La période couverte est donc de ~30 ans (Figure 20, milieu).

4.2. VAGUES

Les données de vagues sont issues de la base de données NWW3 MED. La série temporelle couvre 31 ans (période 1979-2009) au pas de temps tri-horaire (Figure 20, haut).

Ces données sont caractérisées par un biais négatif, corrigé en appliquant une correction linéaire aux données NWW3 MED (cf. rapport BRGM/RP-69376-FR). Cette correction est issue de la régression linéaire entre des observations houlographiques et les données originales du modèle, et s'exprime telle que :

$$\text{NWW3 MED corrigé} = 1.21 \cdot \text{NWW3 MED} + 0.14$$

Au point NWW3 465, l'analyse des données brutes indique deux directions privilégiées de provenance des vagues supérieures ou égales à 5 m (cf. pointillés noirs) : le nord-ouest, et l'ouest-sud-ouest (Rose des vagues de la Figure 21).

Le secteur ouest-sud-ouest semble générer les vagues les plus pénalisantes pour la façade ouest de la Corse. Nous nous intéressons donc uniquement à ce secteur de provenance de vagues, tout en conservant l'intégralité de la série temporelle.

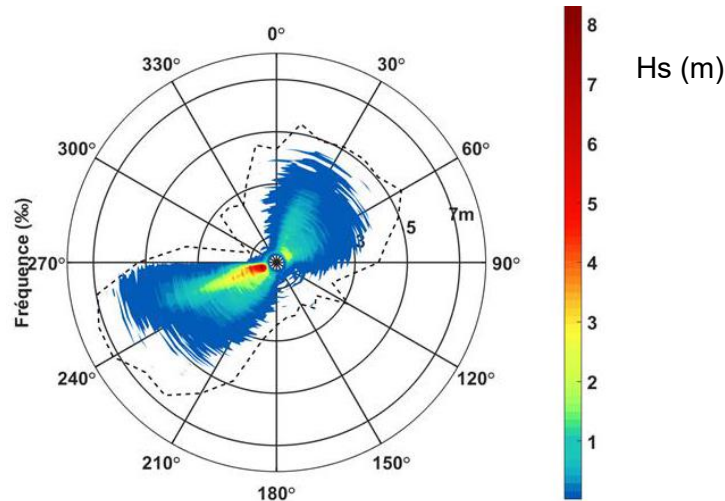


Figure 21 : Rose des vagues au point NWW3 465.

4.3. VENT

Tout comme les données de vagues, les données de vents sont issues de la même base de données de régionalisation dynamique des simulations de vagues NWW3 MED. La série temporelle couvre 31 ans (période 1979-2009) au pas de temps tri-horaire (Figure 20, bas). La Figure 22 indique les directions portant les valeurs les plus fortes de vent : les secteurs ouest-sud-ouest à nord-ouest. Comme pour les vagues, nous nous intéressons uniquement aux vents susceptibles de générer les vagues les plus pénalisantes au regard de la situation morphologique du site d'étude.

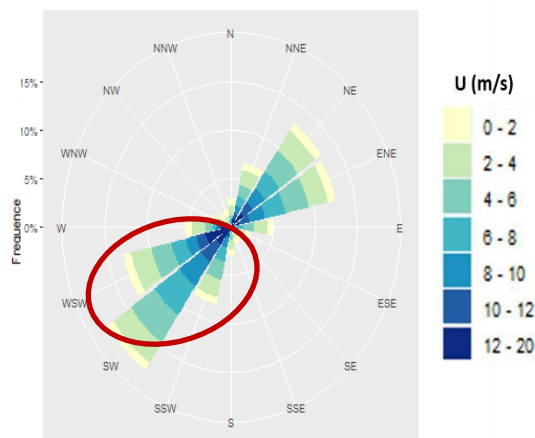


Figure 22 : Rose des vents au point NWW3 465.

5. Evènements de references

D'après le guide PPRL (MEDDE, 2014), « *L'évènement naturel de référence est l'évènement historique majeur s'il est supérieur à un évènement de période de retour 100 ans. Par défaut c'est l'évènement théorique de période de retour 100 ans. Il est caractérisé par deux paramètres au minimum, le niveau d'eau et la hauteur significative des vagues* ».

L'analyse des tempêtes passées ayant mené à des submersions marines, réalisée dans l'étude BRGM/RP-69376-FR, nous informe que : « Bien que beaucoup de tempêtes soient recensées en Corse par Météo-France et visibles sur les jeux de données de vagues [...], peu d'articles dans les médias ou sur les bases de données de catastrophes naturelles témoignent de leurs impacts. Même si le secteur d'Ajaccio est bien documenté, il n'existe pas de témoignage dans les médias pour la majorité des pics de hauteur significative supérieure à 2 m ». La tempête récente Adrian est donc prise comme évènement historique majeur.

En complément, nous nous intéressons à des événements de périodes de retours 100 ans calculés par méthode des probabilités conjointes dans l'étude BRGM/RP-69376-FR, et qui tient compte des vagues, des niveaux d'eau et des vents issus d'atlas numériques.

5.1. RAPPEL DE LA METHODE DE CALCUL DES PROBABILITES CONJOINTES

Une submersion marine se produisant sous l'effet de plusieurs agents dynamiques partiellement liés (vagues, niveaux d'eau – marée et surcote atmosphérique), l'analyse de la période de retour d'un seul agent n'est pas représentative de la période de retour du niveau marin au rivage. Il est nécessaire **d'analyser la période de retour conjointe en prenant en compte la dépendance entre les différents agents**. Ainsi, les événements considérés étant des tempêtes, cela nous pousse à considérer non seulement les vagues et les niveaux d'eau (comme recommandé par le guide PPRL, MEDDE, 2014), mais également le vent comme un agent participant à la génération de niveaux marins extrêmes. Dans ce but, l'analyse repose sur une approche statistique multivariée des extrêmes (Heffernan et Tawn 2004) que le BRGM a déjà appliqué sur plusieurs sites, notamment en Méditerranée (Nicolae Lerma et al., 2018, Louisor et al., 2021). Cette méthode a été appliquée dans l'étude portant sur les zones basses potentiellement exposées aux submersions marine en Corse-du-Sud (BRGM/RP-69376-FR), et les résultats issus de cette étude sont utilisés comme événements de référence dans la suite.

Cette approche est utilisée pour déterminer la probabilité que les trois conditions Hs (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 des valeurs spécifiées.

Nous déterminons ainsi un ensemble de triplets de valeurs (Hs ; SWL ; U) associées à une période de retour (ici 100 ans). A chacune de ces combinaisons, une valeur de période de pic Tp est calculée à partir de la relation entre Hs avec la cambrure des vagues St. Le choix a été fait de prendre la médiane des valeurs simulées de Tp pour chacune des hauteurs Hs. Concernant la direction pic des vagues Dp, ainsi que la direction du vent Du, des directions prédominantes ont été évaluée et appliquées.

Les étapes de l'analyse sont les suivantes : **Préparation du jeu de données** : il s'agit de constituer un échantillon avec un grand nombre de triplets (Hs ; SWL ; U) indépendants ;

- i. **Ajustement des lois de probabilités** (dites « marginales ») pour chaque variable H_s , SWL et U à l'aide de la loi Pareto Généralisée (GPD *Generalized Pareto Distribution*) ;
- ii. **Ajustement des modèles de dépendance**
 - a. **entre les trois variables extrêmes H_s , SWL et U** : cela repose sur l'approche semi-paramétrique décrite par Heffernan et Tawn 2004 ;
 - b. **entre H_s et T_p** : la distribution conditionnelle empirique S_i sachant H_s est utilisée.
- iii. **Simulation par méthode Monte-Carlo** à l'aide des lois marginales et des modèles de dépendance d'un très grand nombre de combinaisons (H_s ; SWL ; U) possédant les mêmes caractéristiques statistiques que les données observées ;
- iv. **Analyse des extrêmes qui permet de déterminer des triplets** (H_s ; SWL ; U) d'iso-période de retour de dépassement conjoint de 100 ans.

Ainsi, plusieurs combinaisons centennales (H_s , SWL, T_p , D_p , U, D_u) représentatives sont définies comme conditions au large des modèles hydrodynamiques. Ces étapes sont détaillées dans le rapport BRGM/RP-69376-FR et synthétisées en Annexe 2.

Le Tableau 1 suivant reprend les combinaisons centennales calculées. Les plus pénalisantes à la côte sont employées dans la suite comme forçage des modèles numériques, avec en bleu les combinaisons favorisant les franchissements de paquets de mer (8, 17, 22) et en orange, celles favorisant les débordement/franchissements (27 et 34).

Combinaisons	H_s (m)	T_p (s)	U (m/s)	SWL (m/NM)
1	8,52	11,44	21,46	0,15
2	8,65	13,50	21,25	0,15
3	8,68	13,50	20,92	0,15
4	8,39	11,38	21,69	0,15
5	8,28	11,28	21,80	0,15
6	8,05	11,16	21,95	0,15
7	8,46	11,41	21,42	0,20
8	8,62	13,50	21,00	0,20
9	8,69	13,00	20,05	0,20
10	8,27	11,34	21,68	0,20
11	8,01	11,17	21,89	0,20
12	7,94	11,13	21,93	0,20
13	8,37	11,39	21,27	0,25
14	7,91	11,17	21,63	0,25
15	8,17	11,23	21,47	0,25
16	7,60	11,12	21,75	0,25
17	8,52	11,44	20,75	0,25
18	8,02	11,20	20,66	0,30
19	7,76	10,95	20,91	0,30
20	7,47	10,85	21,07	0,30
21	8,14	11,28	20,19	0,30
22	8,20	11,28	19,16	0,30
23	6,15	10,48	20,23	0,35
24	7,32	10,69	19,32	0,35
25	7,03	10,71	19,59	0,35
26	6,45	10,60	20,11	0,35
27	7,48	11,05	18,54	0,35
28	7,64	11,18	16,74	0,35
29	6,12	10,83	16,84	0,40
30	5,34	10,21	17,83	0,40
31	5,87	10,57	17,21	0,40
32	6,33	10,29	16,27	0,40
33	6,65	10,43	13,84	0,40
34	6,92	11,04	10,49	0,40
35	5,07	10,29	18,11	0,40

Tableau 1 : Valeurs des paramètres de vagues (H_s et T_p), de vent (U) et de niveau d'eau (SWL en m/NM^{13}) au large des golfes d'Ajaccio et de Valinco/Propriano (point NWW3 465 / CORSE 26).

¹³ m/NM : l'unité est le m, par rapport au niveau moyen NM.

5.2. RETOUR D'EXPERIENCE APPROCHE STATIQUE

L'approche statique, déployée dans l'étude précédente (BRGM/RP-69376-FR) a permis une identification des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines en Corse-du-Sud. Toutefois, cette approche ne permettait pas de prendre en compte certains éléments, qui sont considérés dans la présente étude. Elle a été considérée insuffisante pour représenter l'aléa submersion marine comme l'illustre la Figure 23. L'extrait de la carte des ZBPESM montre que la submersion constatée lors de la tempête Adrian (29/10/2018) sur le quai des Torpilleurs, générée par des franchissements de paquets de mer, n'est pas représentée.

A noter que les franchissements de paquets de mer ainsi que les chocs mécaniques et projection ont été pris en compte de manière forfaitaire dans l'approche « statique » par des bandes de sécurités représentées respectivement en hachurés bordeaux (50 m de large) et en hachurés violet (25 m de large), conformément aux consignes du guide PPRL du MEDDE (2014).



Figure 23 : Extrait de la carte des Zones Basses Potentiellement Exposées aux Submersions Marines à Ajaccio (à gauche, rapport RP-69376-FR, 2020) et illustration de la submersion marine par franchissement de paquets de mer à Ajaccio lors de la tempête Adrian (29/10/2018, image de droite).

D'autre part, la non prise en compte dans l'approche « statique » de la chronologie de l'évènement, représente des sources de surestimation de l'emprise submergée (et des hauteurs d'eau), car les volumes réellement débordant ne sont pas calculés. De même, l'occupation du sol non prise en compte dans l'approche « statique » qui joue un rôle important dans la propagation de la submersion (volume et vitesses), induit également une source possible de surestimation de l'emprise submergée (et des hauteurs d'eau). L'analyse des résultats de la présente étude témoignera de ces cas en plusieurs secteurs du Golfe d'Ajaccio (cf. paragraphe 8.4).

Enfin, la non prise en compte des éventuelles conjonctions avec des crues fluviales dans l'approche « statique » est susceptible d'induire une sous-estimation de l'emprise submergée (et des hauteurs d'eau). L'analyse des résultats de la présente étude témoignera de ce cas sur les zones d'embouchure de la Gravone et du Prunelli (cf. paragraphe 8.4).

L'approche de modélisation numérique mise en œuvre dans la présente étude a pour objectif de limiter des sources de sur et sous-estimation. Elle permet de prendre en compte la dynamique des phénomènes à l'origine des submersions (franchissement de paquets de mer, débordement, potentielle défaillance des structures de protection, conjonction avec les crues fluviales, etc.) et permet également d'en déterminer les caractéristiques puis de les cartographier (vitesses des écoulements, niveaux d'eau maximal, extension de la submersion, etc.).

5.3. PRISE EN COMPTE DE L'ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER

Conformément aux recommandations méthodologiques (guide méthodologique, MEDDE, mai 2014), le calcul du niveau marin au rivage prend en compte l'élévation du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique pour l'évènement naturel de référence dit « actuel » ainsi que pour un évènement naturel à échéance 100 ans dit « 2100 ».

Une marge de 20 cm est rajoutée au niveau d'eau (de l'évènement naturel centennal) au large pour l'évènement naturel de référence dit « actuel » dans cette étude.

Pour l'évènement naturel à échéance 100 ans dit « 2100 » dans cette étude, c'est une marge de 60 cm qui est ajoutée au niveau d'eau de l'évènement naturel centennal (dont 20 cm sont déjà ajoutés au niveau marin au large de l'évènement « actuel »).

Ces consignes s'appuient sur les prévisions du GIEC reprises par l'ONERC citées dans la Circulaire du 27 juillet 2011 et reprises dans le guide méthodologique (MEDDE, mai 2014).

En outre, il est également recommandé dans le guide méthodologique (MEDDE, mai 2014) de prendre en compte les incertitudes (sur les données et outils utilisés). Il est recommandé de rajouter une marge de 25 cm au niveau d'eau de l'évènement centennal si les incertitudes ne peuvent être estimées.

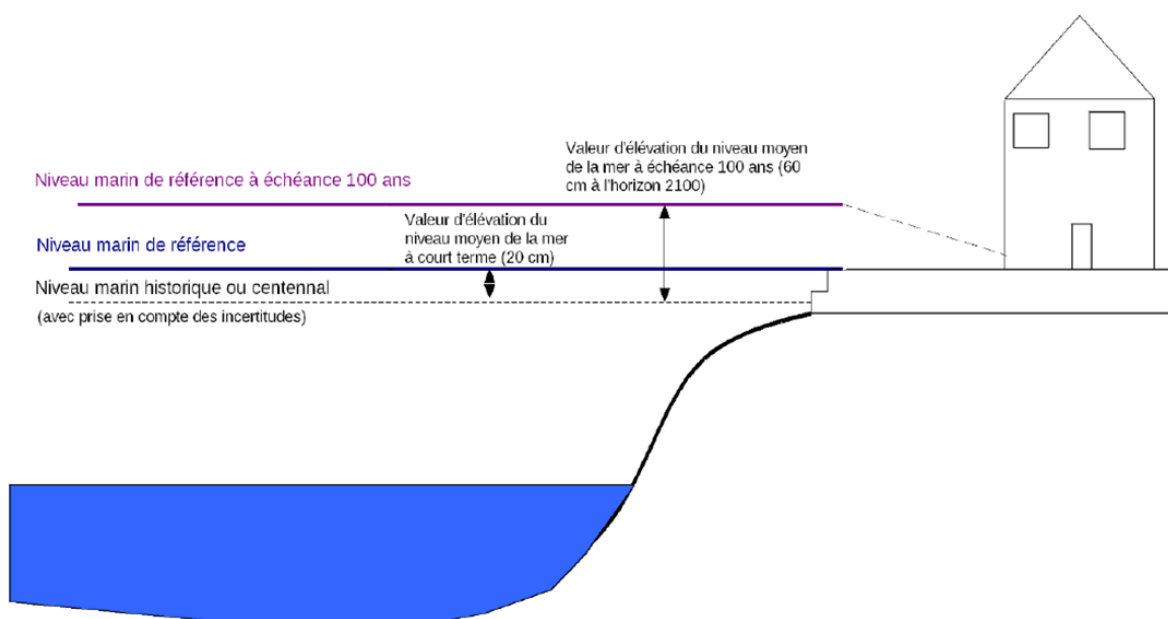


Figure 24 : Recommandations pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en lien avec le changement climatique (MEDDE, mai 2014).

5.4. PRISE EN COMPTE DES DEBITS FLUVIAUX

En compléments des scénarios trivariés des variables vagues, niveaux, vents et de leur covariables (direction des vagues, périodes et direction du vent), le débit fluvial Q est également pris en compte.

Cette variable n'étant pas associée à l'analyse statistique multivariée, il n'est pas possible de d'utiliser directement le débit fluvial de période de retour 100 ans. En effet, cette valeur serait trop majorante pour la modélisation de la submersion marine. Il convient donc de prendre un débit de période de retour inférieure mais compatible avec un événement (Hs, SWL, U) centennale.

Sur la base des débits retenus dans la note hydrologique de la révision des PPRi de la Gravona et du Prunelli réalisée par BRLi, et en concertation avec la DDT Corse-du-Sud, et la Communauté d'Agglomération du Pays Ajaccien (CAPA), le débit fluvial Q5 (période de retour 5 ans) est pris en compte.

Comme l'indique la Figure 25, les débits Q5 sont disponibles en amont de la confluence : Q5 à La Gravona = 280 m³/s ; Q5 au Prunelli = 240 m³/s. Et en aval de la confluence : Q5 = 510 m³/s.

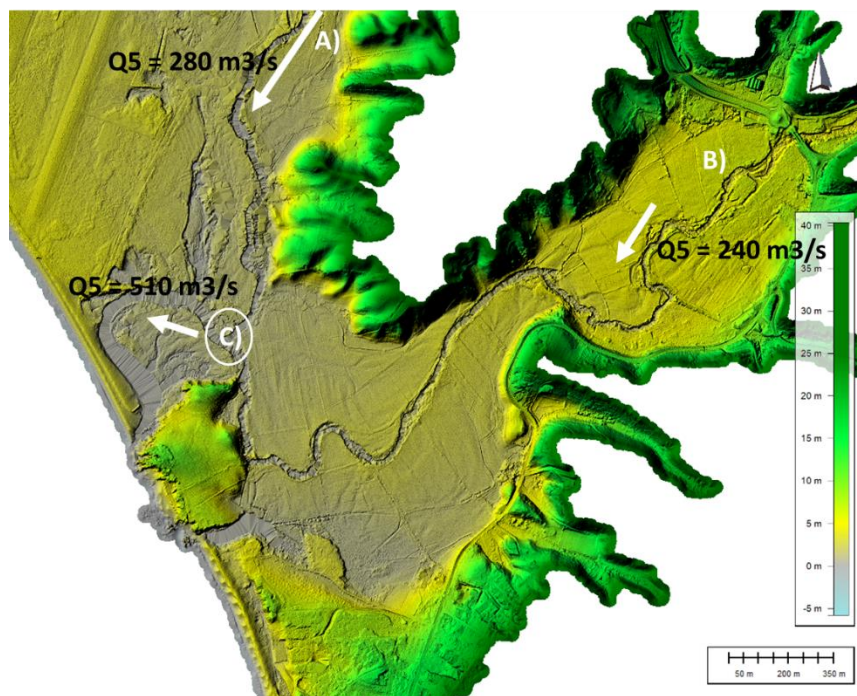


Figure 25 : Débits fluviaux en amont de la confluence : A) pour La Gravona ; B) Le Prunelli. Et en aval de la confluence : C). Les flèches indiquent le sens amont vers l'aval, la confluence est indiquée par le cercle en blanc.

5.5. CORDON LITTORAL ET SCENARIO DE RUINE GENERALISEE

Les flèches sableuses présentes au niveau des embouchures de certains cours d'eau présentent des évolutions (ouverture plus ou moins large et à différentes positions) pouvant contraindre l'écoulement de manière significative durant un événement de submersion. Il s'agit notamment, de l'estuaire de La Gravona et de l'embouchure de l'étang de Casavone. L'évolution de l'estuaire de la Gravona est présentée en Annexe 3.

Conformément aux recommandations du Guide PPRL (MEDDE, 2014), un scénario de ruine généralisée de ces flèches sableuses est pris en compte. La Figure 26 illustre l'exemple de l'estuaire de La Gravone pour lequel plusieurs scénarios sont envisagés (brèche ou ruine généralisé). Le scénario de ruine généralisée avec ouverture complète de l'embouchure est retenu. Une connexion par ruine généralisée du cordon sableux est également retenue pour l'embouchure de l'étang de Casavone, comme le montre la Figure 27.

Ruine généralisée

Profil avant/après arasement

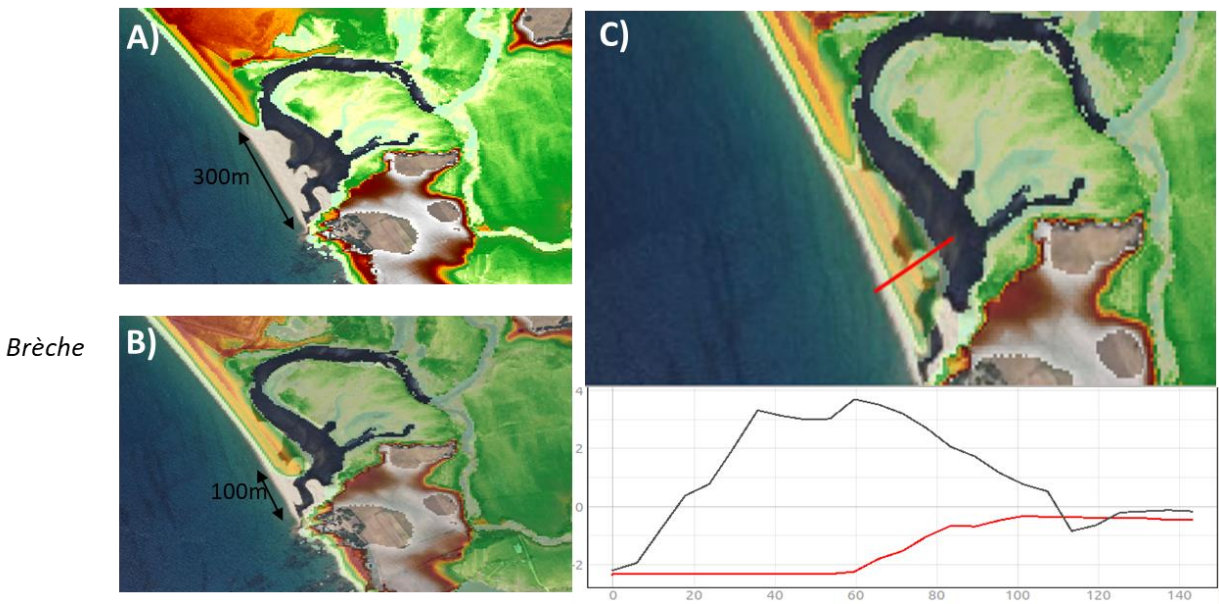


Figure 26 : MNT de l'estuaire de La Gravona – A) scénario de ruine généralisée par arasement total de la flèche sableuse ; B) scénario d'une brèche de 100m ; C) profil (trait rouge) du MNT avant (courbe noire) et après arasement (courbe rouge). Sens du profil : de la mer vers l'estuaire.

