



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Caractérisation de la dynamique de la submersion sur les secteurs de la CAB et de la CCMG

Rapport Final

BRGM/RP-72406-FR

Version 1 du 7 novembre 2025

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

BRGM

Ce rapport a été vérifié le 28/10/2025 et approuvé le 07/11/2025 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 <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : Submersion marine, modélisation numérique, évènement centennal, Communauté d'Agglomération de Bastia, Communauté de Communes Marana Golo

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

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

© BRGM, 2025, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
M-P2-12 – 02/10/2025

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 de Bastia et du cordon littoral du Lido de la Marana, aux franchissements de paquets de mer. La cartographie des Zones Basses Potentiellement Exposées aux Submersions Marines (ZBPESM, Rapport BRGM/RP-69915-FR, 2021) a permis d'identifier les zones exposées aux débordements, en particulier autour de l'étang de Biguglia qui représente une vaste zone lagunaire. 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 tel 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 Haute-Corse.

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 de Bastia et de Ville-Di-Pietrabugno ont été considérés pérennes. Comme défini en concertation avec la DDT de Haute-Corse, 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 sur le pourtour de l'étang de Biguglia et au niveau des embouchures des cours d'eau (communes de San-Martino-di-Lota et de Santa-Maria-di-Lota) sous l'effet des débordements ainsi que dans le centre-ville de Bastia sous l'effet des franchissements de paquets de mer (quai des Martyrs et abords de la place Saint-Nicolas). 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 (communes de San-Martino-di-Lota et de Santa-Maria-di-Lota, route territoriale T11 de Bastia, par exemple). La totalité du cordon littoral du Lido de la Marana est exposé à des franchissements de paquets de mer, conduisant à l'inondation de zones basses situées en arrière. Ce constat conforte l'importance du rôle de protection naturelle que représente la dune dont l'état de conservation est par endroit très dégradé (cf. rapports du Réseau d'Observation du Littoral de Corse, quartiers résidentiels Maraninca à Borgo, Mariana à Lucciana).

Les résultats de cette étude ont vocation à être intégrés à un Plan de Prévention des Risques Littoraux ainsi que dans le Programme d'Actions de Prévention des Inondations de la Communauté de Communes Marana Golo. C'est pourquoi les couches d'aléa ont été mises au format exploitable dans un Système d'Information Géographique selon le modèle du Géostandard Risque du Conseil National de l'Information Géolocalisée. L'atlas cartographique a été produit à une échelle 1/5 000^{ème}.

Sommaire

1. Objectifs et cadre de l'étude	13
1.1. Contexte.....	13
1.2. Cadre réglementaire.....	14
1.3. Rappels théoriques sur les phénomènes de submersion marine.....	15
1.3.1. <i>Surélévation temporaire du niveau de la mer (surcote)</i>	16
1.3.2. <i>Chronologie d'un épisode</i>	16
2. Fonctionnement du littoral et principe de la méthode.....	19
2.1. Cadre géographique.....	19
2.2. Contexte géologique et morphosédimentaire	19
2.3. Contexte météo-marin.....	23
2.3.1. <i>Régime climatique global</i>	23
2.3.2. <i>Caractéristiques générales des tempêtes</i>	24
2.3.3. <i>Contexte océanographique</i>	25
2.3.4. <i>Connaissances historiques</i>	27
2.3.5. <i>Conclusion sur les phénomènes naturels et principe de la méthode</i>	31
3. Données topo-bathymétriques.....	33
3.1. Bathymétrie.....	33
3.1.1. <i>Dalles bathymétriques du Shom</i>	33
3.1.2. <i>Produit MNT Bathymétrique de façade de la Corse à 100 m (Shom, 2015)</i>	34
3.2. Topographie	35
3.3. Produit lidar topo-bathymétrique	35
4. Données météo-marines	37
4.1. Niveaux d'eau (swl).....	38
4.2. Vagues.....	38
4.3. Vent	39
5. Evènements de références.....	41
5.1. Rappel de la méthode de calcul des probabilités conjointes.....	41
5.2. Retour d'expérience sur l'approche statique.....	44
5.3. Prise en compte de l'élevation du niveau de la mer.....	45
5.4. Débits des cours d'eau	45
5.5. Cordon littoral et scénario de ruine généralisée.....	49
5.5.1. <i>Cas de l'estuaire du Golo</i>	49
5.5.2. <i>Cas du Grau de Biguglia</i>	50
6. Stratégie de modélisation	53
6.1. Modèle UHAINA.....	54
6.2. Modèle WAVEWATCH3.....	55
6.3. Modèle SWASH	56
6.4. Définition des zones d'étude	56
6.5. Prise en compte des structures locales	57
6.5.1. <i>Identification des éléments structurants de type cours d'eau et routes</i>	57
6.5.2. <i>Ouvrages littoraux et autres éléments identifiés</i>	59
6.5.3. <i>Lignes de contraintes</i>	61
6.5.4. <i>Connexions hydrauliques</i>	62
6.6. Prise en compte de l'occupation du sol et des frottements associés sur le fond	62
6.7. Maillage.....	64
6.7.1. <i>Secteurs de Bastia nord et de Bastia sud</i>	65
6.7.2. <i>Secteur du front de mer de Bastia</i>	66