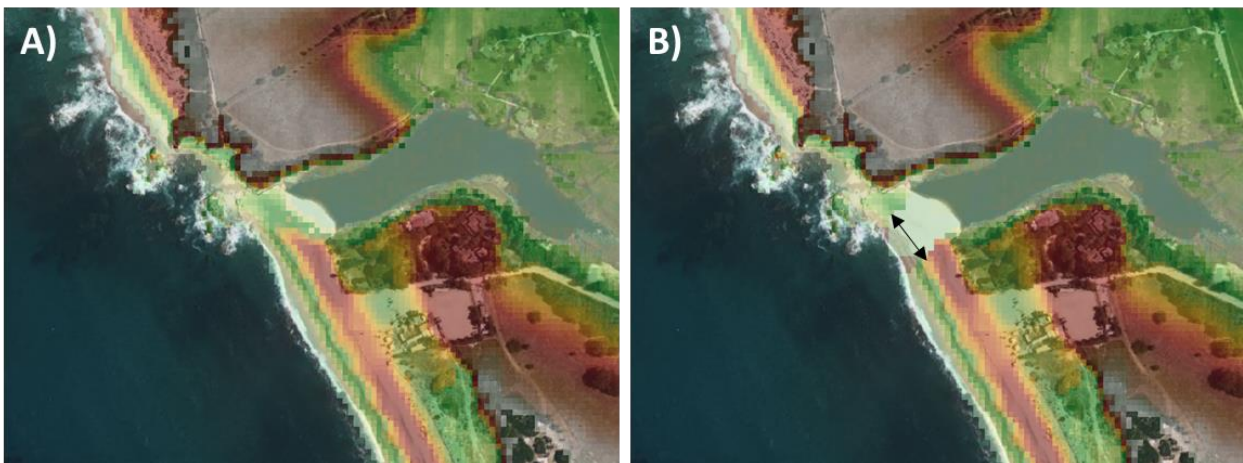


Figure 27 : MNT de l'embouchure de l'étang de Casavone – A) MNT sans connexion entre la mer et l'étang ; B) connexion entre l'étang et la mer par arasement du cordon sableux.

Un scénario de ruine généralisée est également pris en compte pour certaines structures côtières : digues de l'aéroport d'Ajaccio et muret longeant le boulevard Bonaparte (cf. paragraphe 6.6.2, Figure 32).

6. Stratégie de modélisation

6.1. PRINCIPE DE LA MODELISATION

Le littoral bordant le golfe d'Ajaccio est principalement exposé à des submersions marines par franchissements de paquets de mer tels que les événements historiques l'ont mis en évidence (ex. tempête Adrian 29/10/2018). Les submersions marines par débordement se produisent essentiellement par les embouchures des cours d'eau (Gravona et Prunelli, etc.). Dans ce contexte, une simulation la plus possible réaliste doit prendre en compte ces deux phénoménologies ainsi que les éventuelles concomitances avec les crues fluviales. Notre stratégie de modélisation repose donc sur le chaînage de 3 outils numériques : le modèle hydrodynamique UHAINA (Filippini et al. 2024) pour la simulation du niveau de l'eau, le modèle spectral WAVEWATCH3 (WW3) (Tolman 2009) et le modèle à résolution de phase SWASH (Zijlema et al. 2011) pour la propagation des vagues. La stratégie de modélisation repose sur une chaîne en trois étapes selon le schéma en Figure 28.

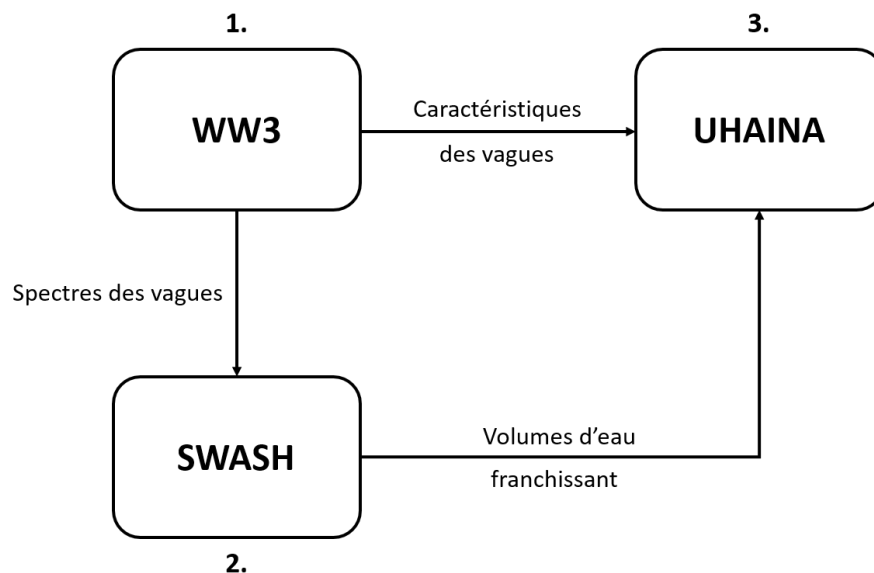


Figure 28 : Schéma de la stratégie de modélisation

- **1.** Propagation des vagues du large vers le rivage à l'aide du modèle WW3, forcé à partir des séries temporelles stationnaires des spectres des vagues, du niveau d'eau et du vent, issues des cas historiques ou bien des événements synthétiques (choisis à partir de l'analyse de probabilités conjointes centennale).
- **1.1** Construction des séries temporelles de niveaux d'eau à haute fréquence qui serviront à forcer les simulations sur profils 1D avec le modèle SWASH :
 - **1.1.1** : les caractéristiques des vagues (H_s , T_p , D_p) calculées par WW3 (pas de 30 minutes) sont extraites à l'extrémité de chacun des profils. Comme les directions de propagation des vagues (D_p) ont une incidence par rapport aux profils, une correction de la réfraction est appliquée de façon à diminuer celle-ci et obtenir des vagues dont

les D_p sont alignées avec les profils. Cela a pour effet de diminuer les hauteurs significatives des vagues (H_s)

- **1.1.2** : des spectres fréquentiels de vagues (de type Jonswap) sont ensuite calculés grâce aux H_s corrigés et aux T_p (période pic des vagues) à partir desquels des séries temporelles de vagues sont générées à une fréquence de 2 Hz. Ces opérations sont effectuées par pas de 30min pour toute la durée de l'évènement (peut atteindre plusieurs jours) grâce à la boîte à outils WAFO
- **1.1.3** : les séries temporelles de vagues sont additionnées aux niveaux d'eau ré-échantillonnés à 2 Hz pour obtenir une série temporelle de niveaux d'eau haute fréquence (combinant les effets des vagues, de la marée et des surcotes) sur l'ensemble de l'évènement considéré.
- **2.** Calcul des débits franchissants et de la submersion avec le modèle SWASH : les séries temporelles des niveaux haute fréquence sont injectées dans SWASH qui est configuré en mode non-hydrostatique capable de propager chacune des vagues, de tenir compte des interactions entre elles et de simuler la submersion (hauteur, vitesses, débits, ..).
- **3.** Calcul de la submersion avec le modèle UHAINA, en tenant compte de la formation du *wave-setup* et des courants induits par les vagues pour calculer le débordement. Dans les zones où les franchissements d'ouvrages peuvent entraîner l'inondation de zones basses, les volumes d'eau calculés par le modèle SWASH sont injectés dans la simulation UHAINA. Cette injection permet de propager l'inondation dans les zones concernées, offrant ainsi une représentation complète de l'évènement, incluant à la fois les débordements et les franchissements.

6.2. MODELE UHAINA

Ce modèle hydrodynamique est utilisé pour la propagation du niveau d'eau et pour la simulation de la submersion par débordement ainsi que de la propagation à terre des volumes d'eau franchis par paquets de mers issus du modèle SWASH. UHAINA (Filippini et al. 2024) est un code hydrodynamique de nouvelle génération développé conjointement par un consortium d'instituts français (dont l'INRIA, l'EPOC, l'IMB, l'IMAG et le BRGM). Il met en œuvre le système d'équations des eaux peu profondes et utilise des schémas numériques basés sur des éléments finis d'ordre arbitrairement élevé sur des maillages non-structurés. Grâce à un traitement spécifique du rivage, UHAINA garantit le respect des hauteurs topographiques lors des inondations et de bonnes propriétés numériques en termes de stabilité, de conservation de la masse et de préservation de l'état d'équilibre, même en présence de topographies et de bathymétries complexes.

Aux fins de ce travail, UHAINA tiendra compte :

- de la marée prévue, déterminée à partir de la base de données des composantes harmoniques FES2014 ;
- de la surcote atmosphérique générée par l'action du vent et de la pression atmosphérique sur la surface de l'eau ;
- de la surcote générée par le déferlement des vagues (*wave setup*) et les courants induits par les vagues, grâce à un chaînage avec le modèle spectral WW3 (Figure 28) ;
- des volumes d'eau franchissants, grâce à un chaînage avec le modèle Boussinesq SWASH (Figure 28) ;
- des caractéristiques topo-bathymétriques (digues, canaux, routes, etc.) qui déterminent l'écoulement sur terre, intégrées dans le maillage à l'aide de lignes de contrainte ;

- des débits fluviaux des rivières Gravona et Prunelli ;
- du coefficient de frottement variant dans l'espace pour représenter le fond marin et l'occupation du sol ;
- des connections hydrauliques (buses, déversoirs hydrauliques, écluses) et des ponceaux via des lois hydrauliques intégrées dans le modèle.

Les séries temporelles des niveaux d'eau (marée + surcote) des cas historiques ou bien des événements synthétiques (choisis à partir de l'analyse de probabilités conjointes centennale) sont appliqués de façon homogène sur la frontière marine du modèle. Le champ de vent instationnaire (intensité et direction) est appliqué de façon spatialement homogène sur l'ensemble du domaine de calcul. Les débits franchissant, calculés à partir des profils SWASH, sont injectés localement comme montré dans le paragraphe 6.9.

Le modèle fournit la carte de l'évolution du niveau d'eau, de la hauteur d'eau et des courants toutes les 10 minutes. De plus, il calcule le maximum de la hauteur d'eau et de la vitesse ainsi que l'aléa toutes les 5 minutes.

6.3. MODELE WAVEWATCH 3 (WW3)

Le modèle WW3 (Tolman 2009) résout l'équation de conservation de la densité d'action des vagues suivant des grilles de calculs structurées (différences finies) ou non structurées (éléments finis). Il est capable de reproduire les différents processus liés aux vagues depuis le large jusqu'au rivage comme la génération par le vent, la propagation dans l'espace (réfraction, interactions avec les courants, ...) et la dissipation (frottement au fond, déferlement, etc...).

La principale contrainte de ce modèle est de reproduire correctement les caractéristiques des vagues dans la zone de déferlement afin d'assurer le calcul correct du *setup* lié aux vagues (réalisé dans un deuxième temps dans UHAINA). Cela implique l'utilisation d'un maillage fin (résolution spatiale de 10 à 20 m) dans cette zone de déferlement. En raison de l'étendue des zones d'étude, il a été décidé d'utiliser WW3 avec un maillage non-structuré et, pour simplifier la tâche, les mêmes grilles numériques ont été utilisées pour WW3 et UHAINA, en veillant à satisfaire les besoins des deux modèles en termes de résolution. Ce choix a également rendu le chaînage WW3-UHAINA plus robuste et plus efficace en évitant l'interpolation spatiale des paramètres des vagues.

WW3 a été paramétré suivant la configuration décrite dans Ardhuin et al. (2010), le spectre des vagues étant discrétisé en 36 directions (pas de 10°) et en 32 fréquences (correspondant à des périodes de vagues allant de ~1,4 à ~27 secondes). Le frottement au fond et le déferlement des vagues ont été activés.

Le modèle utilise en entrée les données MARS_MED_BRGM (cf. paragraphe 4.1) et NWW3 MED (cf. paragraphe 4.2), il s'agit de :

- le niveau du plan d'eau (effets de la marée et de la surcote atmosphérique) instationnaire qui peut être homogène ou pas en fonction du secteur étudié ;
- les spectres directionnels de vagues : construits à partir des caractéristiques des vagues (hauteur significative, période, direction pic et étalement directionnel), avec la boîte à outil WAFO (Brodtkorb, 2000) ;
- l'intensité et la direction non-stationnaires du vent, appliqués de façon homogène sur l'ensemble du domaine de calcul.

WW3 est forcé à partir des séries temporelles instationnaires issues des événements synthétiques (choisis à partir de l'analyse de probabilités conjointes centennale). Les spectres directionnels des vagues et les niveaux d'eau (marée + surcote) sont appliqués de façon homogène sur sa frontièremarine. Le vent (intensité et direction) est appliqué de façon spatialement homogène sur l'ensemble du domaine de calcul.

WW3 fournit à UHAINA et SWASH des informations sur les données relatives aux vagues (Hs, Tp, Dp) toutes les 10 minutes.

6.4. MODELE SWASH

SWASH (Zijlema et al. 2011) est un code à résolution de phase adapté à la simulation de la submersion marine par débordement et franchissement des vagues dans des zones naturelles ou fortement urbanisées sur de petites surfaces (quelques km²), fournissant une description détaillée des écoulements côtiers. Le modèle prend en compte les phénomènes de réfraction, diffraction, réflexion, gonflement (*shoaling*), déferlement, interactions (vagues-vagues, vagues-courants), génération de courants induits par les vagues et traitement des berges et rivages.

Dans ce travail, nous utilisons SWASH pour simuler la propagation des vagues sur de courts transects perpendiculaires à la côte, afin de caractériser les inondations possibles par franchissement et, dans cette éventualité, de simuler le run-up des vagues et les volumes d'eau franchissant. Ces volumes peuvent, en suite, être pris en compte dans la simulation UHAINA, à l'étape finale (3) de la stratégie de modélisation (Figure 28). Il convient de noter que SWASH n'a pas été utilisé en mode 2DH car l'étendue du littoral à couvrir et la durée des simulations (1 à plusieurs jours) rendaient l'effort de calcul nécessaire tout simplement hors de portée.

SWASH utilise comme données d'entrée les conditions spectrales des vagues et du niveau de l'eau dérivées de la modélisation couplée niveau-courant-vague (étape (1) et étape (2)). Les profils 1D sur lesquels SWASH a été déployé ont une résolution spatiale de 1 m pour une propagation correcte des vagues et prennent en compte les données topo-bathymétriques et le frottement au fond.

6.5. DEFINITION DE L'EMPRISE DE CALCUL

L'emprise utilisée ici est présentée à la Figure 29. Elle couvre toute la baie d'Ajaccio et elle se compose d'une frontière marine (représentée par le trait bleu), une frontière terrestre (en rouge) et deux segments auxquelles les débits des rivières Gravona et Prunelli est imposé (en bleu clair). La frontière marine touche terre derrière la Pointe de la Parata au nord et au-delà de la Punta di Castagna au sud, afin que d'éventuels effets numériques de bord ne se propagent pas vers la zone d'étude dans la baie. L'île de Mezzu Mare est incluse dans le domaine de calcul pour récupérer dans les simulations son effet sur la propagation des vagues depuis le large. La frontière terrestre suit de près l'isoligne à 10m de la topographie. Dans zone de la plaine de l'aéroport, le domaine est borné par la route territoriale 40.

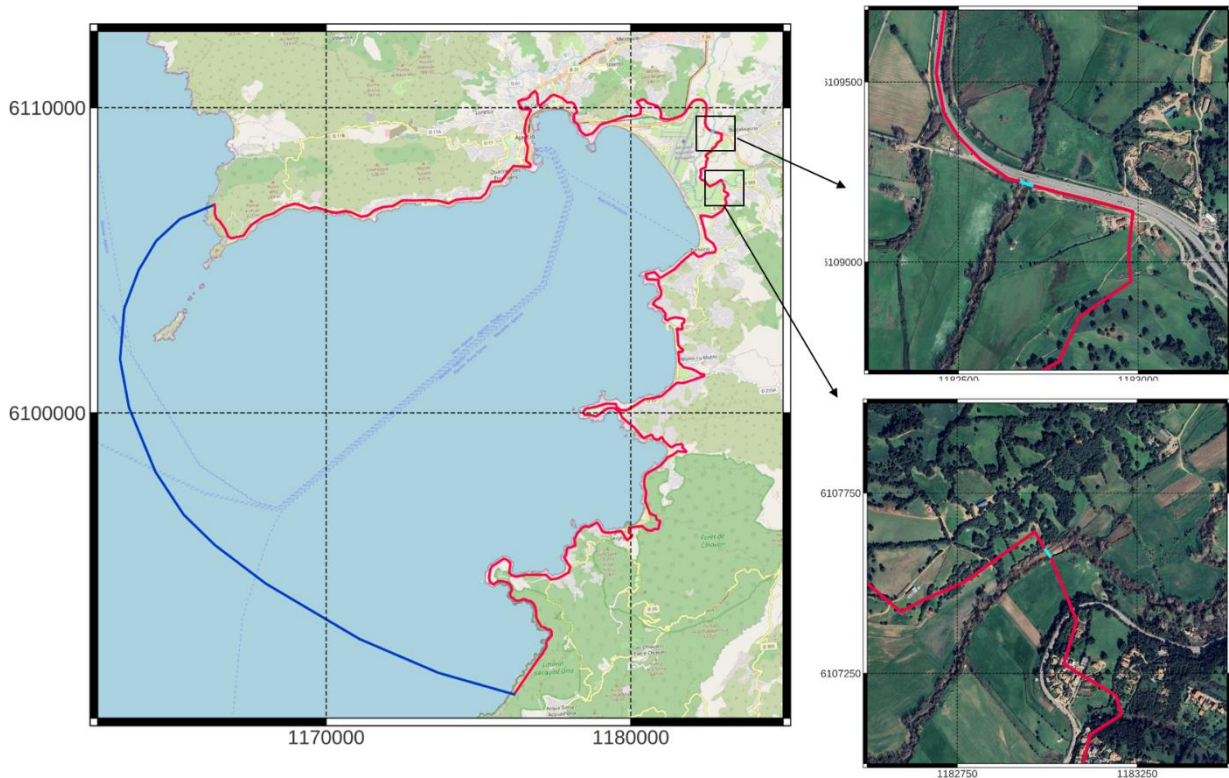


Figure 29 : Emprise spatiale de la grille de calcul utilisée. En bleu : la frontière ouverte marine. En rouge : la frontière terrestre. A droite, deux focus sur les rivières Gravona et Prunelli mettent en évidence la frontière (en bleu claire) sur laquelle le débit des rivières est imposé.

6.6. PRISE EN COMPTE DES STRUCTURES LOCALES

La simulation réaliste de la submersion côtière nécessite la prise en compte des infrastructures présentes dans les zones basses, tels que canaux, drains, digues et connexions hydrauliques (tuyaux et buses) et autres structures (naturelles ou artificielles) qui peuvent ralentir ou faciliter les flux d'eau ou qui permettent la propagation des inondations malgré les obstacles. Pour se faire, il faut d'abord identifier ces éléments sur le terrain et/ou sur le MNT produit à très haute résolution (1 m) et les intégrer numériquement au modèle.

6.6.1. Identification des éléments structurants de type cours d'eau et routes

Une sélection basée sur le critère d'altitude de crête a permis de repérer les éléments qui auront réellement une influence sur le comportement hydraulique de la submersion. La Figure 30 montre des routes et cours d'eau dont l'altitude de crête peut contraindre la propagation de la submersion. La BD Topo a été utilisée pour identifier ces éléments.

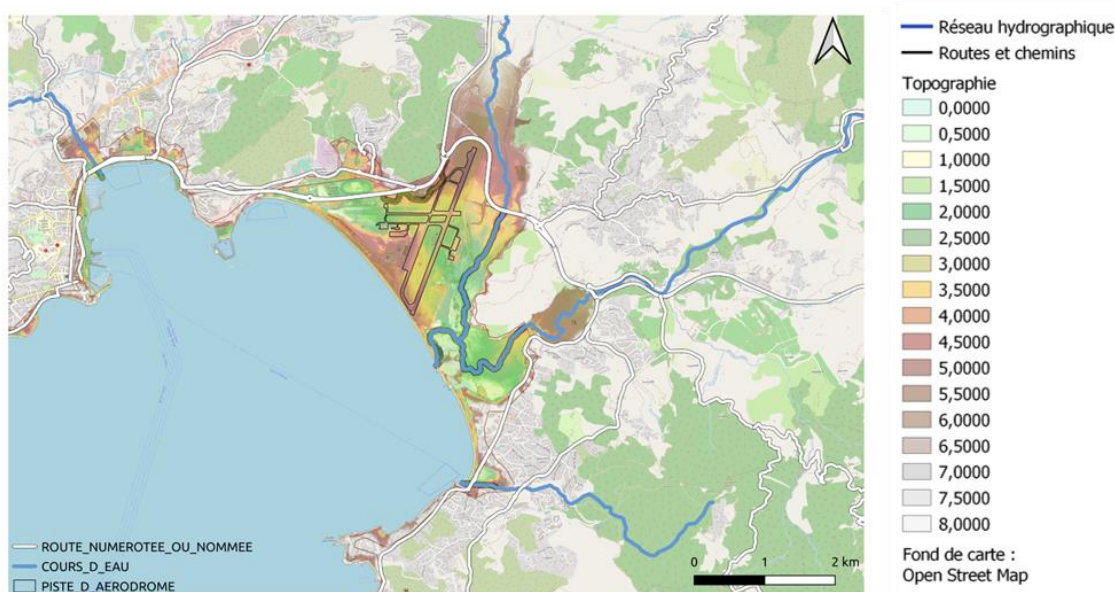


Figure 30: Eléments linéaires structurants identifiés sur la BD Topo. Zoom sur Ajaccio.

6.6.2. Ouvrages littoraux et autres éléments identifiés

Le guide du MEDDE (2014) définit un certain nombre de critères pour qu'un ouvrage puisse être considéré résistant à l'évènement de référence (conformité avec réglementation relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques, dimensionnement en fonction de l'aléa de référence, existence d'un Plan de Sauvegarde Communal tenant compte de l'ouvrage, dispositif de ressuyage des eaux, etc.). L'existence d'ouvrage pouvant être considérés résistants, a été recherchée selon ces critères et a fait l'objet d'une concertation avec la DDT de Corse-du-Sud.

De plus, la base ouvrages du Cerema¹⁴ (Figure 37) ainsi que des visites de terrain du BRGM ont été exploitées. La plupart des infrastructures côtières sur la zone d'étude épousent le terrain naturel ou ne peuvent être considérés dans les PPRL car il s'agit d'enrochement, de pieux, de clôtures, de bigbags, etc. (Figure 38). Il a donc été convenu qu'hormis les ouvrages portuaires structurant pouvant être considérés pérennes, aucun ouvrage ne présentait les données nécessaires pour évaluer les critères du guide du MEDDE (2014) nécessaires à leur prise en compte. C'est pourquoi, ils ont été considérés inexistantes.

De plus, les murets rehaussant les enrochements du quai des Torpilleurs à Ajaccio et un tronçon de la digue de l'aéroport ont été arasés (Figure 32).

En complément des routes primaires et secondaires, ainsi que les tronçons de cours d'eau, des ouvrages ont également été pris en compte. Ils proviennent de la base ouvrages du Cerema complétés par des observations de terrain (Figure 31).

¹⁴ <https://cerema.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=d5d4b0af642f47769bf463c40a7573a3>

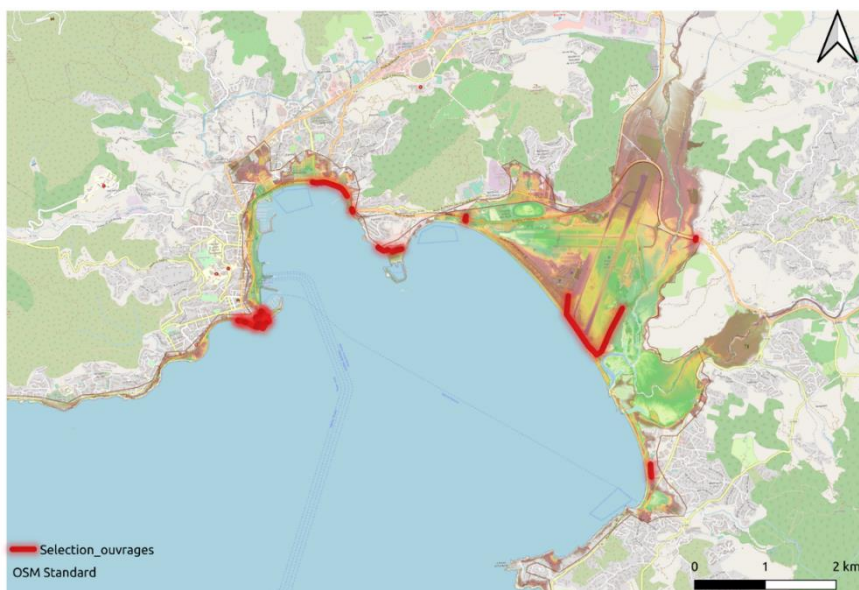


Figure 31 : Ouvrages sélectionnés dans la base ouvrages du Cerema. Zoom sur Ajaccio.

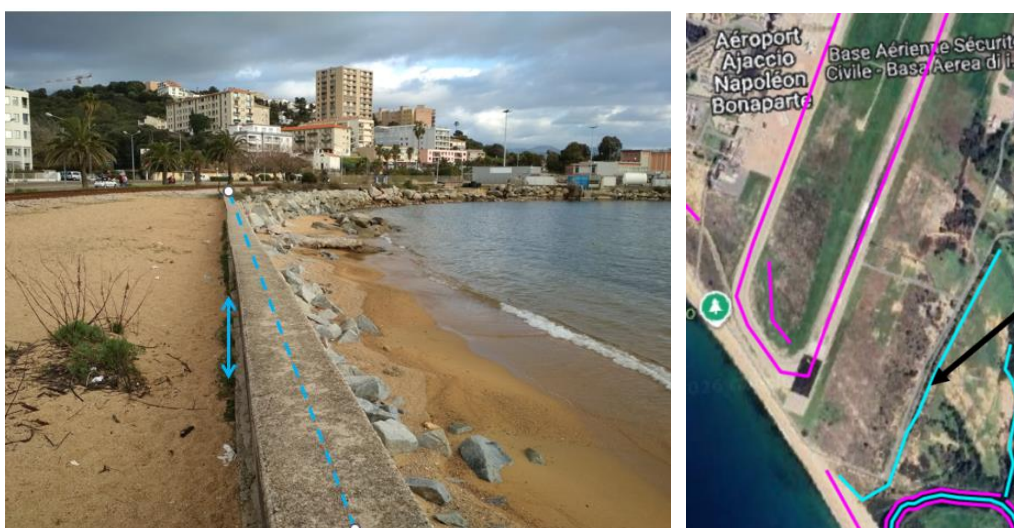


Figure 32 : Localisation des éléments topographiques arasés pour le scénario de ruine généralisée. A gauche : muret arasé du front de mer (flèche bleu), à droite : tronçon de digue de l'aéroport (flèche noire), commune d'Ajaccio.



Figure 33 : Panel de certains ouvrages ou défenses présents autour du Golfe d'Ajaccio.

6.6.3. Lignes de contraintes

L'intégration des éléments identifiés dans les sections précédents (6.6.2 et 6.6.3) à l'intérieur du modèle numérique repose sur l'emploi de maillages non structurés, dont la flexibilité permet l'insertion de lignes de contrainte lors de la discrétisation spatiale, assurant ainsi une représentation fidèle des caractéristiques hydrauliques locales. Ces lignes de contrainte permettent en effet de contraindre le positionnement des nœuds du maillage aux points hauts et bas du terrain, garantissant ainsi le respect des cotes topographiques des ouvrages et une représentation réaliste des écoulements dans les simulations numériques.

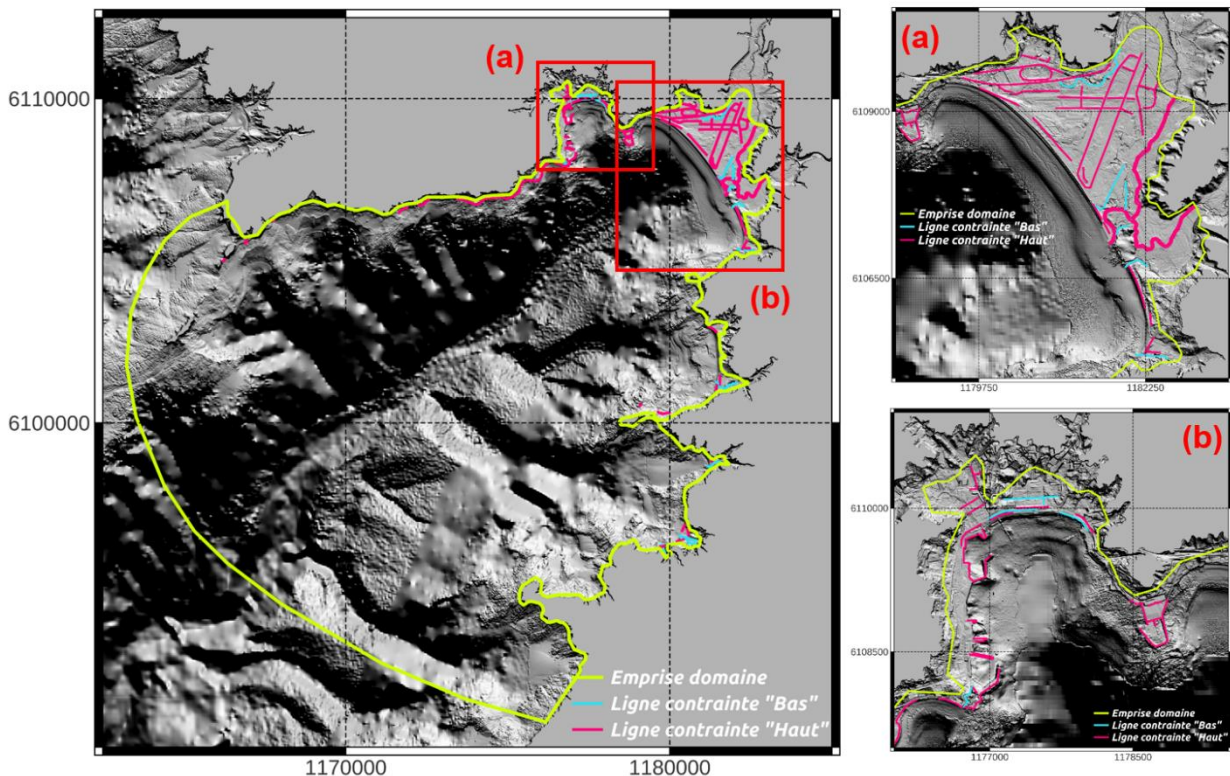


Figure 34 : Utilisation des lignes de contrainte : (a) secteur d'Ajaccio Est (Ricanto) ; (b) secteur du front de mer d'Ajaccio. MNT en arrière-plan.

6.6.4. Connexions hydrauliques

Les ouvrages hydrauliques qui permettent le drainage ou l'évacuation des eaux peuvent avoir un impact considérable sur le phénomène de submersion marine. Ils sont donc pris en compte pour la caractérisation de l'aléa. Il s'agit principalement dans le cadre de cette étude d'ouvrages de franchissement routiers tel que des ponts cadre ou des buses. Il convient de rappeler que les réseaux d'évacuation d'eaux pluviales dans les zones urbaines n'ont pas été considérés.

Les connexions hydrauliques sont intégrées à la modélisation comme des liaisons directes entre deux éléments du maillage (normalement situées aux extrémités de la connexion), entre lesquelles un débit est calculé à partir de leurs conditions hydrauliques (et des caractéristiques de l'ouvrage) et imposé (positif ou négatif). Cette solution présente l'avantage de prendre en compte des ouvrages hydrauliques de faible dimension sans nécessiter une réduction locale de la taille de maille du modèle. De plus il permet de prendre en compte un écoulement qui ne se fait pas à surface libre comme pour les buses par exemple. Il convient de noter que pour des connexions hydrauliques de larges dimensions, dans la mesure où la résolution du maillage le permet, une « ligne de contrainte faible » a été préférée pour éviter d'utiliser ces formules.



Figure 35 : Exemples de connexions hydrauliques.

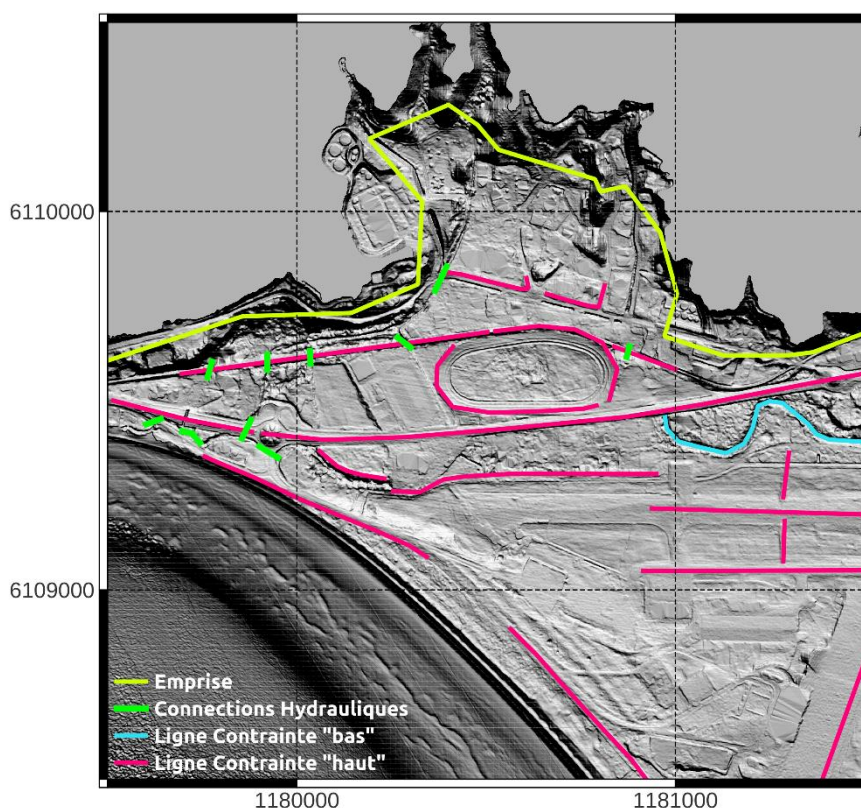


Figure 36 : Représentation des connections hydrauliques implantées dans le modèle dans la zone de Ricanto.

6.7. PRISE EN COMPTE DE L'OCCUPATION DU SOL ET DES FROTTEMENTS ASSOCIES

Le **frottement du fond (sol)** est une forme de résistance que le fond exerce sur l'écoulement de l'eau, en provoquant en général un ralentissement du flux, qui augmente avec la taille des aspérités du fond et leur consistance. Une représentation spatialisée de cet effet peut être construite à partir des données de l'occupation du sol du domaine d'étude. Pour ce travail, les données OCS-GE¹⁵ version 1.1 réalisés par l'IGN ont été utilisées, avec l'ajout des données hydrographiques de la BD Topo de l'IGN, permettant d'identifier plus précisément les surfaces en eau, plan d'eau et cours d'eau. Les typologies brutes OCS ont finalement été regroupées en typologies adaptées à la modélisation de la submersion pour obtenir le résultat visible en Figure 37.

Une valeur de rugosité est, donc, associée à chaque classe d'occupation identifiée en termes de coefficient de Strickler ou de Manning (Tableau 2). Les valeurs utilisées sont celles préconisées par différentes sources et sont applicables pour les études en domaines marins et côtiers (Bunya *et al.* 2010 ; Brown *et al.*, 2007, Goutx et Ladreyt 2001). Ils varient de $0.02 \text{ s/m}^{1/3}$ dans les zones à faible frottement (fond marin, rivières...) jusqu'à $0.16 \text{ s/m}^{1/3}$ pour les zones à fort frottement (forêts, zones arbustives denses...).

¹⁵ OCS-GE : <https://geoservices.ign.fr/ocsge>

Quand la résolution d'un modèle numérique ne suffit pas pour représenter l'habitat ou les structures qui occupent le sol, leur effet sur l'écoulement est aussi représenté via un paramètre de frottement caractéristique augmenté (Tissu urbain continu/discontinu, Zones industrielles etc... dans le Tableau 2).

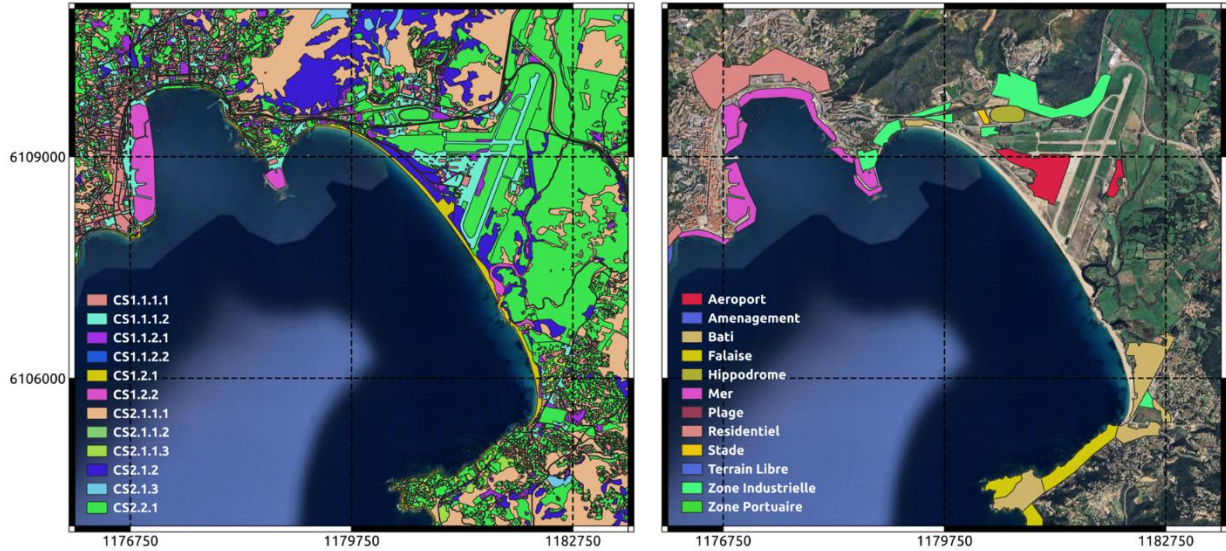


Figure 37 : A gauche - Données d'occupation du sol OCS-GE v1.1. ; A droite - regroupements et corrections manuelles.

VALUE	CODE_12	Définition	Manning
1	111	Tissu urbain continu	0.15
2	112	Tissu urbain discontinu	0.12
3	121	Zones industrielles et commerciales	0.05
4	122	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	0.03
5	123	Zones portuaires	0.12
6	124	Aéroports	0.03
7	131	Extraction de matériaux	0.1
8	132	Décharges	0.12
9	133	Chantiers	0.12
10	141	Espaces verts urbains	0.04
11	142	Equipements sportifs et de loisirs	0.07
12	211	Terres arables hors périmètres d'irrigation	0.06
13	212	Périmètres irrigués en permanence	0.06
14	213	Rizières	0.05
15	221	Vignobles	0.15
16	222	Vergers et petits fruits	0.15
17	223	Oliveraies	0.15
18	231	Prairies	0.033
19	241	Cultures annuelles associées aux cultures permanentes	0.06
20	242	Systèmes culturaux et parcellaires complexes	0.06
21	243	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des e	0.06
22	244	Territoires agro-forestiers	0.1
23	311	Forêts de feuillus	0.15
24	312	Forêts de conifères	0.15
25	313	Forêts mélangées	0.15
26	321	Pelouses et pâturages naturels	0.03
27	322	Landes et broussailles	0.1
28	323	Végétation sclérophylle	0.1
29	324	Forêt et végétation arbustive en mutation	0.16
30	331	Plages, dunes et sable	0.035
31	332	Roches nues	0.04
33	333	Végétation clairsemée	0.09
33	334	Zones incendiées	0.08
34	335	Glaciers et neiges éternelles	0.022
35	411	Marais intérieurs	0.045
36	412	Tourbières	0.05
37	421	Marais maritimes	0.05
38	422	Marais salants	0.035
39	423	Zones intertidales	0.05
40	511	Cours et voies d'eau	0.033
41	512	Plans d'eau	0.025
42	521	Lagunes littorales	0.033
43	522	Estuaires	0.025
44	523	Mers et océans	0.02

Tableau 2 : Correspondance entre les typologies d'occupation du sol et les coefficients de Manning.

6.8. MAILLAGE

Les codes UHAINA et WW3 décrits dans les paragraphes 6.2 et 6.3 s'appuient sur des maillages de calcul non structurés composés d'éléments triangulaires. Cette approche permet d'adopter une taille de maille variable, ajustée en fonction de la profondeur d'eau, plus fine sur les zones terrestres, sur les lignes de contraintes et autour des variations brutales de la topo-bathymétrie. Le maillage résultant est raffiné sur la zone de déferlement des vagues et sur les zones à enjeux (zones basses) pour augmenter la précision dans la description de l'écoulement, tandis qu'une résolution plus faible est utilisée au large pour réduire le temps de calcul des simulations. En

particulier la taille des mailles varie entre 400m, au large et dans les zones très profondes au milieu de la baie, et 12.5m à terre et sur les structures de défense côtières.

Le même maillage est utilisé pour les modèles UHAINA et WW3. Chacun des nœuds du maillage se voit affecté d'une altitude issue du MNT ainsi que d'une valeur de rugosité (définie paragraphe 6.7).

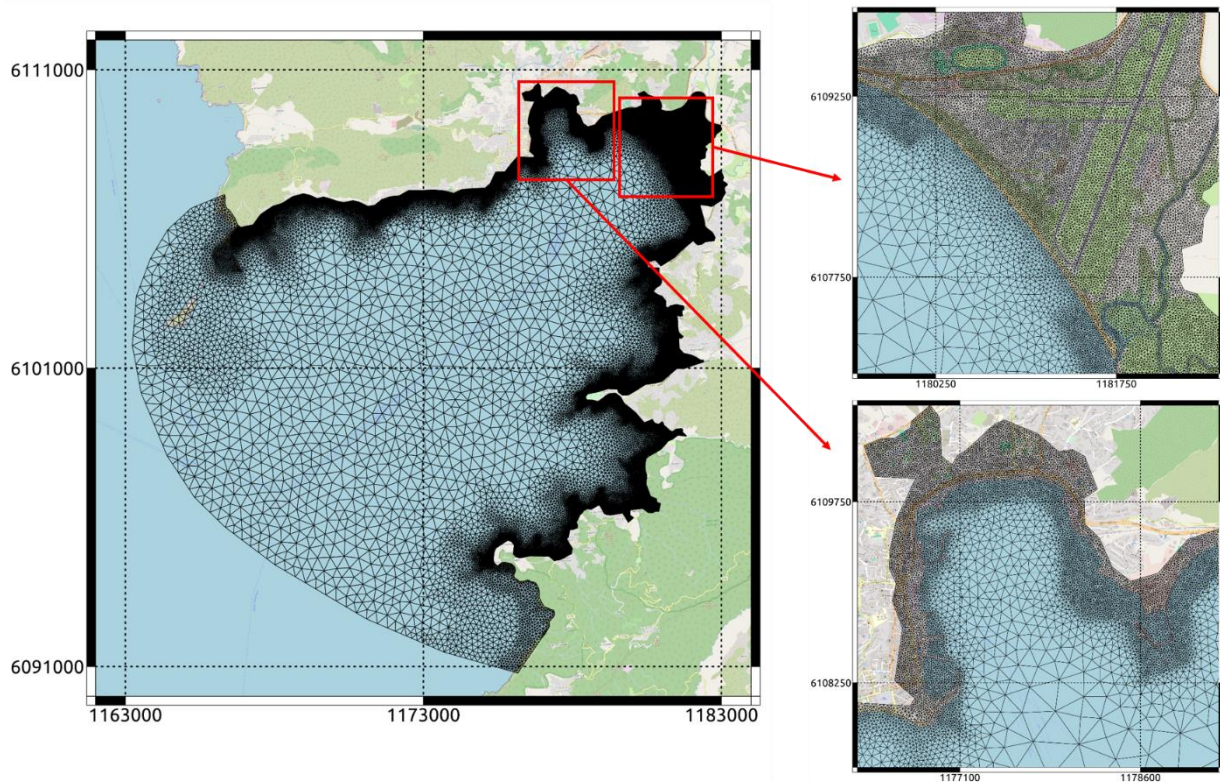


Figure 38 : Maillage de calcul avec zoom sur les secteurs du centre-ville d'Ajaccio et de l'aéroport.

6.9. POSITIONNEMENT DES PROFILS

Les franchissements par paquets de mer sont calculés avec le code SWASH selon des profils perpendiculaires au rivage. Leur distribution spatiale tient compte de la configuration de la côte : orientation et altitude du rivage, les caractéristiques de l'avant plage et du relief à terre. Ils ont une résolution spatiale de 1m et s'étendent généralement en mer jusqu'à une profondeur de ~30 m. Ainsi **118** profils ont été implantés dans la baie d'Ajaccio (voir Figure 39).

Deux types de profils sont à distinguer sur la figure :

- en jaune : à terre, les extrémités de ces profils se situent à proximité de dépressions topographiques qui peuvent être potentiellement atteintes par des franchissements de paquets de mer. Sur ces secteurs, le trait de côte a été segmenté de façon à associer à chaque profil un segment d'une longueur donnée. L'hypothèse est faite que les franchissements calculés au niveau du profil se répartissent de manière homogène sur la longueur du segment. Le débit total entrant dépendra donc de la longueur du segment (débit total=débit en mètre linéaire issu de SWASH x longueur en mètres du segment).

Un exemple de ce type de profil, où SWASH permet de calculer les franchissements qui seront injectés sur UHAINA est illustré en Figure 40 (droite);

- en bleu : ce sont des profils positionnés sur des secteurs dépourvus de dépressions, c'est à dire que l'altitude de l'arrière-plage ne cesse d'augmenter jusqu'à des valeurs importantes (>10 m). Il n'y a donc pas à proprement dire des franchissements de paquets de mer (il s'agit du runup). La submersion est ici calculée directement par SWASH (voir Figure 40 gauche). Il est à noter que c'est le cas pour l'ensemble des profils de la rive nord du golfe d'Ajaccio.

Les débits franchissant ainsi calculés (profils en jaune) sont ensuite injectés dans UHAINA au niveau de l'extrémité du profil à terre. Néanmoins lorsque le profil est représentatif d'un segment de longueur importante, plusieurs points d'injection sont définis pour le segment afin d'éviter la survenue de vitesses trop importantes et pas physiques en proximité du point d'injection.

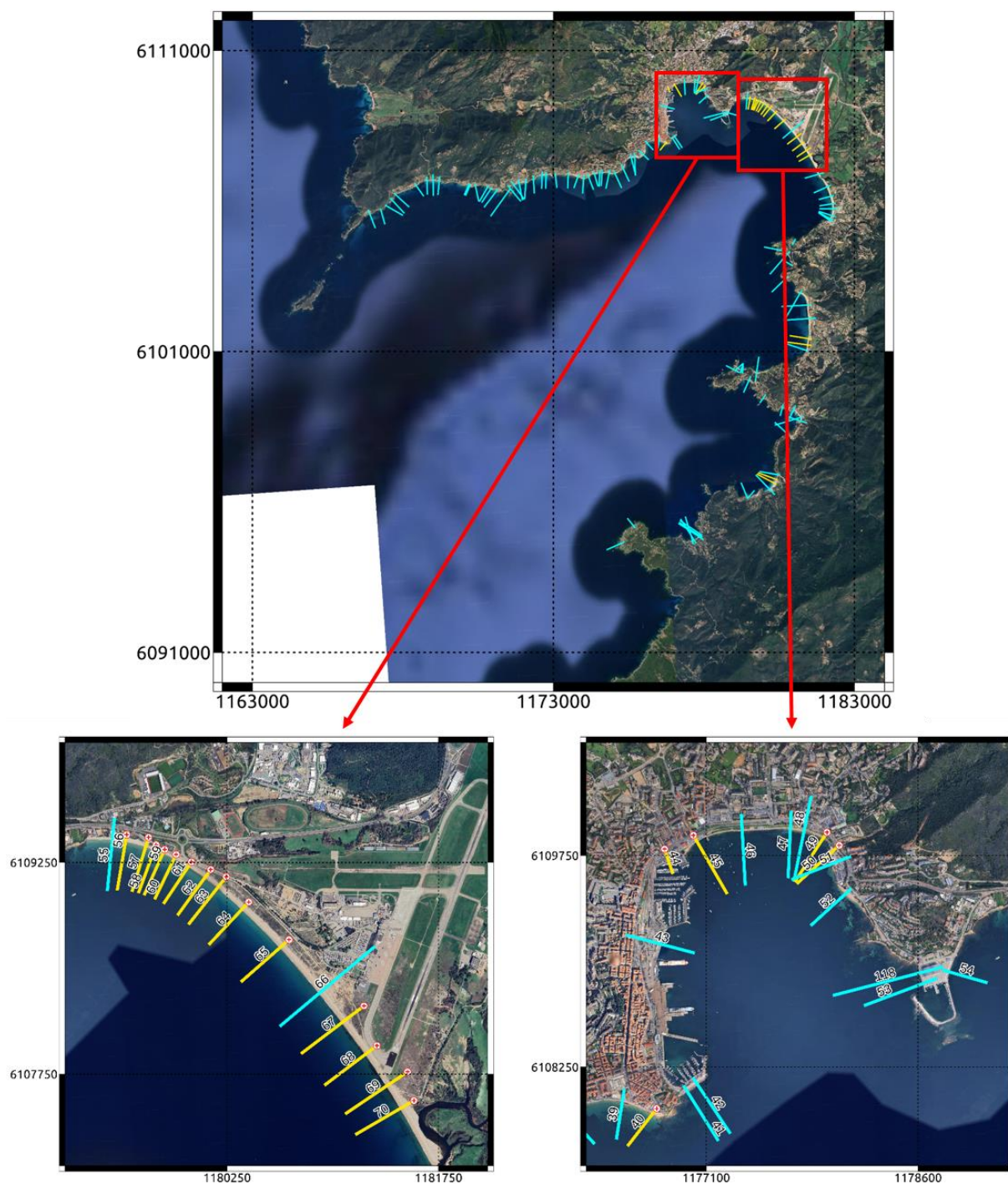


Figure 39 : Profils définis dans la baie d'Ajaccio. Les profils en **jaune** sont ceux dont les données de débit sont prises en compte dans le modèle 2D. Les profils en **bleu** sont ceux dont les débits ne sont pas injectés. Les croix représentent les points d'injection pour chaque profil.