6.8.	points d'injection et extraction de debits	68
6.9.	Definition des profils.....	70
7.	Validation : Simulation de la tempête Adrian	75
8.	Simulation des événements de référence	79
8.1.1.	<i>Sélection des scénarios les plus impactant par secteur</i>	<i>79</i>
8.1.2.	<i>Exemples de résultats de simulation</i>	<i>80</i>
9.	Cartographie de l'aléa	87
9.1.	Qualification de l'Alea	87
9.2.	Fusion des résultats de modelisation	88
9.3.	Post-traitement geomatique	88
9.4.	Pluvalue par rapport à l'approche « statique »	89
9.4.1.	<i>Amélioration des sous-estimations.....</i>	<i>89</i>
9.4.2.	<i>Amélioration des sur-estimations.....</i>	<i>90</i>
9.5.	Bande de sécurité liée aux chocs mécaniques et projections.....	91
9.6.	Exemples de resultats.....	93
9.7.	Production du SIG et de l'atlas numérique	97
10.	Conclusions	101
11.	Bibliographie	103

Liste des figures

Figure 1 : Localisation de l’emprise de la zone d’étude (©Plan IGN).	14
Figure 2 : Schéma des différentes contributions induites par le passage d’une tempête sur le plan d’eau depuis le large jusqu’au rivage.....	15
Figure 3 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer, débordement, dégradation des ouvrages, ©BRGM).....	17
Figure 4 : Carte géologique de la Haute-Corse (source : Carte géologique de la France 1/250000, 44/45, éditions BRGM). Les terrains aux teintes rougeâtres sont les granits d’âge hercynien, les terrains en beige clair sont les calcaires du miocène, les terrains en vert, rose, marron et bleu corresponde aux formations Alpines, les terrains en blancs correspondent aux formations alluviales quaternaires.....	20
Figure 5 : Côte basse meuble de la Plaine orientale, urbanisée sur la commune de Lucciana à gauche (©Conservatoire du littoral, 2016); Marine de Miomo sur la commune Santa-Maria-Di-Lota à droite (orthophotographie IGN, 2024).	21
Figure 6 : Cellules morphosédimentaires de la Plaine orientale.....	22
Figure 7 : Carte de répartition des vents dominants en Corse.	23
Figure 8 : Roses des vents calculées : au large de Bastia (à gauche) et au large de Calvi (à droite) entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).....	24
Figure 9 : Roses des vagues calculées : au large de Bastia (en haut) et au large de Calvi (en bas) entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).....	25
Figure 10 : Paramètres de la houle au large de Bastia entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).	26
Figure 11 : Paramètres de la houle au large de Centuri entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).	26
Figure 12 : Illustration des franchissements de paquets de mer Quai des Martyrs à gauche, Allée du 173 ^{ème} RI à droite, le 29/10/2018 (Bastia, Source Facebook).	28
Figure 13 : Figures sédimentaires et dégâts témoignant de l’action des vagues (31/10/2018), Plage de Moriani à gauche (commune de San Nicolao), Plage de Tavignano Padulone à droite (commune d’Aléria).	28
Figure 14 : Pression atmosphérique le 29/10/2018 à 12h UTC (Source : www.wetterzentrale.de).	29
Figure 15 : 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).	30
Figure 16 : Paramètres météorologiques et météo-marins mesurés du 23/10/2018 au 05/11/2018 sur la façade est : Hauteur significative de la houle et direction pic des vagues (source : Houlographe d’Alistro, CANDHIS), vitesse du vent et pression atmosphériques (source : Synop MétéoFrance, station de Bastia) et niveau d’eau (source : Marégraphe du SHOM à Solenzara).	30
Figure 17 : Exemple de semis de sondes extraits des dalles bathymétriques du Shom aux abords de Bastia.	33

Figure 18 : Produit MNT Bathymétrique de façade de la Corse à 100 m (Shom, 2015).....	34
Figure 19 : Extrait du produit RGE ALTI® 1 m Corse (IGN).	35
Figure 20 : Extrait du produit Lidar « partie maritime » CORSE–2017-2018 sur le secteur de la Communauté d’Agglomération de Bastia (CAB) et la Communauté de Commune Marana-Golo (CCMG) (Shom - Collectivité de Corse - Dreal Corse, 2020) (Source : Shom).....	36
Figure 21 : Localisation des points d’extraction des données de vagues et vents NWW3 MED (en rose) et de niveaux d’eau MARS_MED_BRGM (en jaune). Les extractions utilisées sur les secteurs de la CAB et de la CCMG sont entourées en noir.....	37
Figure 22 : Séries temporelles des conditions météo-marines utilisées pour les analyses au couple NWW3 593/ CORSE 53, et issues de l’étude des ZBPESM (BRGM/RP-69915-FR).....	38
Figure 23 : Rose des vagues au point NWW3 593.....	39
Figure 24 : Rose des vents au point NWW3 593.....	39
Figure 25 : Valeurs des paramètres de vagues (Hs et Tp), de vent (U) et de niveau d’eau (SWL en m/NM) au large de Bastia (point NWW3 593 / CORSE 53). En vert, les combinaisons menant à des franchissements ; en fuchsia celles menant à des franchissements/débordements.....	43
Figure 26 : Extrait de la carte des Zones Basses Potentiellement Exposées aux Submersions Marines à Bastia (à gauche, rapport RP-69915-FR, 2021) et illustration de la submersion marine par franchissement de paquets de mer à Bastia lors de la tempête Adrian (29/10/2018, image de droite).	44
Figure 27 : Recommandations pour la prise en compte de l’élévation du niveau de la mer en lien avec le changement climatique (MEDDE, mai 2014).	45
Figure 28 : Images satellite de l’évolution de l’estuaire du Golo entre 2010 et 2021. Les flèches oranges indiquent la configuration d’ouverture de l’embouchure pour le scénario de référence.	49
Figure 29 : MNT de l’estuaire du Golo (Gauche) ; scénario de ruine généralisée par arasement total de cordon sableux, profils avant arasement en rouge et après arasement en vert (Droite).	50
Figure 30 : Images satellite de l’évolution du Grau de Biguglia entre 2010 et 2021. La flèche orange indique la configuration d’ouverture de l’embouchure pour le scénario de référence....	50
Figure 31 : MNT du grau de Biguglia (Gauche) ; scénario de ruine généralisée par arasement total de cordon sableux, profils avant arasement en rouge et après arasement en vert (Droite).	51
Figure 32 : Schéma de la stratégie de modélisation.....	54
Figure 33 : Emprise spatiale des trois grilles de calcul utilisées. En rouge : la frontière pour le secteur de Bastia nord. En vert : la frontière pour le secteur du front de mer de Bastia. En bleu : la frontière pour le secteur de Bastia sud.	57
Figure 34: Eléments linéaires structurants identifiés sur la BD Topo et par analyse sur le terrain. Zoom sur la zone d’étude.....	58
Figure 35 : Passage identifié connecté à la plage et à l’étang. Les parcelles adjacentes sont en zones basses. Prise de vue 03/2021. Les croix noires entourées en rouge représentent des prises de vue ou des notes géoréférencées.	58
Figure 36 : Murets arasés pour le scénario de ruine généralisée.	59
Figure 37 : Ouvrages sélectionnés dans la base ouvrages du Cerema ainsi que dans la base construite par le BRGM. Zoom sur la zone d’étude.	60