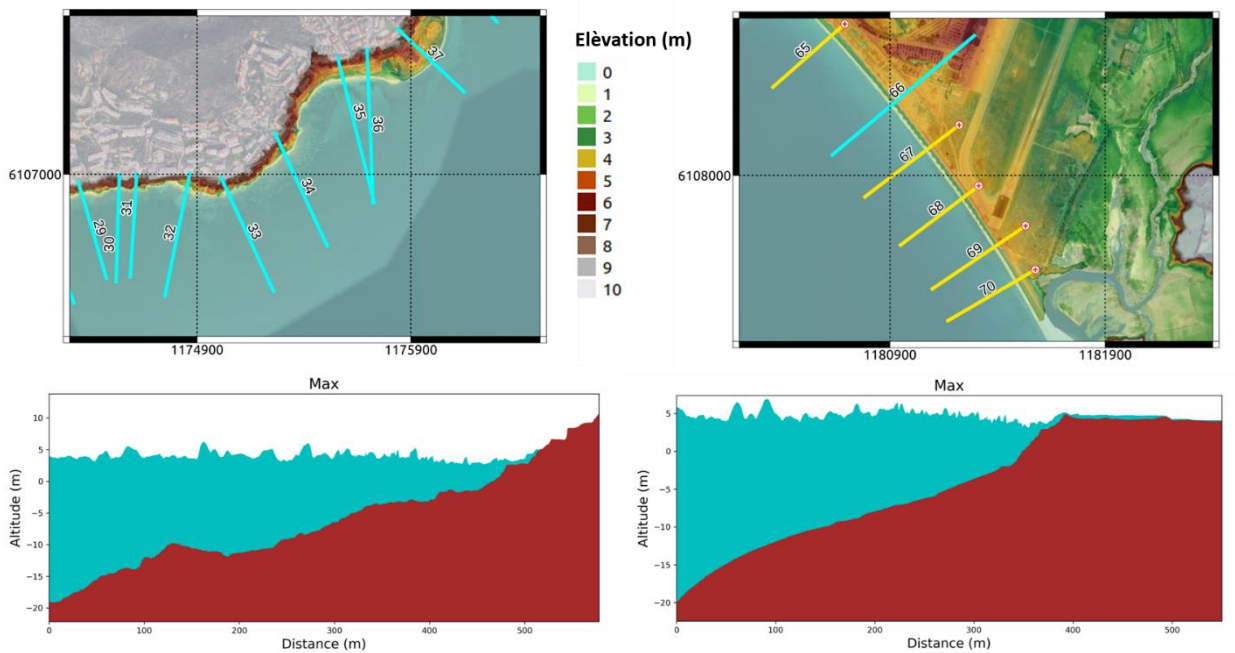


Figure 40 : Illustration des 2 types de profils : à gauche - calcul de la submersion directement avec SWASH ; à droite - segmentation du linéaire côtier, calcul des débits franchissant par SWASH pour une injection dans UHAINA.

7. Résultats des simulations

7.1. SIMULATION HISTORIQUE

Comme indiqué paragraphe 2.3.4, les seules observations disponibles en termes de submersion marine sur le territoire étudié concernent la tempête Adrian (29-30/10/2018). C’est pourquoi cet événement a été utilisé pour valider la chaîne de modélisation WW3/SWASH/UHAINA mise en place dans cette étude.

La configuration de la topo-bathymétrie utilisée pour la simulation diffère de celle décrite paragraphe 5.5 (dédiée aux événements de référence actuel et 2100) de façon à se rapprocher le plus possible de celle d’Adrian, à savoir que :

- les digues de l’aéroport d’Ajaccio et les murets qui longent le boulevard Bonaparte et la route de Ricanto ont été pris en compte ;
- les flèches sableuses de l’embouchure de la Gravona et de l’étang de la Casavone n’ont pas été arasées.

Les forçages utilisés pour la modélisation concernent :

- les débits des cours d’eau de la Gravona et du Prunelli ;
- les conditions de vagues au large du site issues du site MARC d’IFREMER (https://marc.ifremer.fr/resultats/vagues/modeles_mediterranee) ;
- le vent et la pression atmosphérique des observations de METEO-FRANCE du site de l’aéroport d’Ajaccio ;
- les niveaux d’eau au marégraphe d’Ajaccio Aspretto.

La Figure 41 représente la série temporelle des forçages météo-marins utilisés pour la modélisation de la submersion (période simulée allant du 29/10 12:00 au 30/10 15:00). On constate que lors de la tempête la hauteur significative des vagues (h_s), leur période pic (tp) et leur direction pic (dp_{nau}) ont atteint des valeurs de $\sim 5\text{m}$, 11s , et 250° . En ce qui concerne les niveaux d’eau (Xe_{NGF}), les vitesses (u_{10}) et les directions du vent, ces valeurs sont respectivement de $\sim 0.55\text{m}$, 20 m/s et 200° .

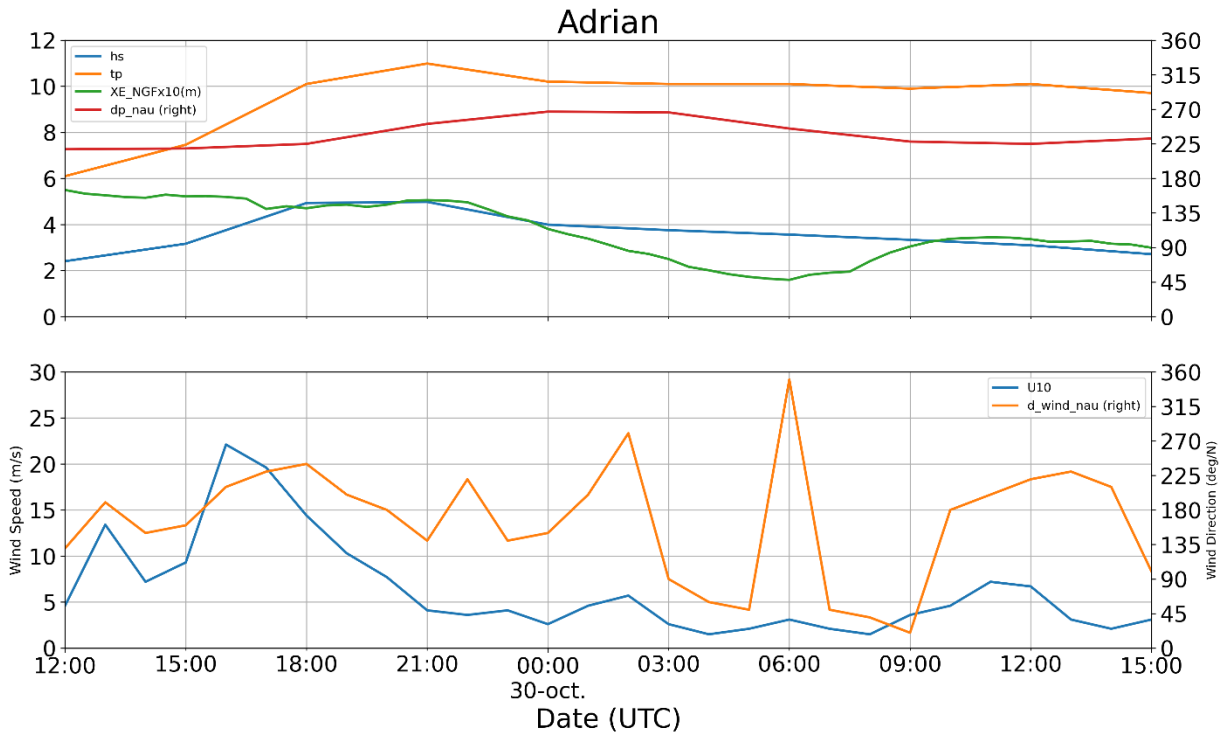


Figure 41 : Série temporelle des forçages météo-marins utilisés pour simuler la submersion générée par la tempête ADRIAN (L'axe des ordonnées à gauche permet de lire les variables hs, tp et XE en haut et U10 en bas, l'axe à droite représente les directions de la houle dp en haut et du vent en bas).

Comme le montre la Figure 42 (haut), les vagues simulées avec WW3 conservent leur caractéristiques initiales (notamment hs de l'ordre de 5 m, tp de 10 à 11 s) en se propageant dans le golfe d'Ajaccio. A cause de leur orientation, elles sont les plus impactantes au fond du golfe (linéaire côtier du secteur de l'aéroport) avec des valeurs maximales de hs de 3,7 m avant leur déferlement. Concernant les rives nord et sud du golfe, les vagues commencent à réfracter vers 15 m de profondeur pour s'orienter plus ou moins perpendiculairement à la côte avec des hs de ~2 m avant déferlement. Enfin, la zone portuaire d'Ajaccio est en partie protégée des vagues avec des hs maximaux proches de 1 m.

Les calculs de franchissement de paquets de mer simulés sur des profils avec SWASH (forcés par WW3 pour les vagues et Uchina pour les niveaux d'eau) représente bien les submersions constatées lors de la tempête Adrian sur la route des Sanguinaires (Figure 42 B) et sur le Quai des Torpilleurs (Figure 42 C) à Ajaccio, telles que présentées dans le paragraphe 2.3.4.

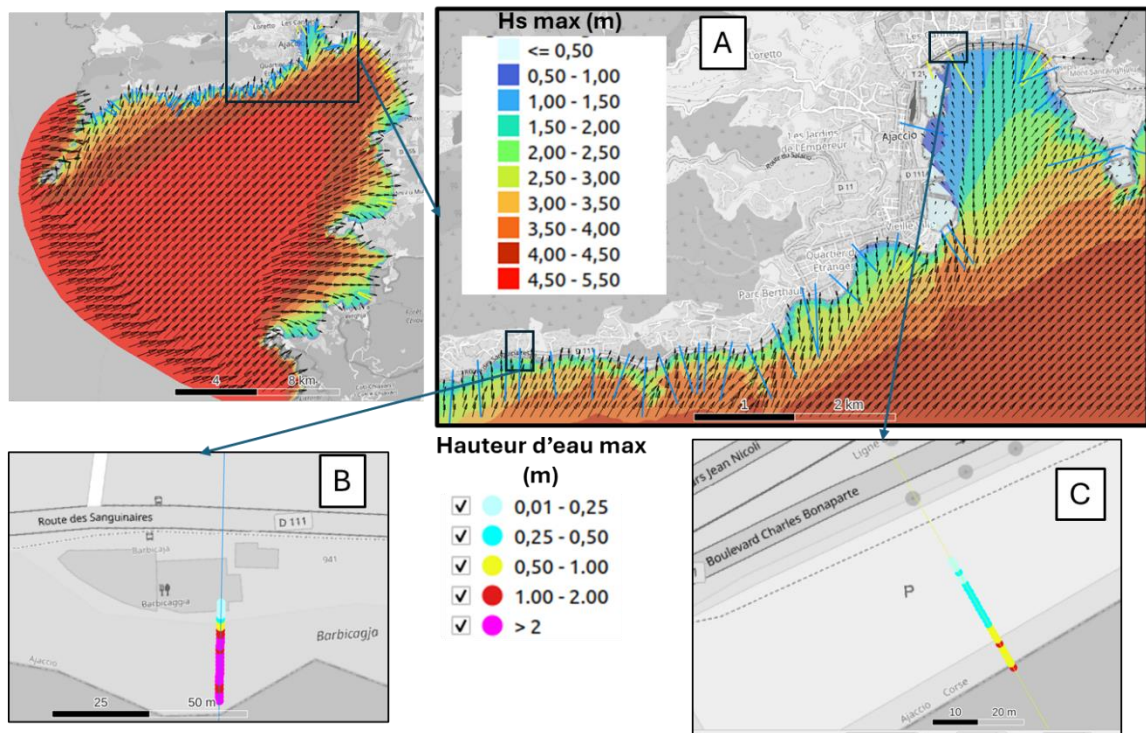


Figure 42 : Simulation des hauteurs significatives maximales des vagues et de leur direction de propagation (A) et des submersions par franchissement lors de la tempête Adrian sur la route des Sanguinaires (B) et sur le Quai des Torpilleurs à Ajaccio (C).

7.2. SIMULATION DES EVENEMENTS DE REFERENCE

Ce paragraphe présente le processus de sélection des scénarios de référence ainsi que des exemples de résultats des modélisations réalisées.

7.2.1. Sélection des scénarios les plus impactant par secteur

Les caractéristiques des événements de référence pour l'actuel et à l'horizon 2100 concernant la prise en compte de l'élévation du niveau la mer, la marge de sécurité de 25 cm (au titre des incertitudes), le débit des cours d'eau et le traitement des embouchures ont été abordées chapitre 5. Il reste maintenant à définir parmi les 5 scénarios présélectionnés (cf. paragraphe 5.1), lesquels sont les plus impactant en termes de volumes d'eau entrant par secteur étudié.

Scénario	hs(m)	tp(s)	dp(°)	Vitesse Vent (m/s)	Direction Vent(°)	Surcote(m)
8	8.62	13.5	240	21	270	0.2
17	8.52	11.44	240	20.75	270	0.25
22	8.2	11.28	240	19.16	270	0.3
27	7.48	11.05	240	18.54	270	0.35
34	6.92	11.04	240	10.49	270	0.4

Tableau 3 : Paramètres météo-marins des scénarios centennaux présélectionnés. En bleu : 3 scénarios favorisant les franchissements par paquets de mer (Hs les plus forts) ; en marron : 2 scénarios favorisant le débordement (surcote la plus importante).

Dans un premier temps, la chronologie de la tempête Adrian (Figure 57) a été normalisée et appliquée aux paramètres du Tableau 3 afin d'obtenir des séries temporelles des forçages météo-

marins pour les différents scénarios centennaux. Un exemple des forçages obtenus pour le scénario 8 avec les niveaux d'eau à horizon 2100 (Xe_NGF) est illustré Figure 43 (les directions des vagues et du vent sont constantes, respectivement de 240° et de 270°).

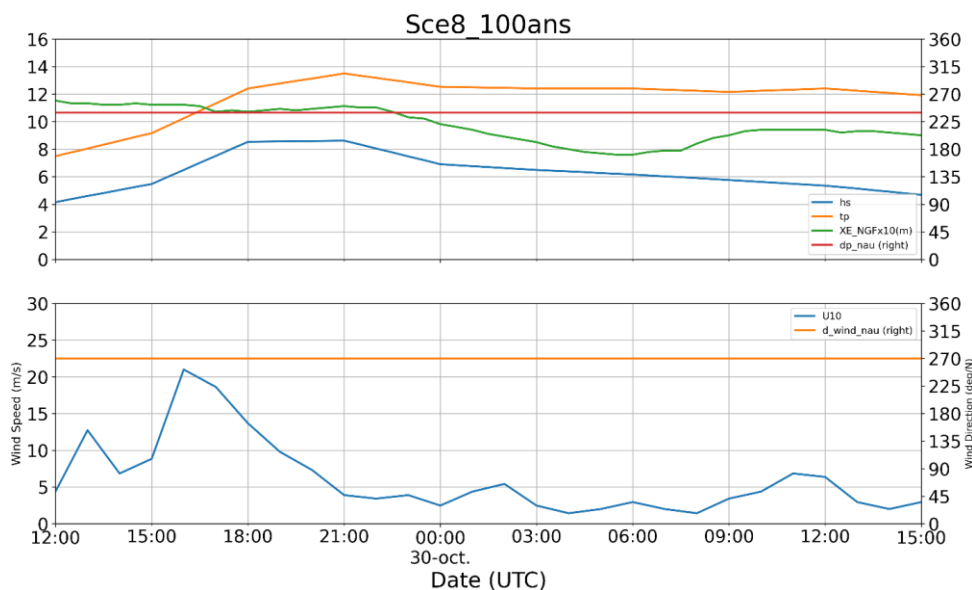


Figure 43 : Exemple de série temporelle des forçages météo-marins centennaux obtenus pour le scénario 8.

Par la suite, les séries temporelles ainsi obtenues ont été utilisées pour simuler les 5 scénarios sur le secteur étudié avec le chaînage des codes WW3 et SWASH afin de calculer des volumes entrant (débordement et/ou franchissement). Les résultats de ces simulations indiquent que les scénarios les plus impactants sont les 8 et 17 en fonction du secteur considéré.

Ce sont donc ces 2 scénarios qui ont été simulés dans la suite de l'étude avec le chaînage des codes WW3/SWASH/UHAINA afin de déterminer l'aléa submersion marine sur le golfe d'Ajaccio.

7.2.2. Exemples de résultats de simulation

Ci-après sont présentés des résultats des simulations correspondant au secteur de l'aéroport d'Ajaccio et son littoral adjacent car ce domaine est soumis aussi bien aux franchissements de paquets de mer (route de Ricanto) qu'au débordement (embouchure de la Gravona).

Ces résultats concernent la combinaison des scénarios de référence 8 et 17 pour l'actuel et à horizon 2100 (Figure 44, Figure 45 et Figure 46). Il s'agit des niveaux d'eau maximaux (NGF), des hauteurs d'eau maximales, des vitesses des écoulements maximales, des vitesses de montée des eaux (uniquement pour le scénario 17) et des aléas.

Entre le début de la route du Ricanto et l'aéroport, la submersion marine est contrôlée par les franchissements de paquets de mer pour les deux horizons temporels. L'inondation peut atteindre des zones dont les altitudes sont proches des 5 m/NGF. La promenade se retrouve localement avec plus de 1 m d'eau avec des vitesses des écoulements dépassant 1.5 m/s.

Dans les secteurs de l'embouchure de la Gravona et de l'étang de la Casavone, la submersion se fait par débordement en empruntant les cours d'eau. Les niveaux d'eau maximaux atteignent ici 3 m/NGF, avec des hauteurs proches de 1 m (en dehors des cours d'eau) et des vitesses des écoulements maximales dépassant 0.5 m/s.

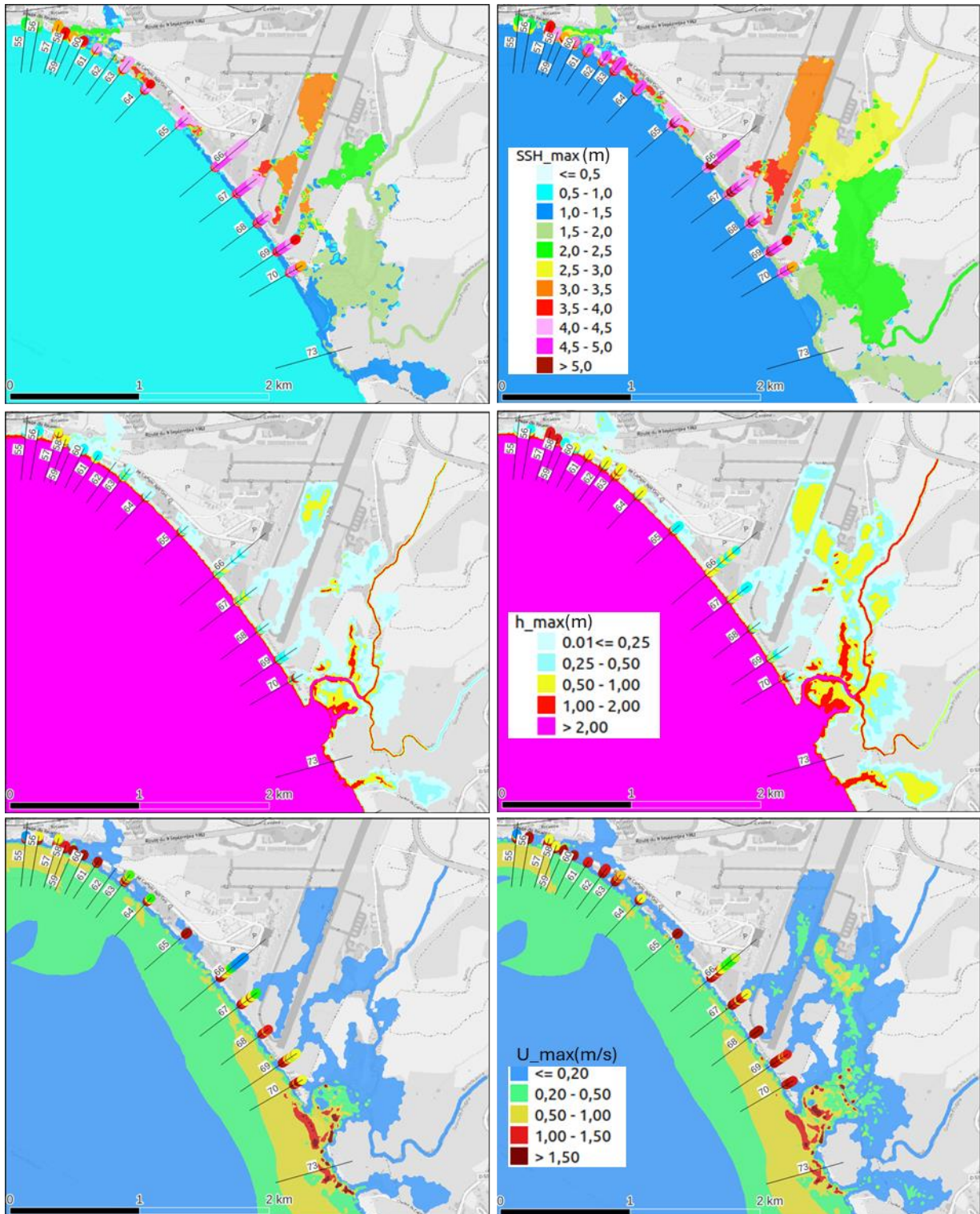


Figure 44 : Zoom sur le secteur de l'aéroport d'Ajaccio et des plages adjacentes. Résultats issus de la combinaison des scénarios 8 et 17 évènements pour « l'actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Niveau maximal du plan d'eau (SSH_max m/NGF, en haut), Hauteur d'eau maximale (h_{max} , au milieu) et Vitesse d'écoulement maximale (U_{max} , en bas).

Les vitesses de montée des eaux ont été calculées en post-traitement pour les secteurs dont la hauteur maximale d'eau dépasse les 0,05 m et selon les recommandations du guide PPRi (2024).

Elle est définie comme la vitesse moyenne avec laquelle la hauteur d'eau croît entre le début de la submersion et une hauteur de 0,5 m (représentant une hauteur dangereuse). Conformément aux indications du guide PPRi, le seuil pour passer d'une vitesse de montée des eaux lente à une vitesse de montée des eaux rapide a été estimé à 0,30 m/h.

On constate que la vitesse de montée des eaux est lente aussi bien sur les secteurs à franchissement qu'à débordement (Figure 45).

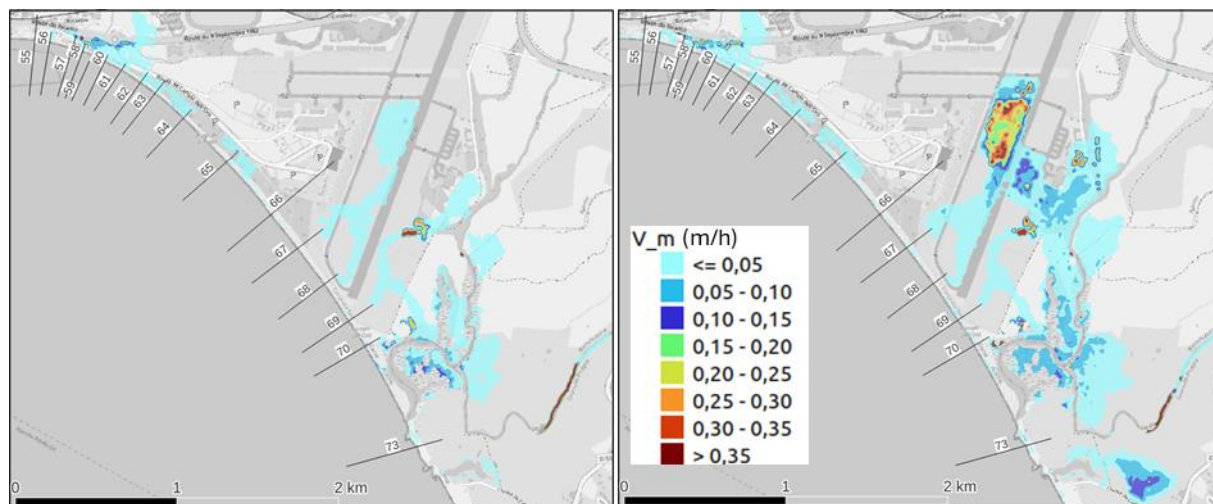


Figure 45 : Zoom sur le secteur de l'aéroport d'Ajaccio et des plages adjacentes pour le scénario 17 évènements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Vitesse de montée des eaux (V_m).

La cartographie de l'aléa correspond au croisement de la dynamique de la submersion et des hauteurs d'eau. Cette dynamique résulte de la combinaison de la vitesse d'écoulement de l'eau et de la vitesse de montée des eaux qui est qualifiée en 3 classes comme indiqué Tableau 4.

		Vitesse de montée des eaux (v_m)	
		Faible (montée lente) (par exemple $v_m < 0,3 \text{ m/h}^*$)	Élevée (montée rapide) (par exemple $v_m > 0,3 \text{ m/h}^*$)
Vitesse d'écoulement (v_e)	Faible (écoulement lent) (par exemple $0 < v_e < 0,2 \text{ m/s}$)	Dynamique lente	Dynamique moyenne ou rapide ¹⁴⁷
	Moyenne (par exemple $0,2 \text{ m/s} < v_e < 0,5 \text{ m/s}$)	Dynamique moyenne	Dynamique rapide
	Élevée (écoulement rapide) (par exemple $0,5 \text{ m/s} < v_e$)	Dynamique rapide	Dynamique rapide

* valeur à adapter aux circonstances locales.

Tableau 4 : Types de dynamique en fonction des d'écoulement et des vitesses de montée des eaux d'après le guide PPRi (2024).

Comme la vitesse de montée des eaux calculée est lente sur la grande majorité de la zone étudiée, la matrice de qualification de la dynamique peut être simplifiée pour la définir uniquement en fonction des vitesses d'écoulement.

Cela permet de qualifier l'aléa submersion marine selon la matrice présentée Tableau 5 (voir ci-après) qui a été directement intégrée dans la chaîne de calcul. La Figure 46 : Cartes d'aléa issue de la combinaison des scénarios 8 et 14 pour les évènements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite), zoom sur le secteur de l'aéroport d'Ajaccio et des plages adjacentes. illustre les sorties

brutes des modèles montrant des aléas majoritairement fort à très fort pour le front de mer soumis aux franchissements de paquets de mer et faible à fort pour les zones dominées par le débordement (hors embouchures).

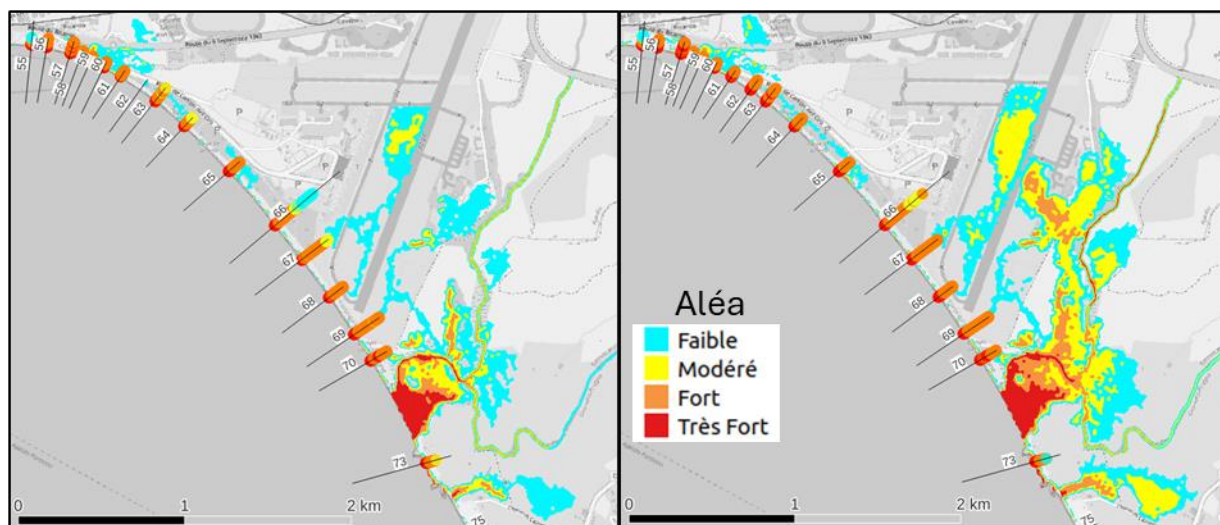


Figure 46 : Cartes d'aléa issue de la combinaison des scénarios 8 et 14 pour les évènements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite), zoom sur le secteur de l'aéroport d'Ajaccio et des plages adjacentes.

8. Restitution cartographique

8.1. QUALIFICATION DE L'ALEA

Pour les inondations par submersion marine, les hauteurs d'eau et la vitesse d'écoulement représentent le couple de critères pris en compte pour déterminer les niveaux d'aléas, d'après le guide du MEDDE (2014). Les résultats sont présentés sous forme de cartes de hauteur d'eau maximale, de vitesse maximale et d'aléa.

L'aléa est défini par le croisement des hauteurs et des vitesses instantanées à chaque pas de temps. L'aléa submersion marine s'exprime par la surface de la zone concernée et par « la gradation dans la manifestation du phénomène » (MEDDE, 2014). Cette gradation est liée à la capacité d'un adulte à se mouvoir lors du phénomène en cours qui dépend de la hauteur d'eau et de la vitesse de l'écoulement induites par la submersion (Figure 47 : Possibilité de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (MEDD, 2004).

La modélisation numérique mise en œuvre fournit les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement en tout point du domaine de calcul et à chaque instant de la propagation de la submersion. La gradation de l'aléa résulte du croisement instantané de ces résultats selon les classes présentées dans le Tableau 5 : Qualification de l'aléa de submersion marine en fonction des classes de hauteur d'eau (H) et des courants à terre (V).

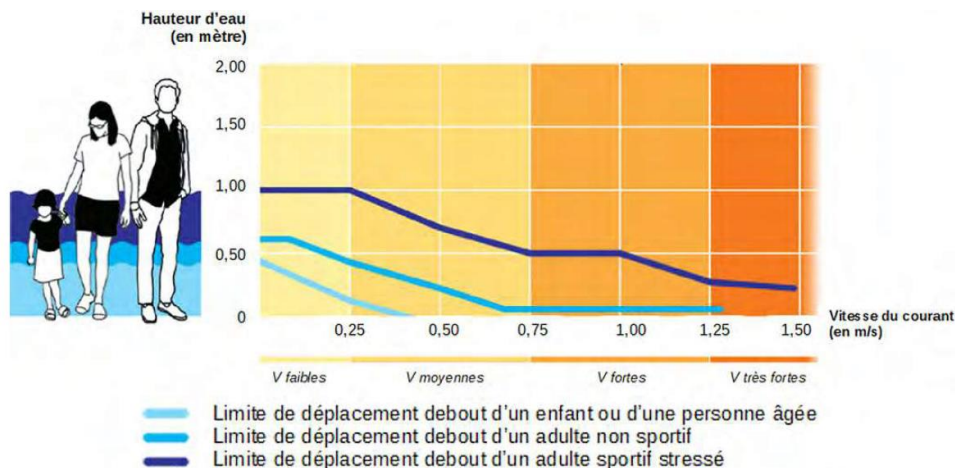


Figure 47 : Possibilité de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (MEDD, 2004).

		Vitesse des courants (m/s)		
		$V \leq 0,2$	$0,2 < V \leq 0,5$	$V \geq 0,5$
Hauteur d'eau (m)	$H \leq 0,2$	Faible	Modéré	Modéré
	$0,2 < H \leq 0,5$	Faible	Modéré	Fort
	$0,5 < H \leq 1$	Modéré	Modéré	Fort
	$1 < H \leq 2$	Fort	Fort	Très Fort
	$H > 2$	Très Fort	Très Fort	Très Fort

Tableau 5 : Qualification de l'aléa de submersion marine en fonction des classes de hauteur d'eau (H) et des courants à terre (V).

8.2. METHODE DE FUSION DES RESULTATS D'UHAINA ET DE SWASH

La cartographie des phénomènes de débordement et de franchissement de paquets de mer a requis la fusion des résultats de modélisation numérique des profils SWASH et d'UHAINA pour chaque paramètre (hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement et aléas). Le post-traitement des résultats de modélisation numérique suit les étapes suivantes :

1. Création des polygones de classes, à partir des résultats des profils SWASH (franchissements au format shape) ;
2. Fusion des polygones avec les grilles de résultats d'UHAINA (carte débordement au format mesh) ;
3. Rastérisation des grilles obtenues puis vectorisation.

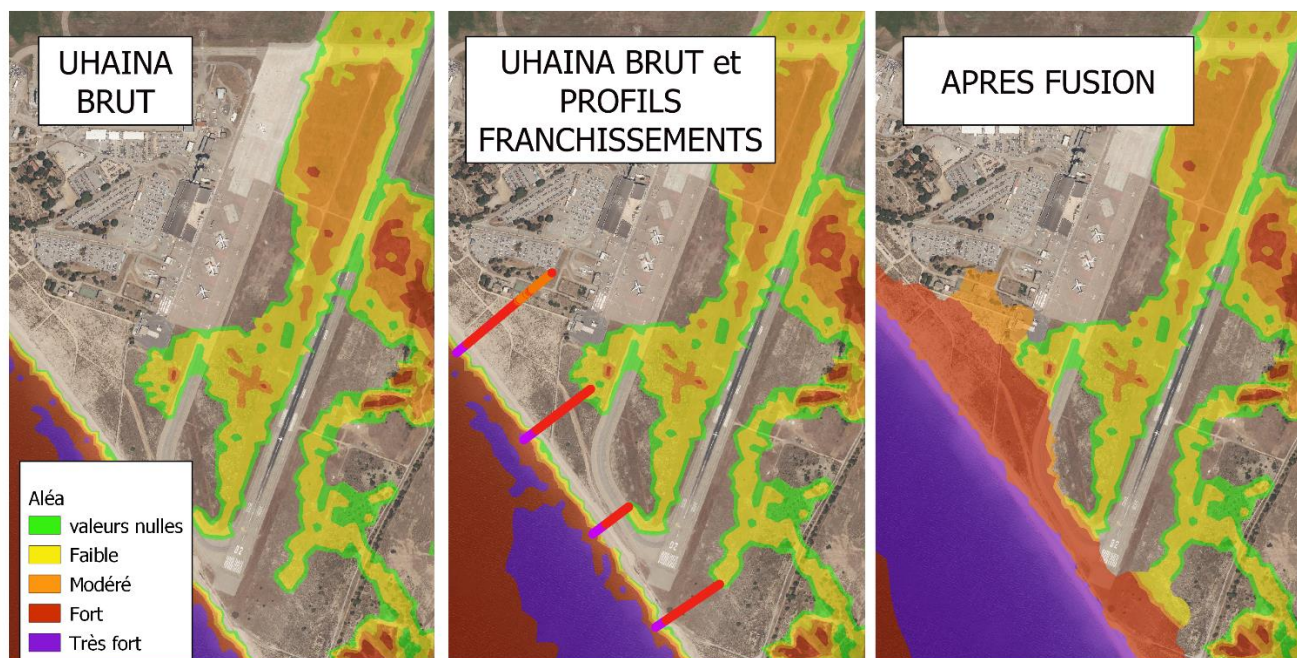


Figure 48 : Exemple de résultats (à droite) après fusion des sorties du modèle UHAINA (à gauche) et des profils du modèle SWASH (au centre), secteur de l'aéroport d'Ajaccio.

8.3. POST-TRAITEMENT GEOMATIQUE

Pour faciliter l'utilisation des résultats de manière cohérente avec l'échelle de restitution au 1/5 000^{ème}, le post-traitement sous QGIS a consisté à supprimer ou fusionner les petits polygones (surface < 50 m²) avec le polygone adjacent (Figure 49).

Les contours ont également été lissés et la limite côté mer découpée avec le trait de côte HISTOLITT® (TCH) du SHOM et de l'IGN.

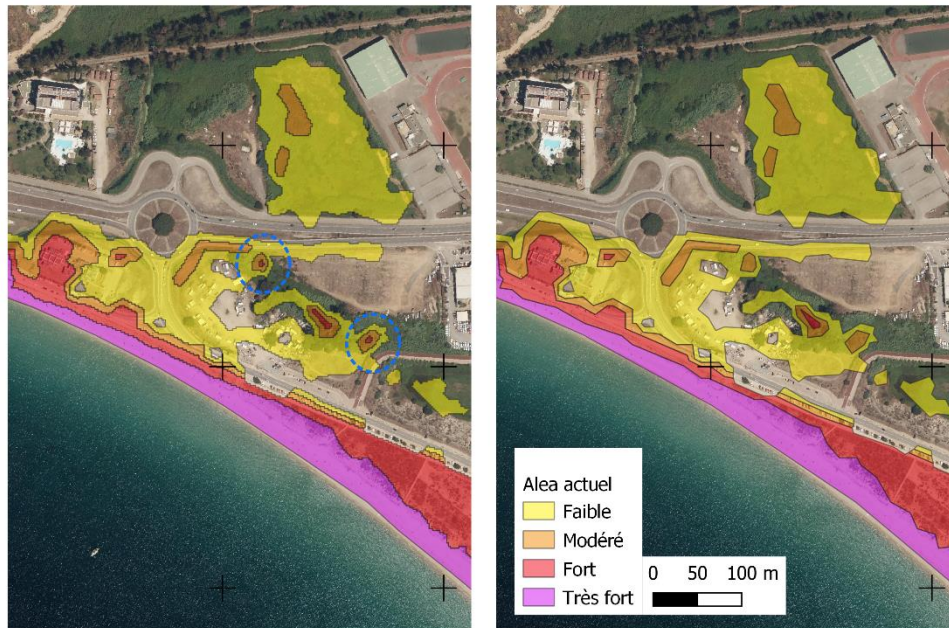


Figure 49 : Exemple (pointillés bleus) de petits polygones fusionnés avec les polygones adjacents, avant lissage à gauche, après lissage à droite.

8.4. PLUVALUE PAR RAPPORT A L'APPROCHE « STATIQUE »

Comme cela était attendu, la modélisation numérique mise en œuvre dans la présente étude a permis d'affiner les résultats de l'approche « statique » et de réduire et sur et sous-estimations de la cartographie des ZBPESM (rapport BRGM/RP-69915-FR, 2021, cf. paragraphe 5.2).

8.4.1. Amélioration des sous-estimations

Au niveau de l'embouchure de la Gravone et du Prunelli (Ajaccio et Bastelicaccia), la prise en compte des conjonctions avec des crues en injectant les débits fluviaux, a permis d'améliorer la sous-estimation de l'emprise de la submersion. De même, la prise en compte des franchissements de paquets de mer a permis d'identifier l'exposition de la route des Sanguinaires aux phénomènes de submersion marine que l'approche « statique » n'illustre pas. Enfin, l'exemple de la Figure 50 pour l'évènement 2100, illustre l'importante sous-estimation de l'approche « statique » sans prise en compte de la dynamique des écoulements et des connexions hydrauliques.

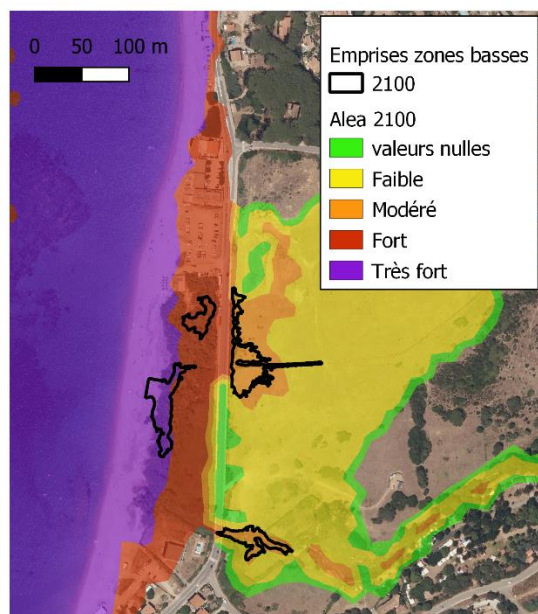


Figure 50 : Comparaison entre l'aléa 2100 calculé dans la présente étude (en couleur) et l'emprise des ZBPESM cartographiée dans l'approche « statique » (en noir) sur la plage d'Agosta (commune d'Albitreccia).

D'autre part, l'approche « dynamique » a permis de préciser l'emprise de la submersion marine par franchissement de paquets de mer notamment au niveau du front de mer d'Ajaccio (Figure 51) ainsi que de Porticcio (commune Grosseto-Prugna) et de la plage de Ruppione (commune de Pietrosella) par exemple. Selon les secteurs, la bande de sécurité¹⁶ de 50 m appliquée sur la cartographie des ZBPESM de l'approche « statique » telle que recommandée dans le guide du MEDDE de 2014, présentent des sous ou des sur-estimation de l'emprise (Figure 51, rapport BRGM/RP-69376-FR, 2020).

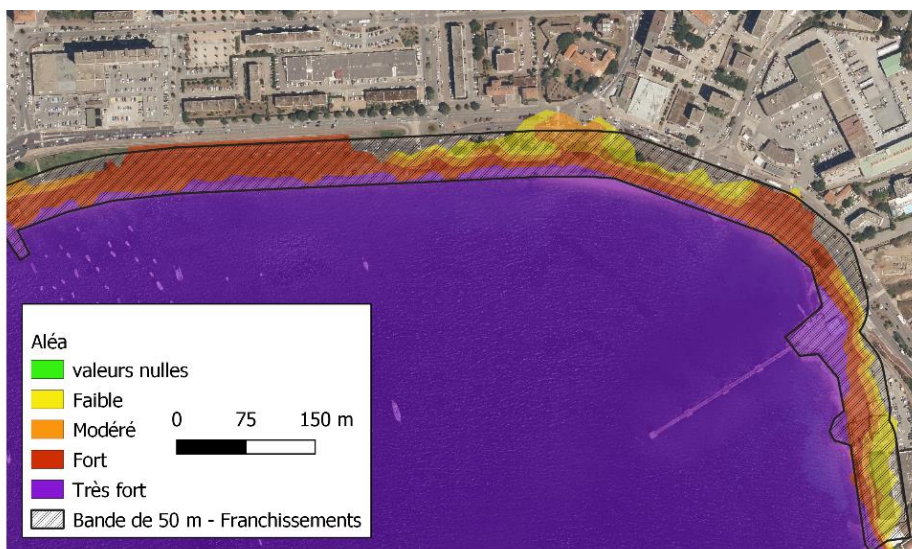


Figure 51 : Comparaison entre l'aléa « 2100 » caractérisé par l'approche « dynamique » et la bande de sécurité liée aux franchissements appliquée par l'approche « statique ».

¹⁶ La bande de sécurité avait été appliquée à partir du pied de dune qui représentait la limite côté mer de la submersion. Pour rappel, dans la présente étude, la limite côté mer correspond au trait de côte Histolitt.

8.4.2. Amélioration des sur-estimations

Pour la cartographie des ZBPESM par l'approche « statique », il avait été considéré que la zone basse en arrière de la route RD 55 à Porticcio (commune de Grosseto-Prugna) pouvait être inondée par franchissements de paquets de mer et/ou par les connexions hydrauliques. Cependant, l'approche « dynamique » a permis de vérifier que la route RD 55 n'était pas franchissable par paquets de mer et que de ce fait, la zone basse en arrière n'était pas inondable par submersion marine.

Dans le golfe d'Ajaccio, seul ce secteur présente une sur-estimation significative de l'approche « statique » par rapport à l'approche « dynamique » (Figure 52).

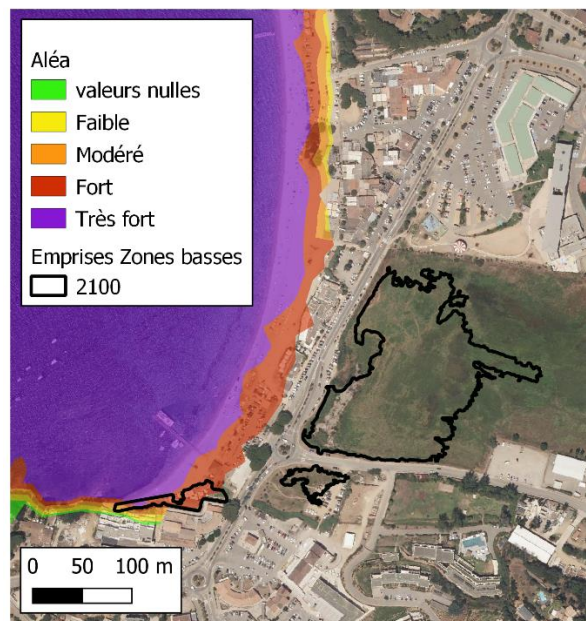


Figure 52 : Exemple de surestimation de l'emprise de la submersion marine pour l'évènement 2100 avec en noir, la limite de l'emprise des ZBPESM de l'approche « statique » et en couleur l'emprise de l'aléa 2100, sur la commune de Grosseto-Prugna (plage de Porticcio).

8.5. BANDE DE SECURITE LIEE AUX CHOCS MECANIQUES ET PROJECTIONS

Le guide PPRL du MEDDE (2014) recommande la prise en compte des aléas chocs mécaniques des vagues et projection qui sont des aléas distincts mais associés à l'aléa submersion marine par franchissement de paquets de mer. Une bande de sécurité doit être appliquée : « la largeur de la zone soumise au déferlement peut être considérée par défaut comme égale à 25 m ».