Figure 38 : Panel de certains ouvrages ou défenses recensés dans la base Cerema et l'inventaire BRGM.	60
Figure 39 : Utilisation des lignes de contrainte pour les trois modèles : (a) secteur de Bastia sud ; (b) secteur du front de mer de Bastia ; (c) secteur de Bastia nord.	61
Figure 40 : Exemples de connections hydrauliques sur la route territoriale T11 à Bastia.	62
Figure 41 : (a) Données d'occupation du sol OCS-GE v1.1 ; (b) Coefficient de frottement (Manning en $s/m^{1/3}$).	63
Figure 42 : Maillage de calcul réalisé pour le secteur de Bastia nord avec un zoom sur la zone du littoral de Miomo (c).	65
Figure 43 : Maillage de calcul réalisé pour le secteur de Bastia sud avec un zoom sur l'embouchure de l'étang de Biguglia (c) et l'estuaire du Golo (d).	66
Figure 44 : maillage de calcul réalisé pour le secteur du front de mer de Bastia avec zoom sur le Vieux Port (c) et le Port Toga (d).	67
Figure 45 : Points d'injection des débits des rivières prises en compte dans le modèle du secteur de Bastia sud : 1. Corbaia, 2. San Pancrazio, 3. Santa Agata, 4. San Lorenzo, 5. Bevinco, 6. Figareto, 7. Rassignani, 8. Mormorana, 9. Golo.	68
Figure 46 : Points d'injection des débits des rivières prises en compte dans le modèle du secteur du front de mer de Bastia : 10. Toga, 11. Fiuminale, 12. Tunnel du Vieux Port, 13. Guadello... ..	69
Figure 47 : A gauche, image de l'entrée du tunnel du Vieux Port de Bastia. A droite, en bleu claire son parcours.	70
Figure 48 : Points d'injection des débits des rivières prises en compte dans le modèle du secteur de Bastia nord : 14. Arega, 15. Poggiolo, 16. Grigione.	70
Figure 49 : Profils définis dans le secteur de Bastia sud. 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.	72
Figure 50 : Profils définis dans le secteur du front de mer de Bastia. 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.	73
Figure 51 : Profils définis dans le secteur de Bastia nord.	74
Figure 52 : Illustration des 2 types de profils, A : segmentation du linéaire côtier, calcul des débits franchissant par SWASH (en bas) pour une injection dans Uhaina ; B : calcul de la submersion directement avec SWASH.	74
Figure 53 : Série temporelle des forçages météo-marins utilisés pour simuler la submersion générée par la tempête ADRIAN.	75
Figure 54 : Simulation des hauteurs significatives maximales des vagues et de leur direction de propagation (flèches) lors de la tempête ADRIAN sur le front de mer de Bastia.	76
Figure 55 : Niveaux maximaux du plan d'eau simulés sur le front de mer de Bastia : Quai des Martyrs à gauche et Allée du 173 ^{ème} RIM à droite. Traits jaunes : profils SWASH.	77
Figure 56 : Niveaux maximaux du plan d'eau simulés au nord du Lotissement Plage de la Marana. Traits jaunes : profils SWASH. Points noirs : observations des hautes de mer pour ADRIAN. .	77
Figure 57 : Exemple de série temporelle des forçages météo-marin obtenus pour le scénario 14.	80

Figure 58 : Zoom sur le secteur du Vieux Port de Bastia, pour le scénario 14 « 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).	82
Figure 59 : Zoom sur le secteur du Vieux Port de Bastia, pour le scénario 14 « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Vitesse de montée des eaux (V_m).....	83
Figure 60 : Zoom sur le secteur du Grau de l'étang de Biguglia, pour le scénario 14 « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Niveau maximal du plan d'eau (SSH_max/NGF, en haut), Hauteur d'eau maximale (H_max, au milieu) et Vitesse d'écoulement maximale (U_max, en bas).....	84
Figure 61 : Zoom sur le secteur du Grau de l'étang de Biguglia, pour le scénario 14 « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Vitesse de montée des eaux (V_m).....	85
Figure 62 : Carte d'alea sur le front de mer de Bastia pour le scenario 14, pour les évènements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite), zoom sur le Vieux Port de Bastia.	86
Figure 63 : Cartes d'aléa pour le scenario 14 pour les évènements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite), zoom sur le grau de l'étang Biguglia.....	86
Figure 64 : Possibilité de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (MEDD, 2004).	87
Figure 65 : Exemple de résultats (à droite) après fusion des sorties du modèle UHAINA (à gauche) et des profils du modèle SWASH (au centre), secteur du quai des Martyrs à Bastia. .	88
Figure 66 : Exemple (pointillés bleus) de petits polygones fusionnés avec les polygones adjacents.	89
Figure 67 : Comparaison entre l'aléa 2100 calculé dans la présente étude (en couleur) et l'emprise des ZBPESM cartographiée dans l'approche « statique » (en noir).	90
Figure 68 : 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 Biguglia (secteur Pineto).	91
Figure 69 : Exemple de bande de sécurité liée aux chocs mécaniques et projections sur le Lido de la Marana (Biguglia).	92
Figure 70 : Exemple de bande de sécurité au niveau de la route territoriale au sud de Bastia, pour l'aléa actuel à gauche et l'aléa 2100 à droite.....	92
Figure 71 : Exemple de bande de sécurité dont la largeur forfaitaire de 25 m est limitée lorsque l'altitude du terrain naturel dépasse 8 m/NGF.	93
Figure 72 : Exemple du secteur de Miomo (commune de Santa-Maria-Di-Lota) pour l'évènement actuel, avec des débordements par l'embouchure du ruisseau de Poggiolo (pointillés rouges) et les franchissements de paquets de mer dominants sur le reste du linéaire (flèches rouges)....	94
Figure 73 : Exemple du secteur du quai des Martyrs à Bastia pour l'évènement actuel, avec des franchissements importants engendrant des vitesses importantes (> 0.5 m/s) et un aléa fort à très fort (pointillés noirs).....	94
Figure 74 : Exemple de submersion marine par débordement sur la rive nord-ouest de l'étang de Biguglia.	95
Figure 75 : Exemple de franchissements de paquets de mer sur le cordon dunaire du Lido de la Marana pour l'évènement actuel. Superposition de la bande de sécurité (hachurée gris) appliquée dans l'approche « statique » (rapport BRGM/RP-69915-FR, 2021).....	96
Figure 76 : Exemple de différence d'emprise de la submersion marine entre l'aléa « actuel » et l'aléa « 2100 », sur le secteur de la route territoriale T11 au sud de Bastia.....	97

Figure 77 : Exemple des champs des shapes d'aléa selon le nouveau Géostandard du CNIG PPR.....	98
Figure 78 : Extension finale des grilles MNT produites sur le secteur la Communauté d'Agglomération de Bastia (CAB) et la Communauté de Commune Marana-Golo (CCMG). ..	108
Figure 79 : Localisation des sources de données topo-bathymétriques exploitées sur l'emprise de la grille MNT à 1 m.	109
Figure 80 : MNT topo-bathymétriques à 1 m de résolution sur le secteur de la Communauté d'Agglomération de Bastia (CAB) et la Communauté de Commune Marana-Golo (CCMG). ..	113

Liste des annexes

Annexe 1	Construction des modèles numériques de terrain (MNT).....	107
Annexe 2	Probabilités conjointes de Hs, SWL et U au couple NWW3 593 / CORSE 53a .	114
Annexe 3	Evolution historique de l'estuaire du Golo et du Grau de Biguglia	117
Annexe 4	Exemple de résultats des simulations	119

1. Objectifs et cadre de l'étude

1.1. CONTEXTE

Avec 1000 km 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).

Sur le littoral de la façade Est de la Corse entre Bastia et l'embouchure du Golo, 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 Haute-Corse (DDT2B) a souhaité qu'une caractérisation de la submersion marine par une approche « dynamique » soit réalisée sur la Communauté d'Agglomération de Bastia (CAB¹) et la Communauté de Commune Marana-Golo (CCMG², 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 (DDT2B, 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 CAB : communes de Santa-Maria-di-Lota, San-Martino-di-Lota, Ville-di-Pietrabugno, Bastia et Furiani