Afin de tenir compte de la configuration topographique abrupte au niveau de la côte rocheuse, la largeur de cette bande de sécurité de 25 m sera réduite lorsque l'altitude dépasse 8 m/NGF. Plusieurs secteurs sont concernés par cette réduction de la bande de sécurité : sur la rive nord-ouest (route des Sanguinaires, entre le cimetière et la plage de Barbicaghja sur la commune d'Ajaccio), sur la rive sud-est du golfe (entre la Punta di Vescu et la plage d'Agosta sur la commune de Grosseto-Prugna, ou bien entre la plage de Ruppione et le terrain de foot sur la commune de Pietrosella par exemple, Figure 53) ainsi qu'une portion de la route du Lazaret à Ajaccio à l'ouest de la base navale d'Aspretto,

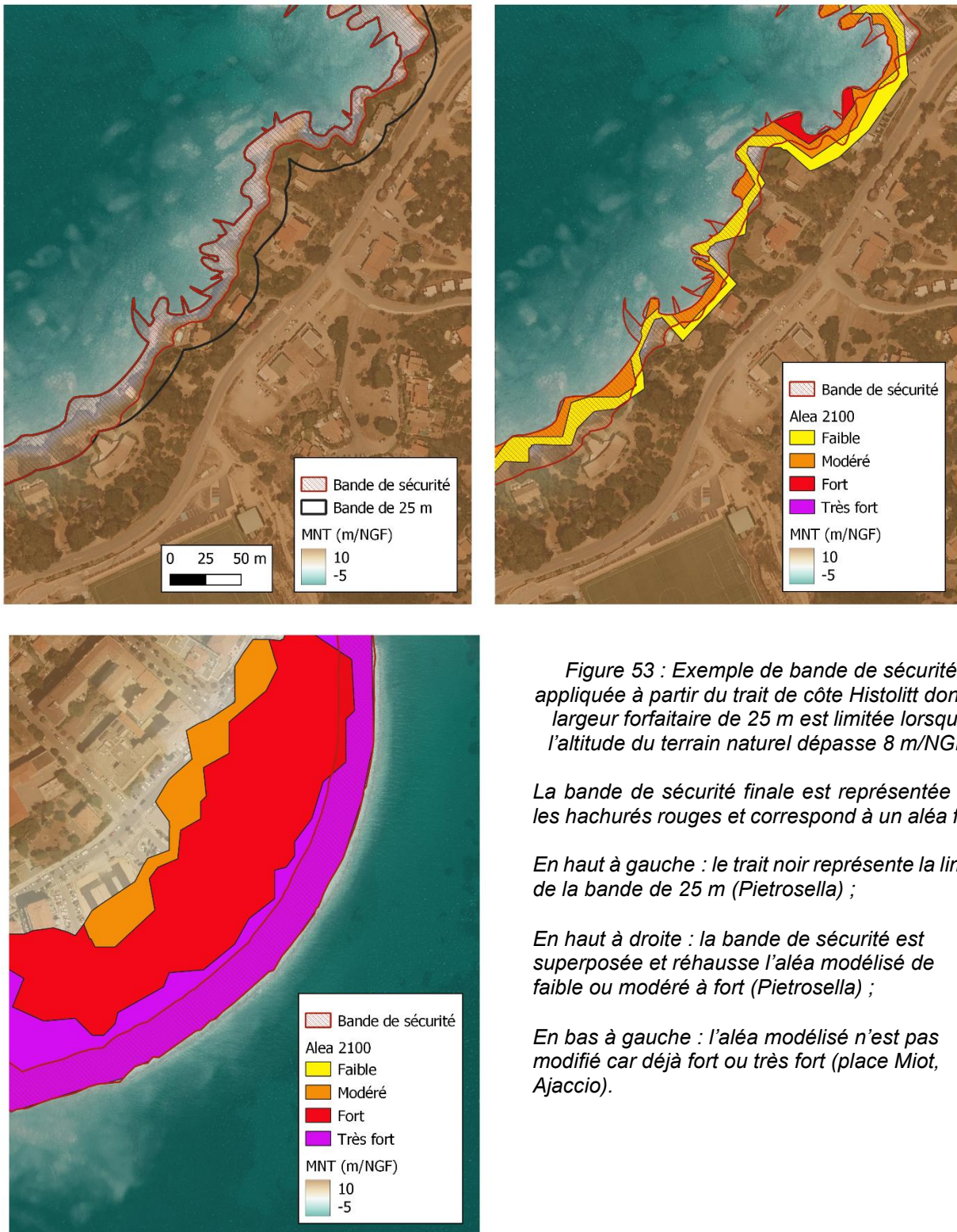


Figure 53 : Exemple de bande de sécurité appliquée à partir du trait de côte Histolitt dont la largeur forfaitaire de 25 m est limitée lorsque l'altitude du terrain naturel dépasse 8 m/NGF.

La bande de sécurité finale est représentée par les hachurés rouges et correspond à un aléa fort.

En haut à gauche : le trait noir représente la limite de la bande de 25 m (Pietrosella) ;

En haut à droite : la bande de sécurité est superposée et réhausse l'aléa modélisé de faible ou modéré à fort (Pietrosella) ;

En bas à gauche : l'aléa modélisé n'est pas modifié car déjà fort ou très fort (place Miot, Ajaccio).

Cette bande de sécurité sera associée à un aléa fort, quel que soit le résultat de l'aléa modélisé. L'aléa des zones situées au sein de cette bande sera donc rehaussé lorsqu'il est nul, faible ou modéré.

La

Figure 53 illustre un exemple de secteur où la topographie abrupte et élevée a été prise en compte afin de réduire la largeur de la bande de sécurité. Les zones supérieures à 8 m/NGF ont été considérées comme non exposées aux chocs mécaniques et projections. En revanche, sur le secteur de Pietrosella, l'aléa 2100 final (faible à modéré) sera rehaussé à fort. Il n'est pas modifié sur le secteur de la Place Miot à Ajaccio car déjà fort ou très fort.

8.6. EXEMPLES DE RESULTATS

Le secteur nord-ouest d'Ajaccio, le long de la route des Sanguinaires (place Miot, parking du cimetière et station d'épuration par exemple, Figure 54) ainsi que le nord de la plage du Ricanto (dans le secteur du rond-point de l'aéroport) mais également la rive sud du golfe (secteurs de Ghiatone et de l'Isolella sur la commune de Pietrosella, par exemple), se caractérisent par une exposition dominante aux franchissements de paquets de mer. Sur les premiers mètres du littoral pour les événements « actuel » et « 2100 », les vitesses d'écoulement sont importantes (> 0.5 m/s) avec un aléa fort, malgré de faibles hauteurs d'eau (0.2 à 0.5 m).

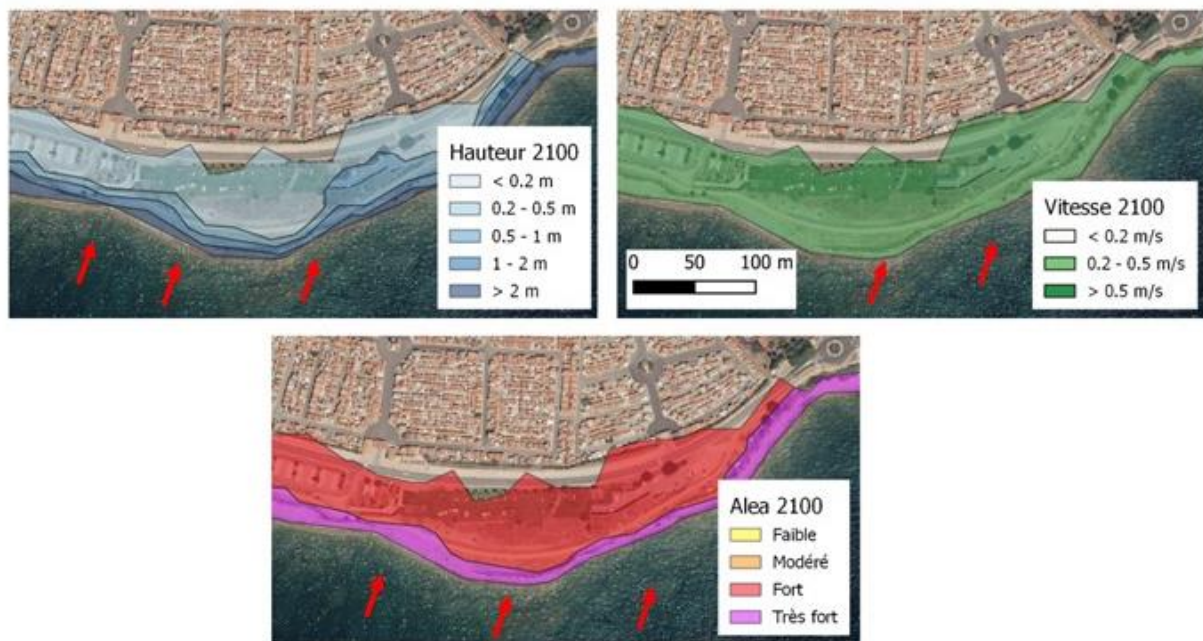


Figure 54 : Exemple du secteur de la route des Sanguinaires (parking du cimetière et station d'épuration) pour l'évènement 2100 où les franchissements de paquets de mer (flèches rouges) sont dominants.

Le secteur de l'aéroport d'Ajaccio (Figure 55) ou bien le secteur de la plage d'Agosta (commune d'Albitreccia) sont exposés à des submersions marines sous l'effet de la combinaison de plusieurs facteurs. Les embouchures représentent des entrées d'eau préférentielles pour le débordement amplifié par les importants débits fluviaux (Q5). Le cordon dunaire est largement

franchi par les paquets de mer qui apportent des volumes d'eau supplémentaires à la zone basse de l'aéroport en arrière par exemple.

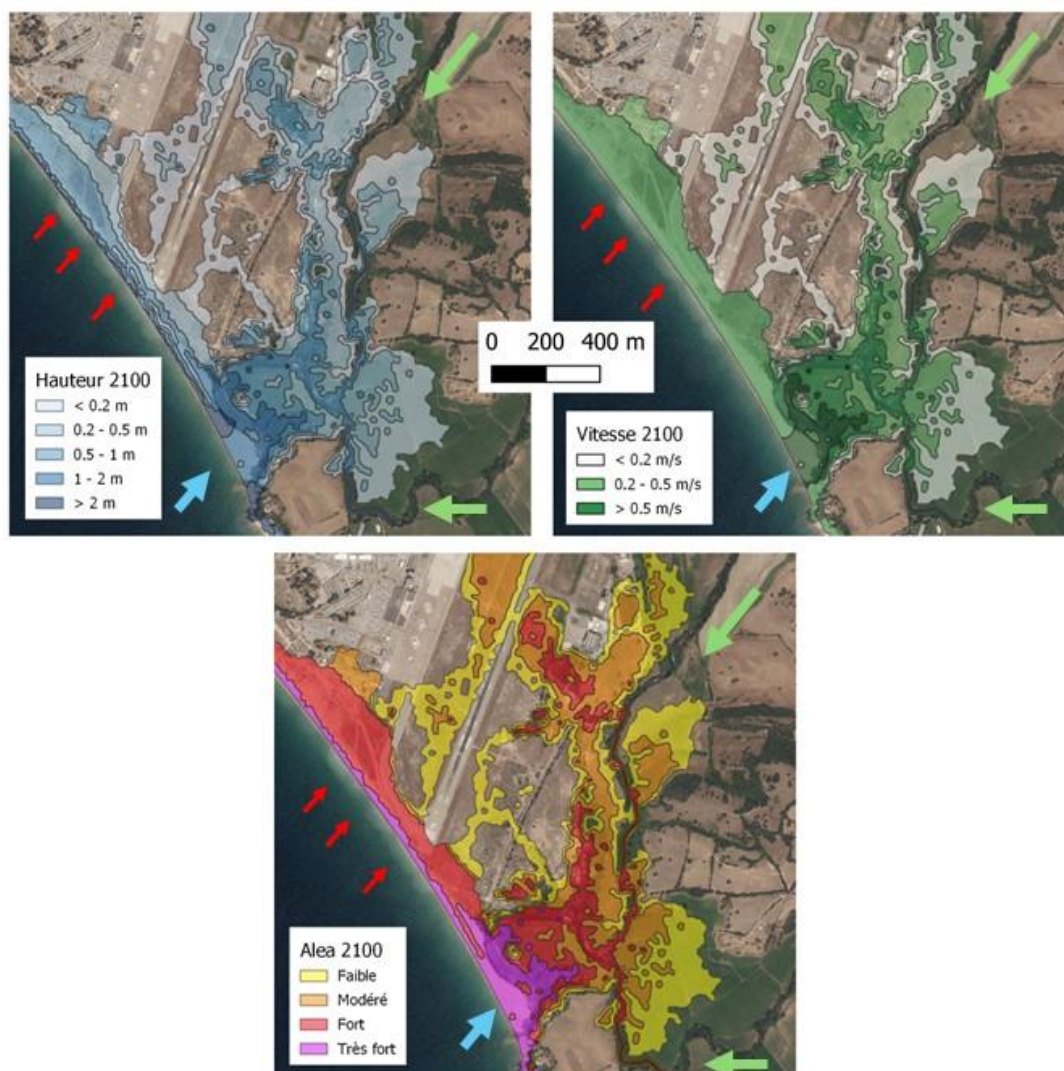


Figure 55 : Exemple de submersion marine pour l'évènement 2100, sur le secteur de l'aéroport d'Ajaccio, combinant les franchissements de paquets de mer (flèches rouges), les entrées d'eau par l'embouchure (flèches bleues) et l'influence des débits fluviaux (flèches vertes).

De manière générale, l'écart entre l'emprise de l'aléa « actuel » et celle de l'aléa « 2100 » est relativement restreint sur le pourtour du golfe d'Ajaccio (exemple du front de mer, Figure 56), contrairement à ce qui a été constaté sur le secteur du grand Bastia (2025, Rapport BRGM/RP-72406-FR). Cet écart est marqué surtout au niveau des zones basses à proximité des embouchures. Ailleurs la topographie abrupte limite l'extension de la submersion à terre.

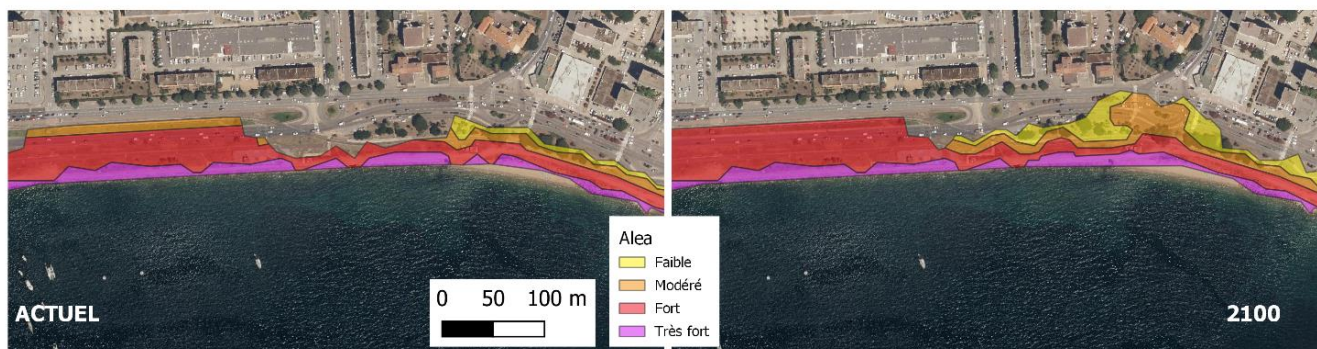


Figure 56 : Exemple de différence d'emprise de la submersion marine entre l'aléa « actuel » et l'aléa « 2100 » sur le front de mer d'Ajaccio (Bd Charles Bonaparte et Bd Georges Pompidou).

8.7. PRODUCTION DU SIG ET DE L'ATLAS NUMERIQUE

L'atlas a été généré à une échelle 1/5 000^{ème} et ne peut être exploité à l'échelle de la parcelle. Soixante cartes au format numérique .pdf ont été générées pour chaque événement aléa « actuel » et aléa « 2100 ». Le fond cartographique correspond au scan 25 de l'IGN. La limite côté mer des cartes correspond au trait de côte HISTOLITT® (<https://diffusion.shom.fr/trait-de-cote-histolitr.html>).

9. Conclusions

En raison de sa diversité géomorphologique (côte rocheuse, cordon sableux, zone lagunaire, zone portuaire, etc.), le littoral de Corse est exposé aux aléas côtiers dont la submersion marine, à des niveaux d'intensité variables. Les connaissances historiques des tempêtes majeures permettent d'illustrer les types de phénomènes auxquels est exposé le littoral de Corse. Ainsi, les observations de la tempête Adrian (29/10/2018) par exemple, ont témoigné de la forte exposition du front de mer d'Ajaccio aux franchissements de paquets de mer. La cartographie des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines (Rapport BRGM/RP-69376-FR, 2020) a permis d'identifier les zones exposées aux débordements, en particulier autour de l'aéroport d'Ajaccio et de l'embouchure de la Gravone et du Prunelli (commune d'Ajaccio et de Bastelicaccia) qui représente une vaste zone humide. Cependant, basée sur une approche dite « statique » (projection des niveaux d'eau sur la topographie) ne prenant pas en compte ni la dynamique des écoulements, ni la chronologie des phénomènes, cette cartographie a été considérée insuffisante pour représenter les submersions marines combinant débordements et franchissements de paquets de mer telles qu'historiquement observées. C'est pourquoi une méthode innovante de modélisation numérique permettant de reproduire les niveaux d'eau et la propagation des vagues, a été mise en œuvre.

Cette méthode repose sur l'utilisation couplée des modèles UHAINA (Filippini et al., 2024) et WAVEWATCH3 (Tolman, 2009), ainsi que l'utilisation complémentaire du modèle SWASH (Zijlema et al. 2011) de propagation des vagues. De plus, l'utilisation d'un maillage non structuré pour représenter la configuration topo-bathymétrique a permis d'affiner la résolution de la modélisation dans les zones de déferlements des vagues et les zones à enjeux. Une étape importante de la méthode concerne la vérification (et la correction le cas échéant) de l'intégration des contraintes topo-bathymétriques dans la grille des modèles (fossés, route, connexions hydrauliques, etc.) qui s'appuie sur les données Litto3D du SHOM (2018) et du RGE ALTI® 1 m Corse V1 (IGN).

Les simulations ont été réalisées pour les événements naturels dits « actuel » et « 2100 », de période de retour centennale calculés dans l'étude antérieure (rapport BRGM/RP-69376-FR, 2021). L'évènement « actuel » intègre une marge de sécurité de 20 cm liée à l'élévation du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique. Cette marge est de 60 cm pour l'évènement « 2100 » conformément aux consignes ministérielles du guide du MEDDE (2014). Deux scénarios par évènement ont été entièrement modélisés sur la chaîne de modélisation.

Conformément aux consignes ministérielles du guide du MEDDE (2014, seuls les ouvrages portuaires d'Ajaccio ont été considérés pérennes. Comme défini en concertation avec la DDT de Corse-du-Sud, aucun scénario de brèche ou défaillance d'ouvrage n'a été réalisé car aucun ouvrage de protection contre les submersions marines présentait les conditions nécessaires pour une prise en compte (classement code de l'environnement, étude de danger, etc.) sur la zone d'étude.

Cette étude a permis de caractériser l'importance des emprises concernées par les phénomènes de submersion marine qui peuvent s'étendre assez loin à l'intérieur des terres notamment sur le pourtour de l'embouchure de la Gravone et du Prunelli (secteur de l'aéroport d'Ajaccio) et au niveau des embouchures des cours d'eau (communes de Pietrosella et d'Albitreccia) sous l'effet combinés des débordements et des franchissements de paquets de mer ainsi qu'au nord de la

plage du Ricanto par exemple (secteur du rond-point de l'aéroport), principalement sous l'effet des franchissements de paquets de mer.

D'autre part, il est également mis en évidence les niveaux d'aléa fort à très fort sur les premiers mètres (voire dizaine de mètres) du littoral en lien avec des vitesses d'écoulements élevées associées aux franchissements de paquets de mer. La quasi-totalité de la rive sud et nord du Golfe est exposé à ce type de submersion. Les voies de circulation longeant le rivage sont exposées en plusieurs endroits. Cependant, en raison de la topographie relativement abrupte, l'extension de la submersion est assez réduite avec des hauteurs d'eau limitées.

Les aléas chocs mécaniques des vagues et projection qui sont des aléas distincts mais associés à l'aléa submersion marine par franchissement de paquets de mer sont également pris en compte de manière forfaitaire par l'ajout d'une bande de sécurité. Celle-ci est appliquée conformément aux recommandations du guide PPRL (MEDDE, 2014) : « *la largeur de la zone soumise au déferlement peut être considérée par défaut comme égale à 25 m* ». Pour tenir compte de la configuration topographique abrupte au niveau de la côte rocheuse autour du Golfe, la largeur de cette bande de sécurité de 25 m est réduite lorsque l'altitude dépasse 8 m/NGF. Cette bande de sécurité est associée à un aléa fort.

Les résultats de cette étude ont vocation à être intégrés à un Plan de Prévention des Risques Littoraux. L'atlas cartographique a été produit à une échelle 1/5 000^{ème} et n'est pas adapté pour une exploitation à l'échelle de la parcelle.

10. Bibliographie

Amante C.J. et Eakins B.W. (2016) - Accuracy of interpolated bathymetry in digital elevation models. In: Brock, J.C.; Gesch, D.B.; Parrish, C.E.; Rogers, J.N., and Wright, C.W. (eds.), *Advances in Topobathymetric Mapping, Models, and Applications. Journal of Coastal Research*, Special Issue, No. 76, pp. 123–133. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

Ardhuin, F., 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.

BRGM (2025) - Caractérisation de la dynamique de la submersion sur les secteurs de la CAB et de la CCMG. Rapport Final V1. BRGM/RP-72406-FR.

Brown, J. D., Spencer, T., and Moeller, I.: Modelling storm surge flooding of an urban area with particular reference to modelling uncertainties: a case study of Canvey Island, United Kingdom, *Water Resources Research.*, 43, W06402, doi: 10.1029/2005WR004597, 2007.

Bunya, S., Deitrich, J.C., Westerink, J.J., Ebersole, B.A., Smith, J.M., Atkinson, J.H., Jensen, R., REsio, D.T., Luettich, R.A., Dawson, C., Cardone, V.J., Cox, A.T., Powell, M.D., Westerink, H.J., and Roberts, H.J. (2010). *A High-Resolution Coupled Riverine Flow, Tide, Wind, Wind Wave, and Storm Surge Model for Southern Louisiana and Mississippi. Part I: Model Development and Validation.* *Monthly Weather Review.* Vol. 18, pp. 345-377

Charpy C., Schmitt T., Biscara L., Maspataud A., Avisse L., Créach R. (2015) - Précision et performance des méthodes d'interpolation pour la réalisation de modèles numériques de terrain bathymétriques. *Colloque merIGéo*, 24-26 novembre 2015, Brest, 173-175.

Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P. (2001) - An introduction to statistical modeling of extreme values (Vol. 208). London: Springer.

DGPR, MTECPR (2024) - Guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation par débordement de cours d'eau (hors cours d'eau torrentiels). Version de septembre 2024, 159 p.

Eakins B. W. et Grothe P. R. (2014) - Challenges in Building Coastal Digital Elevation Models. *Journal of Coastal Research*, 30(05), 942-953. <http://dx.doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00192.1>

Efron, B. (1992) - Bootstrap methods: another look at the jackknife. In *Breakthroughs in Statistics* (pp. 569-593). Springer New York.

European Environment Agency, 2012. CORINE Land Cover Project. Commission of the European Communities. Available at <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012/view>

Filippini A.G., L. Arpaia, V. Perrier, R. Pedreros, P. Bonneton, D. Lannes, F. Marche, S. De Brye, S. Delmas, S. Lecacheux, F. Boulahya, M. Ricchiuto (2024) - An operational discontinuous Galerkin shallow water model for coastal flood assessment, *Ocean Modelling*, Volume 192, 2024, 02447, ISSN 1463-5003, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2024.102447>.

Gouldby B., Mendez F.J., Guanche Y., Rueda A., Minguez R. (2014) - A methodology for deriving extreme nearshore sea conditions for structural design and flood risk analysis, *Coastal Engineering*, Volume 88, Pages 15-26.

Hawkes, P., Gouldby, B., Yard A, Tawn, J., Bortot, P. (2000) – The Joint Probability of waves and water levels: JOIN-SEA – A rigorous but practical new approach. Report SR537, HR Wallingford & Lancaster University.

Hawkes, P. J., Gouldby, B. P., Tawn, J. A., and Owen, M. W. (2002) - The joint probability of waves and water levels in coastal engineering design, *J. Hydraul. Res.*, 40, 241–251.

Heffernan, J. E. and Tawn, J. A. (2004) - A conditional approach for multivariate extreme values (with discussion), *J. Roy. Stat. Soc. Ser. B*, 66, 497–546.

MEDDE (2014) – Guide Méthodologique, Plan de Prévention des Risques Littoraux. Version de mai 2014, 169p.

Mugica J., Pedreros R., Louisor J., Rohmer J., Maspataud A., Laigre T. avec la collaboration de Nicolae Lerma A., Paris F. (2019) – Caractérisation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines – Secteurs de Sant’Amanza (Bonifacio) à Zonza. Rapport final. BRGM/RP-68934-FR, 134 p., 76 fig., 3 tab., 3 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.