² CCMG : communes de Biguglia, Borgo et Lucciana

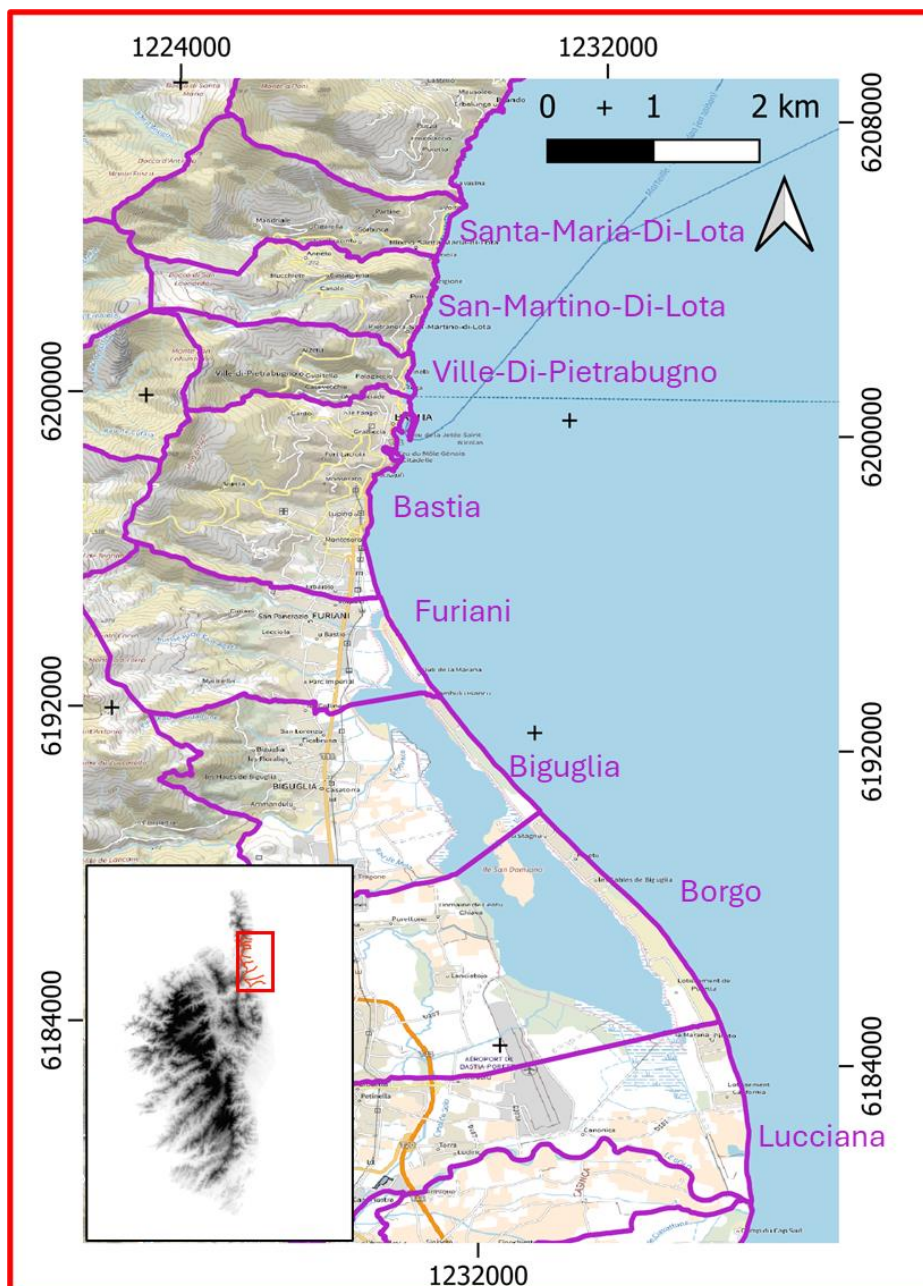


Figure 1 : Localisation de l'emprise de la zone d'étude (©Plan IGN).

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).

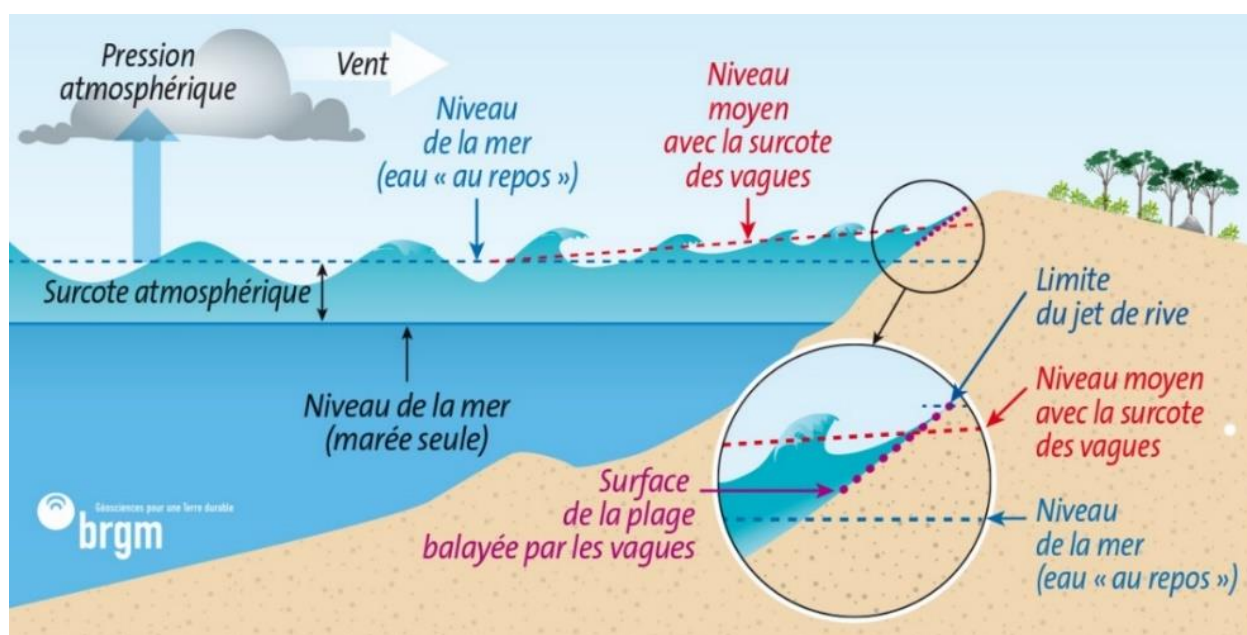


Figure 2 : Schéma des différentes contributions induites par le passage d'une tempête sur le plan d'eau depuis le large jusqu'au rivage.

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.