Nicolae Lerma, A., Bulteau, T., Elineau, S., Paris, F., Durand, P., Anselme, B., & Pedreros, R. (2018) - High-resolution marine flood modelling coupling overflow and overtopping processes: framing the hazard based on historical and statistical approaches. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1), 207-229.

Shom (2015) - MNT Bathymétrie de façade de la Corse (Projet Homonim). http://dx.doi.org/10.17183/MNT_MED100m_CORSE_HOMONIM_WGS84

Shom (2017) - Ouvrage de marée. Références Altimétriques Maritimes Ports de France métropolitaine et d'outre-mer. Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée. Edition 2017. 120 p.

Smith W.H.F. et Wessel P. (1990) - Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, Vol. 55, No. 3 (March 1990), 293-305.

Tolman, H. L., et al. (2009) - User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14. Technical note, MMAB Contribution, 276, 220

Wessel P., Smith W. H. F., Scharroo R., Luis J., Wobbe F. (2013) - Generic Mapping Tools: Improved Version Released. *EOS Trans. AGU*, 94(45), 409-410. doi:10.1002/2013EO450001.

Zijlema, M., Stelling, G., Smit, P. (2011) - SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering* 58, 992–1012.

Annexe 1 Construction des modèles numériques de terrain (MNT)

Principes généraux de production de MNT

Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation digitale du terrain issue de l'interpolation appliquée à une sélection de données topographiques et/ou bathymétriques acquises et traitées au préalable. Chaque produit est défini comme une grille continue et régulière pour laquelle chaque nœud est renseigné par une estimation de la profondeur ou de l'altitude locale. L'interpolation assure donc le remplissage de chaque nœud de manière homogène. Dans la mesure du possible, le produit vise à rendre compte de la situation la plus actuelle des fonds marins, sur sa partie maritime, et prendre en compte les données offrant la meilleure précision métrologique. La continuité en tout point des domaines terrestre et marin est nécessaire, particulièrement pour les usages en modélisation hydrodynamique. De même, l'objectif est de reproduire le plus fidèlement possible des phénomènes océaniques en se basant sur des systèmes numériques de modélisation ayant comme conditions aux limites, entre autres, la bathymétrie. La profondeur d'eau et donc la précision verticale du MNT sera un paramètre déterminant en vue de modéliser fidèlement la plupart de ces phénomènes, notamment leur amplification et leur vitesse de propagation. La méthodologie couramment mise en œuvre pour les besoins liés à la modélisation hydrodynamique répond à une chaîne de production développée pour la réalisation de modèles numériques de terrain topo-bathymétriques emboîtés, à des résolutions données, et en cohérence avec l'échelle des phénomènes physiques modélisés.

Caractéristiques et contraintes techniques

Dans cette étude, les spécifications des MNT nécessaires aux tâches de modélisation ont été définies à partir d'une étude du besoin précisant les caractéristiques souhaitées du MNT en sortie : emprise finale attendue, convention en Z des données, références horizontale et verticale, résolution, format de produit...

Les principales contraintes techniques concernent :

- la construction de grille(s) à partir des données topographiques et bathymétriques identifiées sur la zone de travail dans des bases de données accessibles ou à partir de données déjà acquises par le BRGM ;
- un besoin de description plus fine de la bathymétrie au niveau des petits fonds et sur l'avant-côte, dans les zones à enjeu ;
- un emboîtement successif des éventuelles grilles produites/disponibles, pour que les profondeurs soient cohérentes d'un niveau à l'autre.

Les MNT disponibles sur le secteur d'étude se déclinent ici de la façon suivante (Figure 57) :

- une grille MNT à la résolution de 10 m, sur le secteur du Golfe d'Ajaccio ;
- une grille MNT à grande emprise à la résolution de 50 m, de l'est de Bonifacio au nord de Porto (produite dans le cadre de l'étude BRGM/RP-69376-FR).

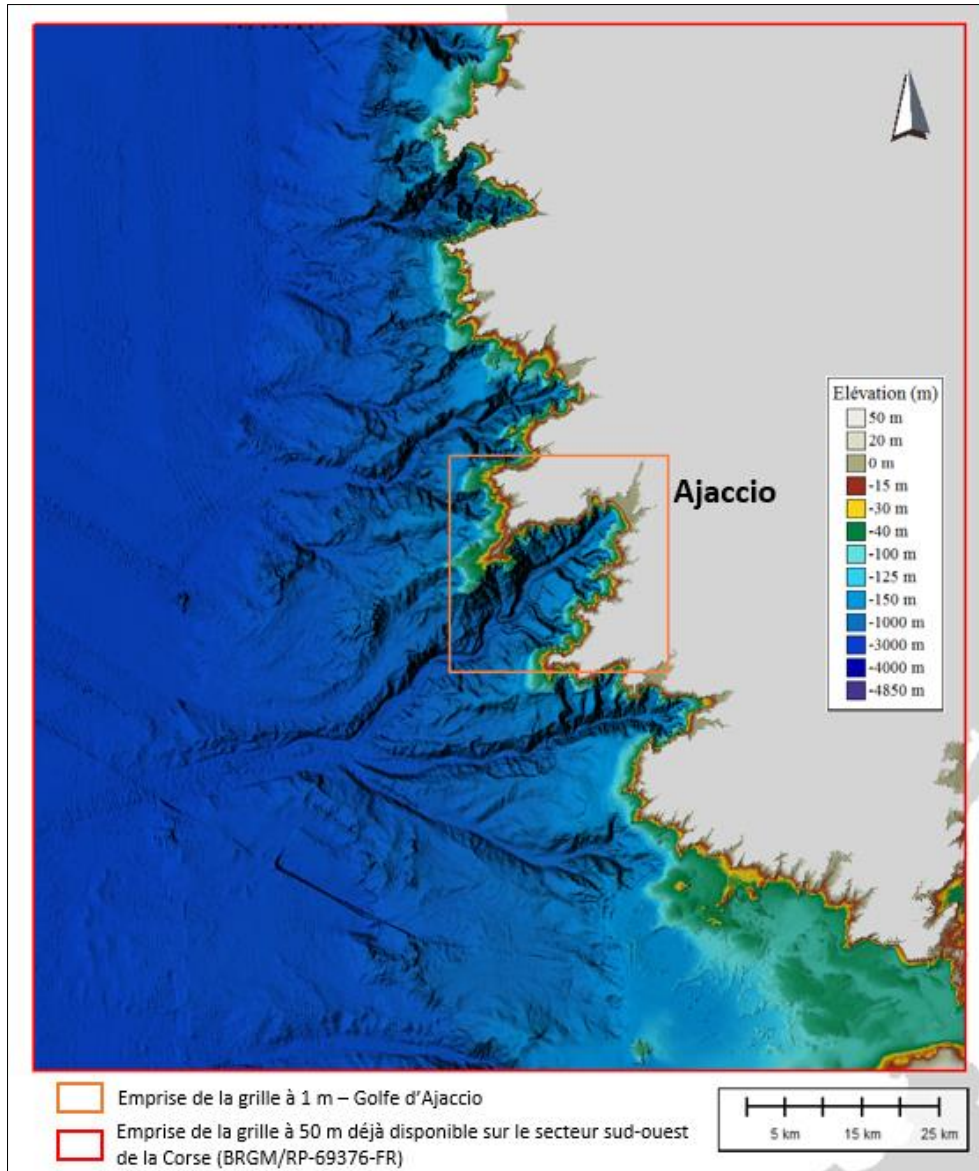


Figure 57 : Extension finale de la grille MNT produite sur le secteur du Golfe d'Ajaccio.

L'extraction des données nécessaires à la production des grilles a été réalisée sur une emprise plus étendue que la grille finale. L'interpolation de la grille à 1 m a aussi été effectuée en prenant en compte des limites plus étendues afin d'assurer une représentation juste et cohérente de la bathymétrie aux bordures du domaine (Eakins *et al.*, 2014).

Diagramme des sources de données exploitées

La couverture des différentes sources de données disponibles sur le secteur étendu du Golfe d'Ajaccio est représentée dans la Figure 58.

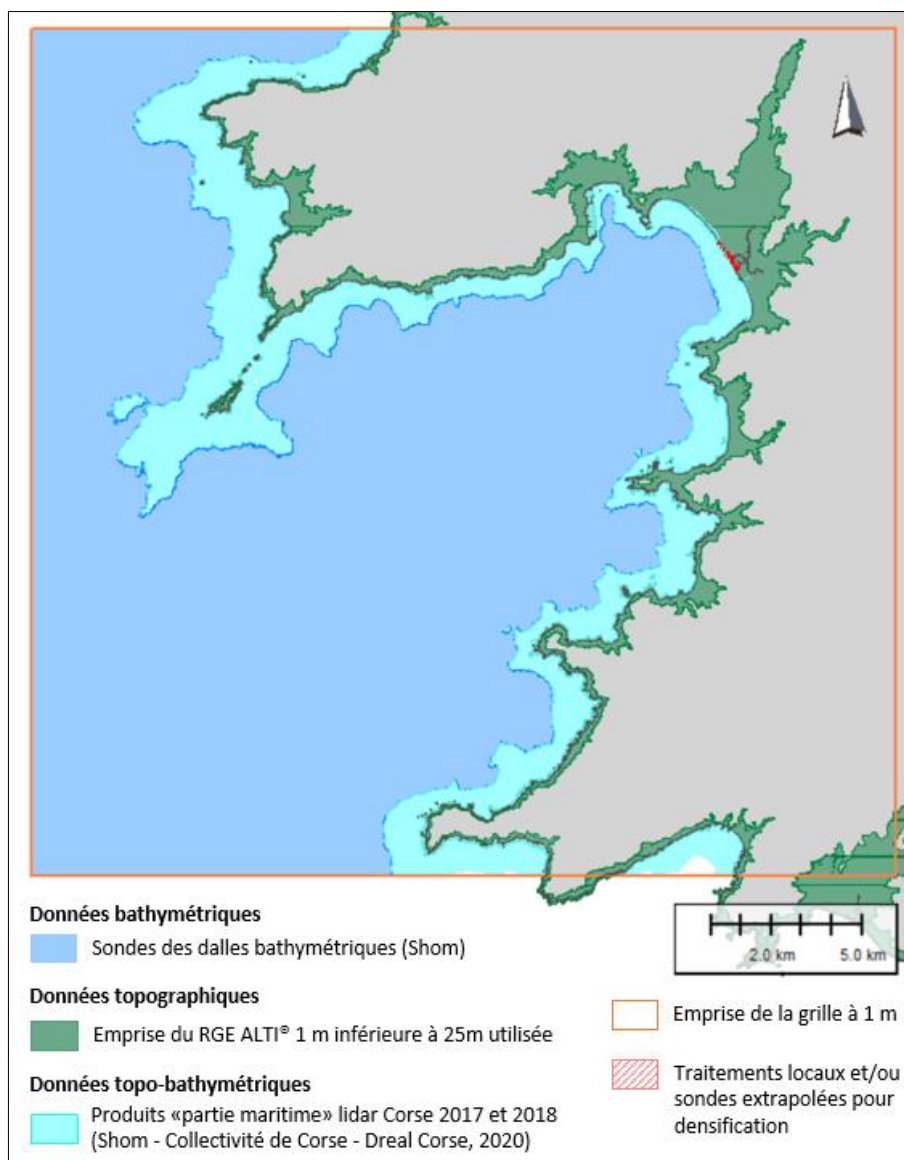


Figure 58 : Localisation des sources de données topo-bathymétriques exploitées sur l'emprise de la grille MNT à 1 m.

Traitements effectués

- Outils de travail

Les données ont été traitées à l'aide de GMT (version 5.1.1 ; sous environnement Linux ; Wessel *et al.*, 2013), et de SAGA-GIS (version 2.1.0 ; sous environnement Windows ; Conrad *et al.*, 2015).

- Système géodésique

Le système géodésique légal en France métropolitaine est le RGF93, avec pour système de coordonnées projetées le Lambert-93. C'est dans ce système que sont fournis les produits topographiques de l'IGN.

En revanche, les jeux de données bathymétriques exploités dans cette étude sont fournis en coordonnées géographiques, rapportées au système géodésique WGS84. La conversion de ces données dans le système légal RGF93 a été opérée à l'aide du logiciel Circé France 4.2 (IGN).

- [Gestion des références verticales et conversions altimétriques](#)

Les différents lots de données sources sont calés, suivant leur origine, par rapport aux références verticales en vigueur en termes de bathymétrie ou de topographie. En France, la référence verticale pour les produits de bathymétrie est le zéro de réduction des sondages (zéro des cartes marines), qui correspond généralement au zéro hydrographique de la zone considérée. Les données topographiques disponibles pour la Corse sont quant à elles fournies avec pour système altimétrique l'IGN78.

Afin de construire un MNT continu terre-mer le plus cohérent possible, il a été nécessaire d'homogénéiser les différents jeux de données par rapport au référentiel altimétrique légal IGN78. La principale source d'informations est le produit "Références Altimétriques Maritimes" (RAM édition 2017 ; Shom, 2017) du Shom. Afin de réduire au minimum les écarts de conversion potentiels, il a été décidé de mobiliser au maximum d'autres informations et outils de référence verticaux produits par le Shom (RAM, Bathylli) et l'IGN (grille RAC09 disponible à partir de Circé_France_Batch_4.2).

Les avancées des techniques de géodésie spatiale ont généralisé l'accès à une nouvelle référence verticale, l'ellipsoïde, une modélisation mathématique de la planète accessible à l'aide de récepteurs GNSS12, par exemple. Ainsi, l'ensemble des sondes issues des dalles bathymétriques a été recalé à l'ellipsoïde à partir de surfaces de conversion adaptées. Les données bathymétriques initialement référencées par rapport au ZH ont été recalées à l'ellipsoïde (Eli) à l'aide du modèle surfacique Bathylli V1.1 (projet Shom («Bathymétrie rapportée à l'ellipsoïde» ; ZH/Eli diffusée en utilisation libre sur <https://data.shom.fr/>). Cette surface a dû être extrapolée à terre, les données exploitées s'étendant dans les rivières et ponctuellement à terre. La conversion du nuage de points du ZH à l'ellipsoïde, à partir de cette surface maillée, a été obtenue à l'aide de GMT13. Enfin, le nuage de points référencés à l'ellipsoïde a été rapporté au référentiel altimétrique légal IGN78 à l'aide de la grille RAC09 de l'IGN. Seules les sondes issues du produit MNT bathymétrique à 100 m de la Corse (Shom, 2015), fourni à la fois par rapport au NM et à PBMA, ont fait l'objet d'une conversion altimétrique basée sur une extrapolation de l'écart NM/Ref (ou bien PBMA/Ref) à partir du produit RAM (Shom, 2017). Il s'agit ici d'une méthode de conversion basée sur une simple extrapolation de valeurs ponctuelles (ports de référence peu nombreux sur la zone d'étude).

Une fois les données homogénéisées, l'interpolation peut être effectuée tout en limitant au maximum les problèmes associés à la référence verticale.

- [Traitement des données IGN](#)

De par sa résolution et son extension, le produit RGE ALTI® est volumineux et son traitement coûteux en temps. Afin de faciliter l'exploitation des dalles, celles-ci ont été concaténées en un assemblage de carreaux jointifs. Pour chaque carreau, le traitement est le suivant : 1) sélection des dalles contenues, et conversion de chaque assemblage du format .asc à .grd ; 2) conversion des grilles (au format .grd) en nuages de points (au format .xyz). Les nuages de points ont ensuite été concaténés en un seul fichier de données, toujours projetées en Lambert 93 et référencées verticalement à l'IGN 78.

Le jeu de données RGE ALTI® utilisé a également nécessité des vérifications supplémentaires (et locales), notamment dans des ports, embouchures de rivières ou encore marais littoraux, où

souvent les nœuds représentent la hauteur du plan d'eau et non pas la bathymétrie. A partir des grilles des sources transmises avec le produit RGE, il a été possible de catégoriser et de vectoriser les zones présentant ces valeurs de plan d'eau en vue de leur élimination ou vérification. Là où des données bathymétriques sont disponibles (levé bathymétrique existant ou produit Litto3D « partie maritime »), les valeurs de plan d'eau du RGE ALTI® sont exclues. En revanche, en l'absence de données bathymétriques, ces données sont conservées.

Pour les besoins de cette étude, les données topographiques ont été seuillées à 25 m. Seules les élévations inférieures à cette valeur ont été exploitées.

- [Traitement des données bathymétriques](#)

Les dalles bathymétriques sont caractéristiques d'un jeu de données de couverture chronologiquement non homogène, à partir de levés d'âges très variés. Or le recouvrement de jeux de données d'âge et/ ou d'origine différente est sujet à de nombreux artefacts dans l'élaboration de MNT. Ces difficultés peuvent avoir des causes variées : des précisions différentes entre des lots voisins ou concomitants, des changements morphologiques dus à l'évolution des fonds marins (meubles) intervenus entre les dates d'acquisition, etc... Afin de limiter toute incohérence bathymétrique liée à la superposition de données, la déconfliction des sondes issues des dalles bathymétriques a été réalisée manuellement et ce de façon itérative.

Localement des levés anciens recouverts par de nouveaux levés ont ainsi été supprimés, en totalité ou partiellement (tronçons). La découpe ou la suppression de levés a été réalisée au cas par cas. Le plus souvent, des chevauchements de lots de données ont volontairement été conservés, dès lors qu'aucune incohérence notable n'avait été soulignée, afin d'obtenir une jonction correcte mais progressive entre deux surfaces.

Au-delà de la couverture des dalles bathymétriques, ou en complément (pour palier trop une faible densité de sondes), le MNT bathymétrique de la Corse à 100 m (Shom, 2015) a été localement mobilisé, découpé et converti en points, puis inséré dans le nuage de points destiné à l'interpolation. Une zone tampon a été toutefois conservée entre les sondes des dalles bathymétriques et celles issues du produit MNT à 100 m afin d'assurer ultérieurement une bonne interpolation à leur jonction.

- [Interpolation](#)

Afin de répondre aux objectifs fixés, la méthode d'interpolation retenue pour produire les grilles est l'outil *surface* de GMT (version 5.1.1 sous environnement Linux ; Wessel *et al.*, 2013). La bibliographie existante (Amante et Eakins, 2016 ; Smith et Wessel, 1990) et l'expérience acquise suggèrent d'utiliser une *spline*, avec un paramètre de tension adapté pour des données topographiques et/ou bathymétriques (Charpy *et al.*, 2015). La méthode mise en œuvre dans cet outil correspond à une interpolation par *spline*, où les notions de courbure minimum du relief et de tension adaptable sont combinées. Une *spline* dite sous tension crée une surface lisse, passant par des points de contrôle tout en présentant une courbure minimale.

L'interpolation a été réalisée à partir d'un fichier concaténé contenant les différentes sources bathymétriques et topographiques citées précédemment. Un premier MNT a été généré, mettant en évidence d'éventuels problèmes : le recouvrement persistant de certains jeux de données (âge et densité différents) qui, une fois interpolés, entraînent des incohérences morphologiques. De manière itérative, une nouvelle déconfliction entre levés a alors été effectuée (au besoin) avant toute nouvelle interpolation.

Les limites étendues de la grille finale définie ont été utilisées pour l'interpolation, afin d'assurer une représentation correcte et cohérente de la bathymétrie aux bordures du domaine, en particulier afin de permettre une bonne cohérence à la jonction entre la grille produite à 1 m de résolution et la grille préexistante de grande emprise à 50 m. Le jeu de données à l'origine des différents MNT tire donc profit de la déconfliction fine (exclusion, découpe de lots) effectuée à l'échelle des grilles les plus résolues.

Localement une attention particulière a été consacrée à des ajustements concernant :

- **l'intégration dans le jeu de données du produit Litto3D « partie maritime » Corse disponible.**

Si les zones (maritimes) de bathymétrie sont bien traitées dans leur totalité et sur l'ensemble du produit, en revanche les zones topographiques (terrestres) ne bénéficient pas d'une séparation sol/sursol au-delà d'une limite de 20 m à l'intérieur du trait de côte Histolitt®. Ceci entraîne la présence de bâtiments et de végétation dans la zone à enjeu du secteur d'étude.

Pour cette raison, seule la partie du produit Litto3D « partie maritime » comprise entre les petits-fonds et cette limite terrestre ont été conservés ici. La partie terrestre correspondant au produit RGE ALTI®.

Egalement, le secteur de la plage du Ricanto, à proximité de l'aéroport d'Ajaccio, a subi quelques ajustements sur le haut de plage en raison d'artefacts (marches visibles) présentes dans le produit Litto3D.

Enfin, l'embouchure de la Gravona/Le Prunelli a nécessité une reprise particulière. Les spécifications techniques du produit Litto3D précisent que « *des points d'une même zone pouvant contenir des données étalées dans le temps* » et « *ne représentent aucunement une vérité terrain mais bien une morphologie moyenne du littoral sur une plage de temps : des évolutions / des modifications du littoral ont pu avoir lieu sur cette durée* ». L'embouchure du cours d'eau a donc été retravaillé de façon à permettre une connexion hydraulique entre Gravona/Prunelli et la mer, par une combinaison entre la topographie présente dans le produit RGE ALTI (R) 1m (IGN) avec le produit Litto3D "partie maritime" (Figure 59).

- **la faible densité de sondes bathymétriques (densité hétérogène du nuage de points considéré, mais parfois inférieure à la résolution d'interpolation souhaitée), qui a nécessité une densification des sondes.**

Les sondes ont alors été 1) interpolées à une faible résolution (avec un paramètre de tension significatif), puis 2) ré-échantillonnées à la résolution souhaitée, avant d'être 3) réinjectées dans le nuage de points final pour contraindre l'interpolation.

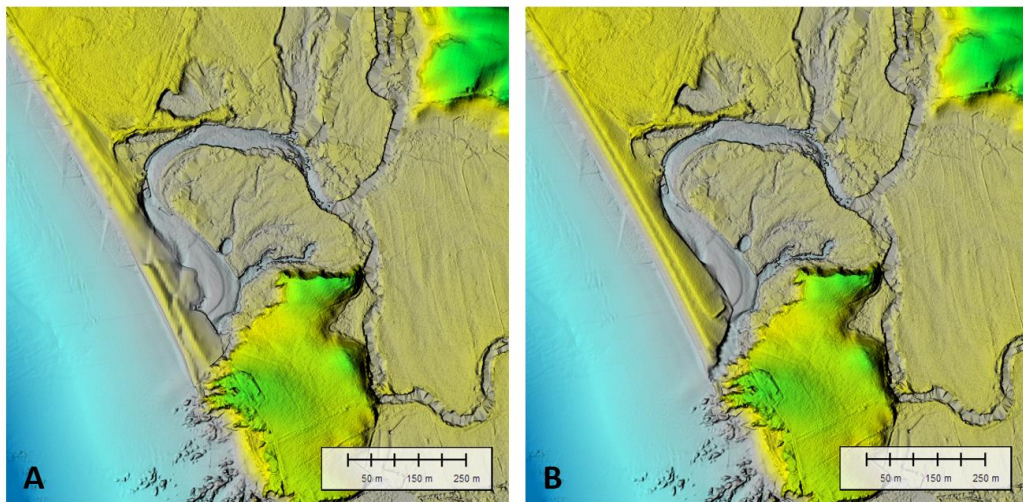


Figure 59 : Ajustements opérés sur le secteur de l'embouchure de la Gravona/Le Prunelli : A) morphologie existante dans le produit Litto3D "partie maritime" livré par le Shom ; B) morphologie d'embouchure, partiellement ouverte post-ajustements.

Caractéristiques du Modèle Numérique de Terrain

La grille MNT produite dans le cadre de cette étude correspond à une grille continue terre-mer, soit un MNT topo-bathymétrique. Son emprise englobe la bande littorale et s'étend de part et d'autre du trait de côte (Figure 60), sur terre comme en mer, couvrant partiellement le plateau continental. L'emprise spatiale d'un tel MNT est définie de façon à répondre au mieux aux besoins de la modélisation Figure 60).

Le MNT est calé verticalement par rapport au référentiel altimétrique légal IGN78, dans le système géodésique légal de France métropolitaine (RGF93), avec pour système de coordonnées projetées le Lambert-93. La convention retenue est l'axe Z orienté vers le haut, soit des profondeurs correspondant aux valeurs négatives.