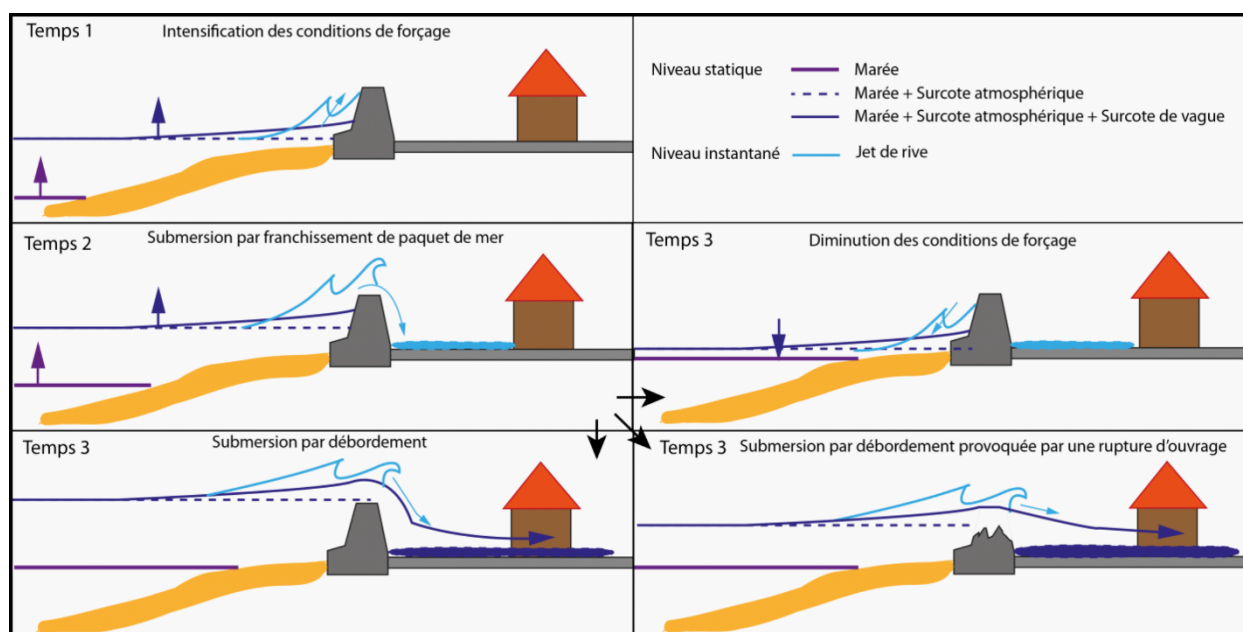


Figure 3 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer, débordement, dégradation des ouvrages, ©BRGM).

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 Haute-Corse sur les communes du sud au nord : Lucciana, Borgo, Biguglia, Furiani, Bastia, Ville-di-Pietrabugno, San-Martino-di-Lota, Santa-Maria-Di-Lota (Figure 1).

2.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET MORPHOSEDIMENTAIRE

La zone d'étude se situe à la transition entre deux des trois grands ensembles géologiques qui se distinguent en Haute-Corse (Figure 4).

Le secteur au sud de Bastia se trouve au sein de l'ensemble constitué par la Plaine orientale qui est une grande plaine alluviale orientée nord sud, alimentée et drainée par plusieurs fleuves prenant leur source et traversant des formations géologiques variées : granitiques, métamorphiques (alternances de schistes, gneiss, etc.) et mantelliques (basalte, serpentinites, etc.). La zone d'étude est limitée au sud par l'un d'eux, le fleuve le plus long de Corse : le Golo (*u Golu*).

Le secteur englobant Bastia et le nord de la zone d'étude appartient à l'ensemble du Cap Corse qui est composé de formations Alpines correspondant à un ensemble de roches métamorphiques « schistes lustrés » (serpentines, gneiss, schistes, etc.).

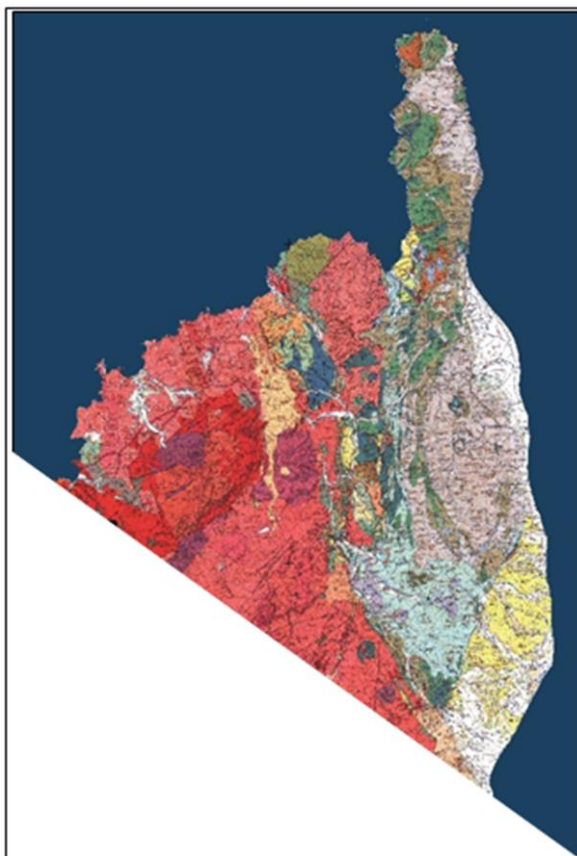


Figure 4 : Carte géologique de la Haute-Corse (source : Carte géologique de la France 1/250000, 44/45, éditions BRGM). Les terrains aux teintes rougeâtres sont les granits d'âge hercynien, les terrains en beige clair sont les calcaires du miocène, les terrains en vert, rose, marron et bleu correspondent aux formations Alpines, les terrains en blancs correspondent aux formations alluviales quaternaires.

La Plaine orientale est une côte basse meuble qui représente un linéaire d'une centaine de kilomètres interrompue par endroit par des embouchures fluviales et lagunaires (Figure 4). Drainant la région montagneuse centrale de la Corse, de nombreux cours d'eau alimentent ce cordon : le Golo, Le Fium'Altu, l'Alésani, l'Alistro, le Fium'Orbo, la Bravona, le Travo et la Solenzara pour les plus importants (Figure 5). Les étangs et lagunes côtières occupant les parties basses de la plaine constituent des zones humides contribuant à l'évolution du cordon : Biguglia, Bravona, Diana, Urbino et Palu.

Le cordon littoral de la Plaine orientale peut être découpé en unités homogènes dont les limites spatiales se distinguent des limites administratives. Il s'agit de portions du littoral délimitées par des ouvrages maritimes et/ou des obstacles naturels (caps, embouchures, etc.) importants au sein desquelles la circulation sédimentaire sous l'action de la dérive littorale se fait de manière autonome par rapport aux portions voisines. Il existe peu ou pas d'échange sédimentaire entre ces unités qualifiées de cellule morphosédimentaire (Stepanian et al., 2010, Balouin et al., 2012, Figure 6). Le secteur sud de la zone d'étude constitue à lui seul une cellule, celle de *Lupino – Golo*.



Figure 5 : Côte basse meuble de la Plaine orientale, urbanisée sur la commune de Lucciana à gauche (©Conservatoire du littoral, 2016); Marine de Miomo sur la commune Santa-Maria-Di-Lota à droite (orthophotographie IGN, 2024).

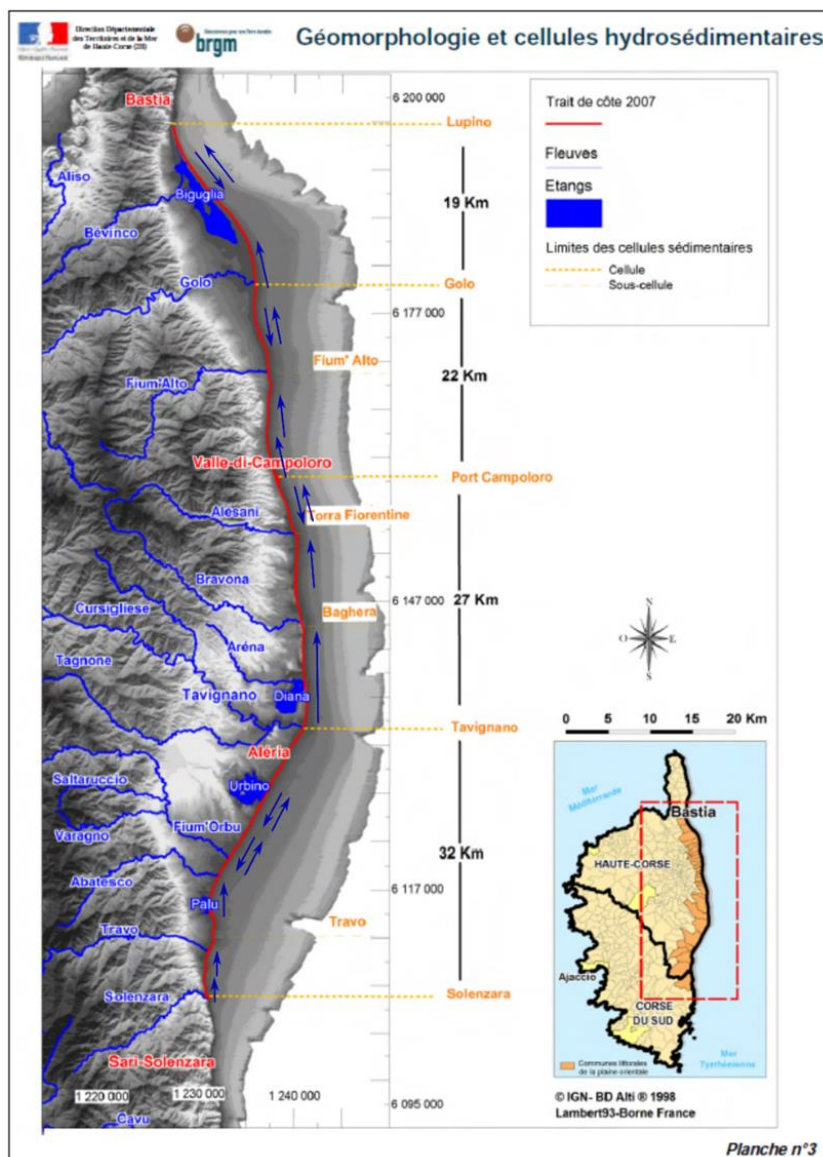


Figure 6 : Cellules morphosédimentaires de la Plaine orientale.

Le reste du littoral de Haute-Corse est rocheux et abrite des plages de sable et/ou de galets accolées à des falaises rocheuses, à toutes les échelles spatiales, depuis les plages de poches isolées dans des criques jusqu'aux plus grandes baies.

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 telle que le site de Miomo avec le ruisseau de Poggiolo par exemple (commune de Santa-Maria-Di-Lota). En arrière de celui-ci se développe généralement une zone humide présentant des intérêts écologiques importants et/ou des aménagements touristiques (Figure 5).

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 (Stéphanian 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).

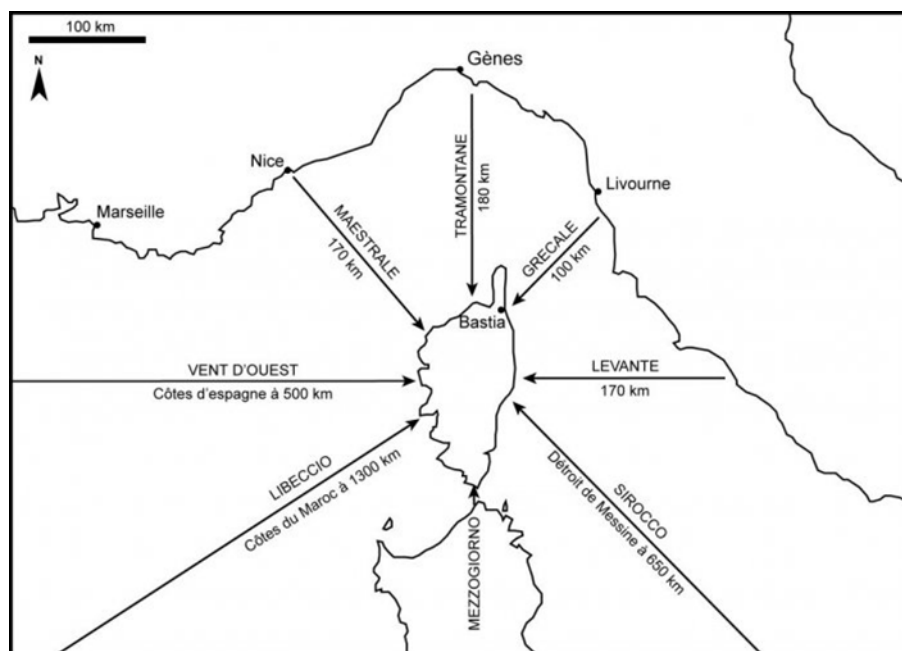


Figure 7 : Carte de répartition des vents dominants en Corse.

Concernant les secteurs de l'étude, la côte ouest de la Haute-Corse est dominée par des vents d'ouest et nord-ouest (Mistral). La côte est est quant à elle dominée par des vents de sud-ouest (Libeccio) et de nord-est (Grecale).

La 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 des points d'extraction au large de Bastia et de Calvi de 1979 à 2010.

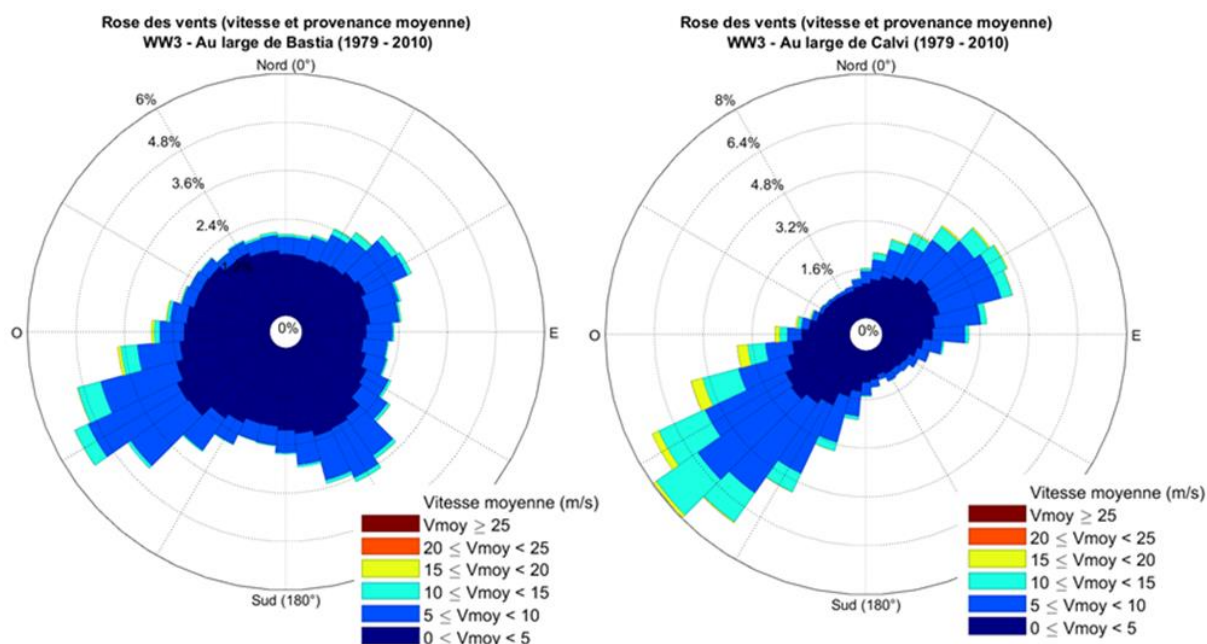


Figure 8 : Roses des vents calculées : au large de Bastia (à gauche) et au large de Calvi (à droite) entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).

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 fetch³ 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, 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.

Sur la côte orientale, les tempêtes génératrices de dommages sur le littoral (associées à des surcotes du niveau moyen de la mer) sont de secteur est. De manière schématique, lorsqu'un anticyclone est situé sur le nord de l'Europe et qu'une dépression se forme sur la Méditerranée, ou remonte vers le nord depuis les côtes nord-africaines, le vent souffle sur la mer Tyrrhénienne. Ce vent est canalisé entre la Corse et l'Italie dans le canal de Corse et s'amplifie par effet Venturi. Ce type d'évènement amène une masse d'air chaud et humide sur la façade orientale de l'île et induit des pluies diluviennes sur l'est (aussi appelés évènement méditerranéen) et un effet de Foehn⁴ sur la façade ouest.

³ Fetch : distance en mer ou sur un plan d'eau au-dessus de laquelle souffle un vent donné sans rencontrer d'obstacle.

⁴ Effet de foehn : Phénomène [météorologique](#) caractérisé par de fortes précipitations sur le versant de la montagne situé au vent et par un vent chaud et sec sur l'autre versant de la montagne.

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 (P_{atm} inférieures à 990hPa), et se déplacent rapidement d'ouest en est sur le bassin méditerranéen.

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 façade est et nord-est de la Corse, les