Dans un souci d'interopérabilité, le produit est fourni dans un format d'encodage «.grd » *Golden Software Surfer* (float format 6 ou 7), lisible par la plupart des logiciels SIG ou de modélisation.

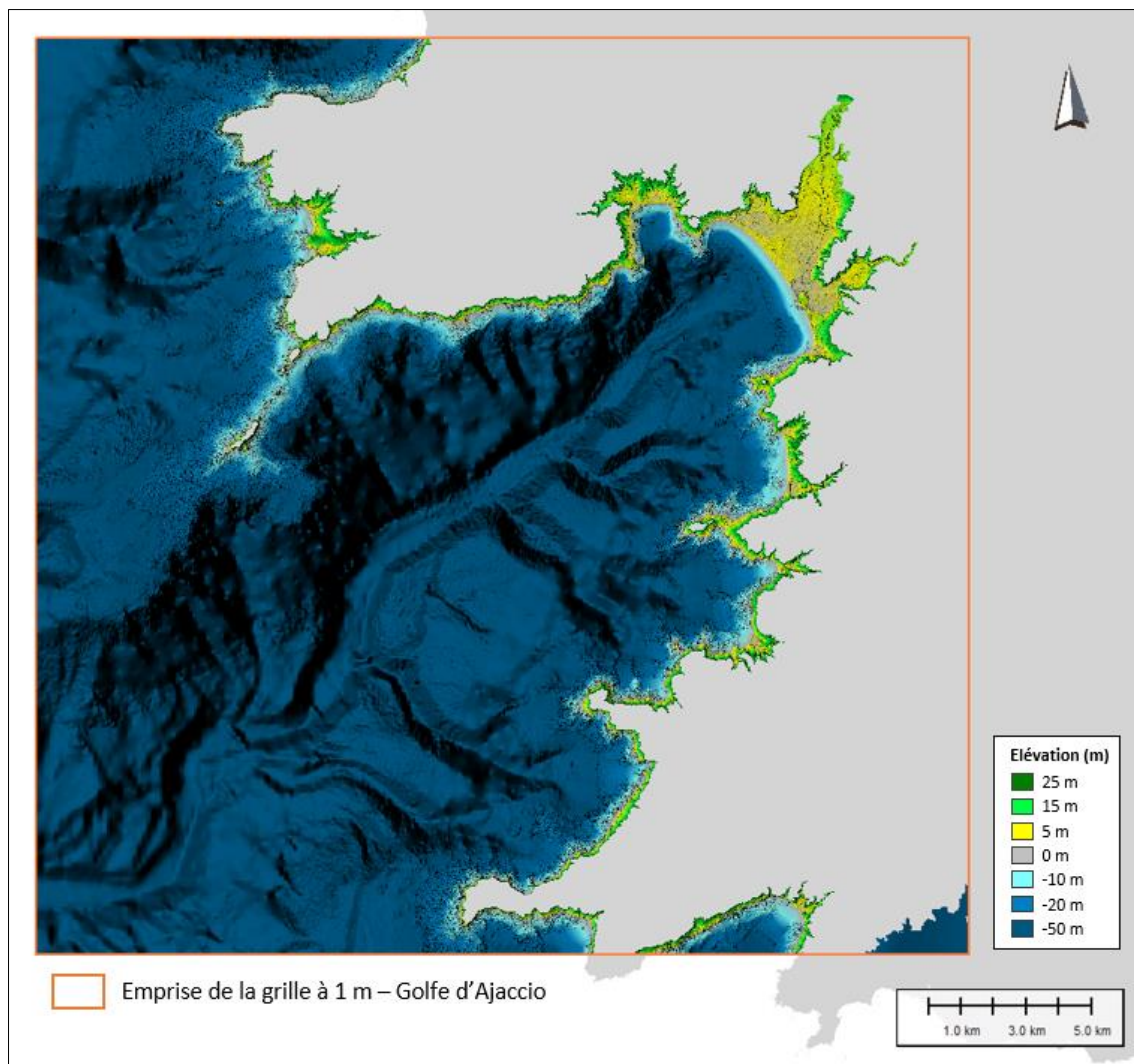


Figure 60 : MNT topo-bathymétriques à 1 m de résolution sur le secteur du Golfe d'Ajaccio.

Annexe 2 Probabilités conjointes de Hs, SWL et U au couple NWW3 465/CORSE 26

Cette étape consiste à analyser et à ajuster la distribution individuelle (marginale) des variables suivantes : hauteur significative des vagues Hs, niveau d'eau SWL et vitesse des vents U. Le modèle statistique utilisé est la loi Pareto Généralisée GPD (*Generalized Pareto Distribution*).

L'ajustement (i.e. l'estimation des valeurs des paramètres) exige de choisir les seuils à partir desquels le domaine des valeurs est considéré comme « extrême ». Ce choix repose sur une combinaison d'analyse (Coles et al. 2001) de graphes quantile-quantile, de « mean residual life plots » et d'analyse des valeurs quantitatives résultant de tests statistiques (χ^2 , Kolmogorov-Smirnov). En dessous du seuil sélectionné, la distribution empirique basée sur les seules observations est utilisée.

Enfin, trois méthodes d'estimation des paramètres de la GPD ont été testées : méthodes des moments MOM, des moments pondérés PWM et maximum de vraisemblance ML. L'incertitude associée à l'ajustement est prise en compte et est traduite sous la forme d'un intervalle de confiance (à 95 % et à 70%) estimée par méthode bootstrap (Efron, 1992).

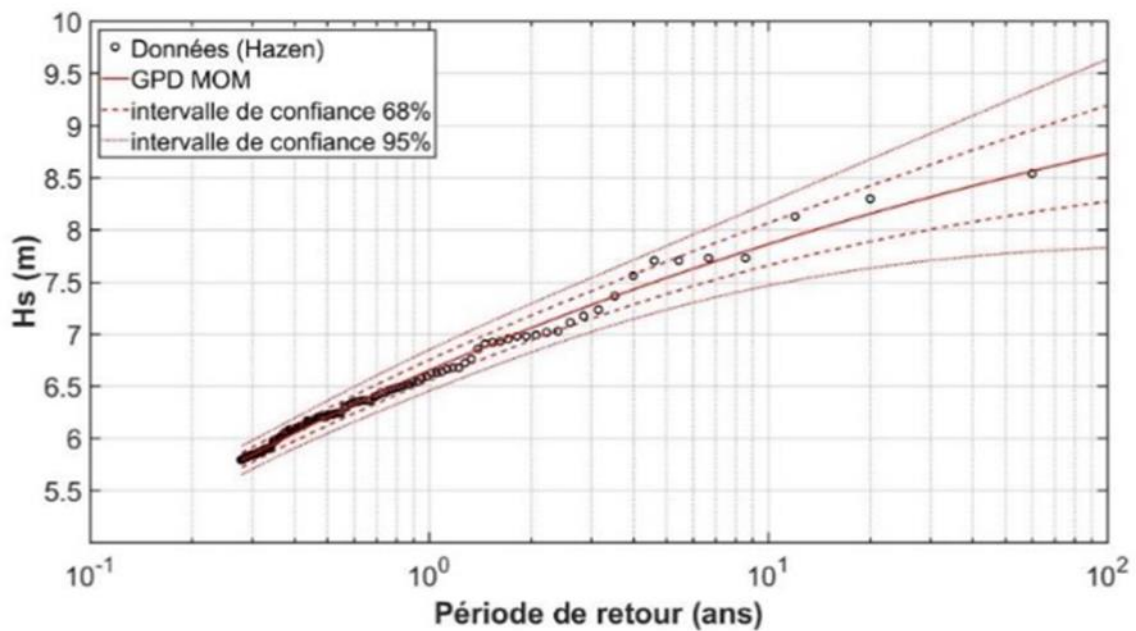


Figure A. 1 : Distribution marginale pour la hauteur significative des vagues (Hs) au point d'extraction NWW3 465. Valeur centennale = 8.73m ; Loi appliquée : MOM ; Seuil $u = 5.78\text{m}$; Nombre d'événements/an : 3.6. La valeur centennale de H_{s100} et l'intervalle de confiance à 95% sont également reportés.

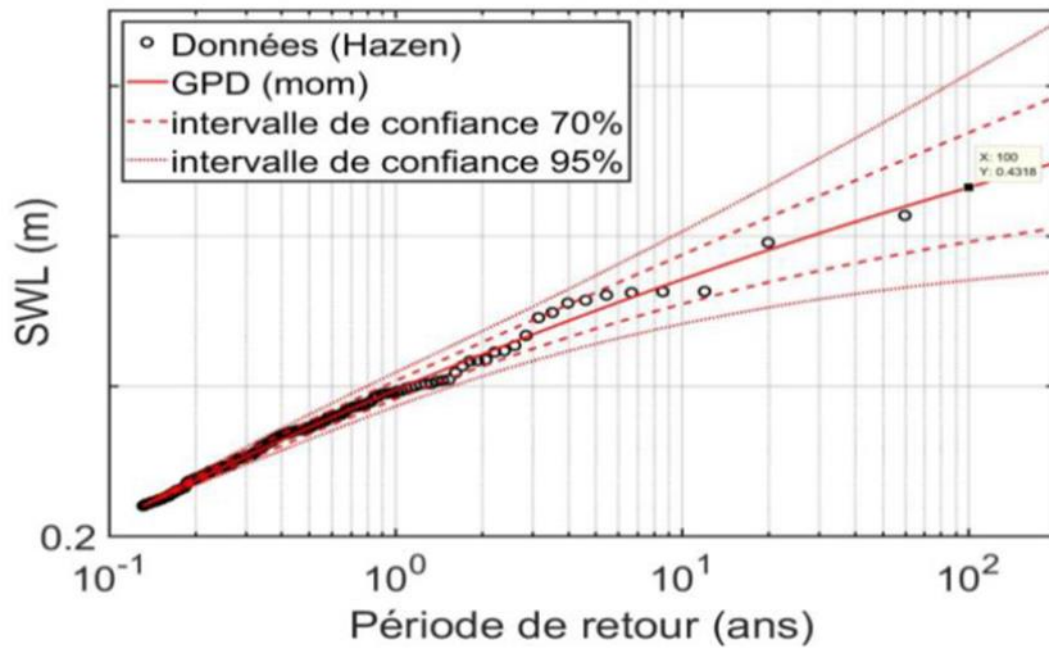


Figure A. 2 : Distribution marginale pour le niveau d'eau (SWL) – point d'extraction CORSE 26. Valeur centennale = 0.4319m ; Loi appliquée : MOM ; Seuil $u = 0.22m$; Nombre d'événements/an : ~8.

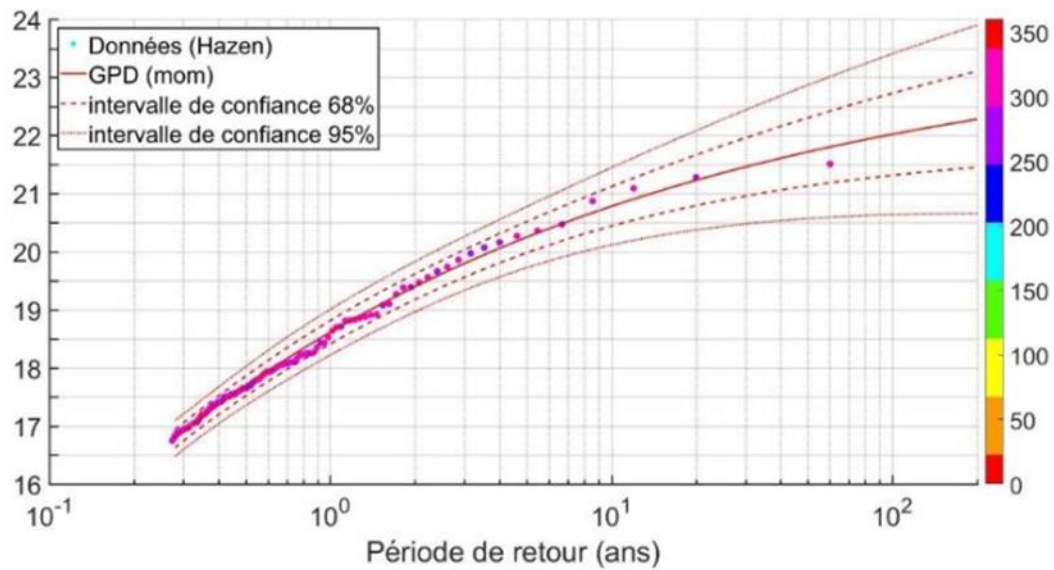
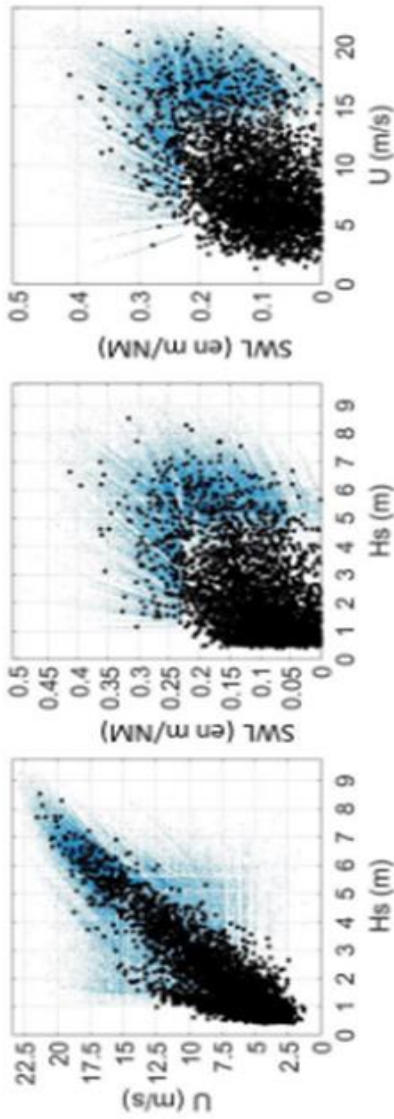


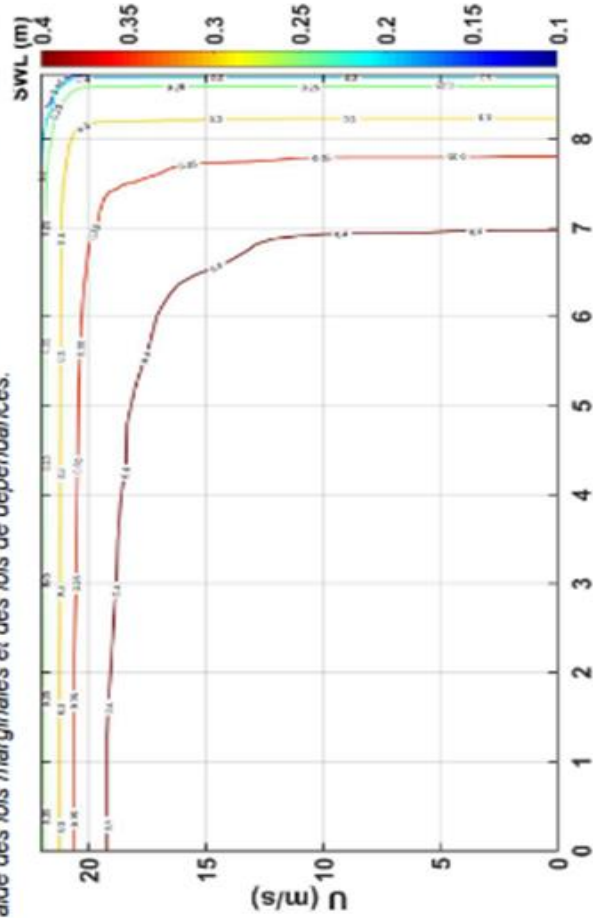
Figure A. 3 : Distribution marginale pour les vitesses de vents (U) au point d'extraction NWW3 465. Valeur centennale = 22.02m/s ; Loi appliquée : MOM ; Seuil $u = 16.74m/s$; Nombre d'événements/an : 3.7.

Scénario	Hs (m)	U (m/s)	U _p (s)	SWL (m/NM)
1	8.52	21.44	11.44	0.15
2	8.65	21.25	13.5	0.15
3	8.68	20.92	13.5	0.15
4	8.79	21.81	13.38	0.15
5	8.28	21.8	11.28	0.15
6	8.05	21.75	11.18	0.15
7	8.46	21.42	11.41	0.2
8	8.87	21	13.5	0.2
9	8.69	20.05	13	0.2
10	8.27	21.48	13.34	0.2
11	8.01	21.89	11.17	0.2
12	7.94	21.93	13.13	0.2
13	8.37	21.17	11.39	0.25
14	7.91	21.63	13.17	0.25
15	8.17	21.47	11.23	0.25
16	7.6	21.75	11.12	0.25
17	8.52	20.75	11.44	0.25
18	8.02	20.66	11.2	0.3
19	7.75	20.91	10.95	0.3
20	7.47	21.07	10.85	0.3
21	8.14	20.19	13.28	0.3
22	8.2	19.16	11.28	0.3
23	6.15	20.73	10.88	0.35
24	7.30	19.17	10.69	0.35
25	7.03	19.59	10.71	0.35
26	6.45	20.11	10.6	0.35
27	7.48	18.54	11.05	0.35
28	7.64	16.74	11.18	0.35
29	6.12	16.84	10.83	0.4
30	5.34	17.83	10.21	0.4
31	5.87	17.21	10.57	0.4
32	6.33	16.27	10.29	0.4
33	6.62	13.84	10.43	0.4
34	6.92	10.49	11.04	0.4
35	5.07	18.11	10.29	0.4

Valeurs des paramètres de vagues (Hs et T_p), de vent (U) et de niveau d'eau (SWL en m/NM) au large pour 35 combinaisons centennales au couple NWW3 465 CORSE 26.

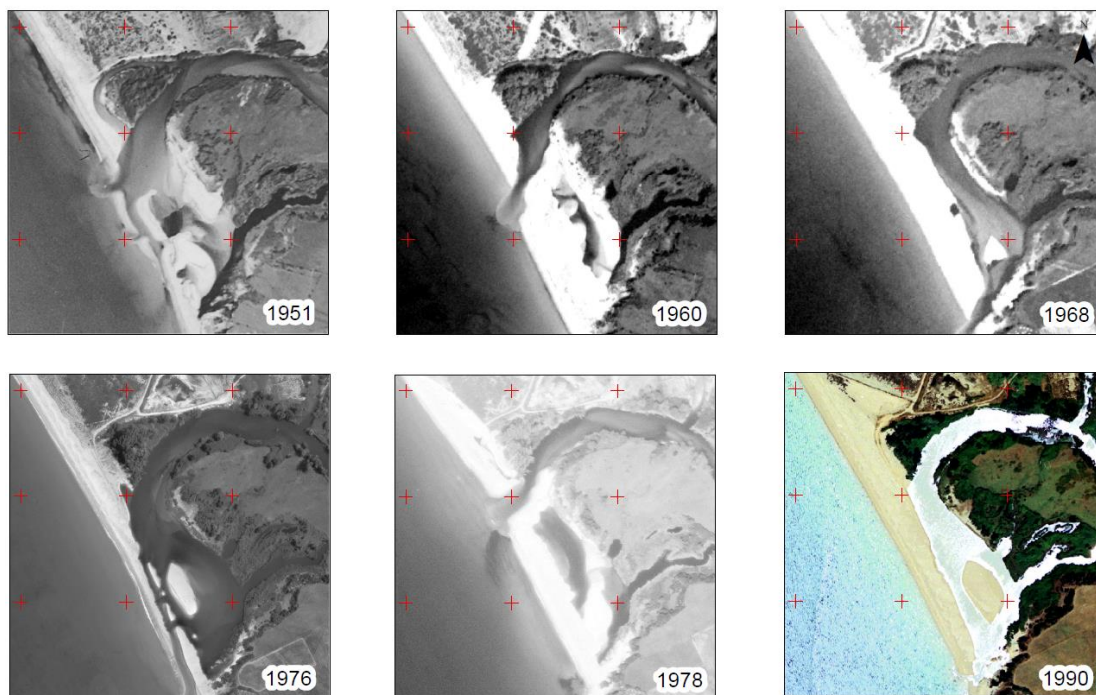


Combinaisons (Hs ; SWL ; U) observées (points noirs) et ceux simulées (points bleus) par méthode Monte-Carlo à l'aide des lois marginales et des lois de dépendances.

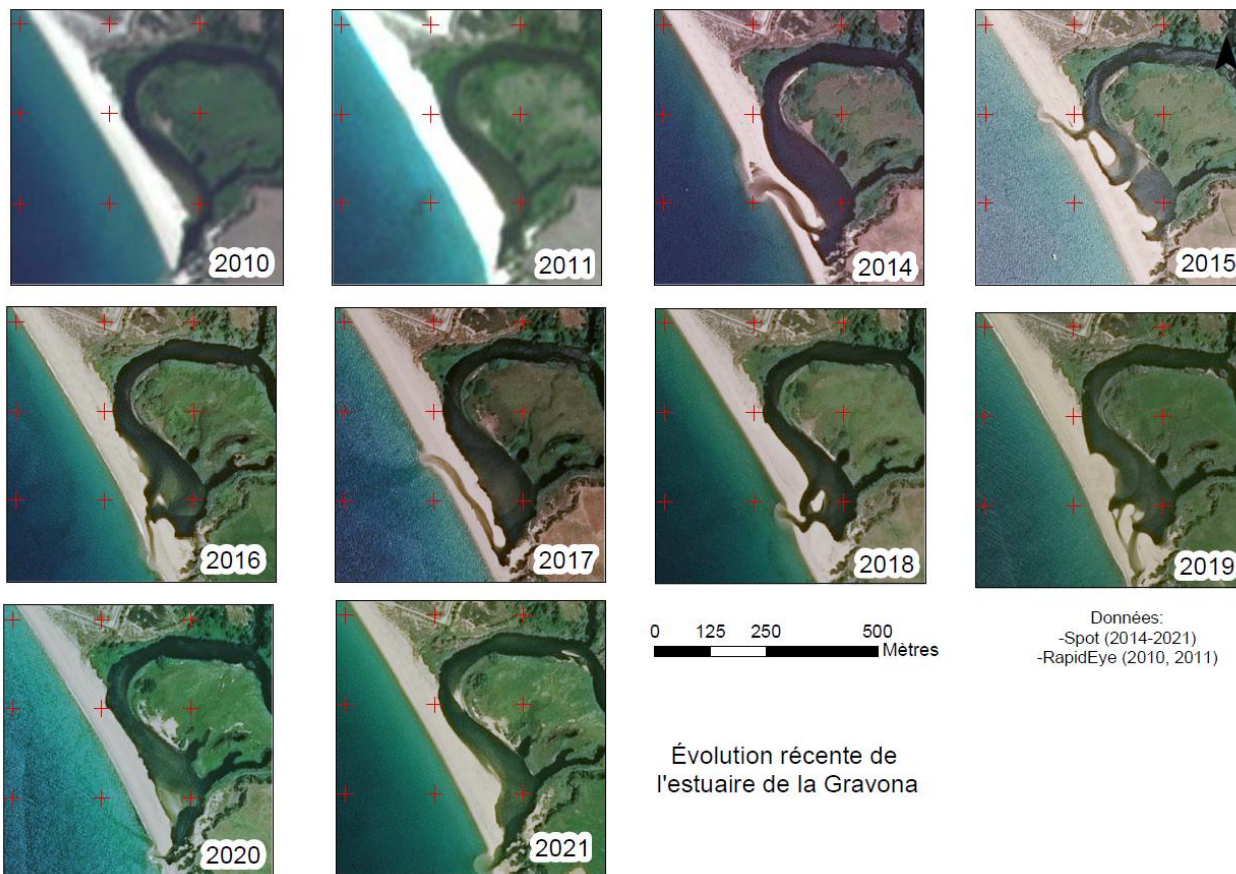


Représentation 2D de l'iso-contour d'iso-période de retour de dépassement conjoint centennale (voir représentation en 3D sur la figure précédente). Les valeurs sur les courbes sont les valeurs de niveau marin SWL.

Annexe 3 Evolution de l'estuaire de La Gravona



Évolution historique de l'estuaire de la Gravona



Évolution récente de l'estuaire de la Gravona



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale de Corse

Immeuble Agostini, Zone Industrielle de Furiani

20600 Bastia

Tél. : 04 95 58 04 33

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm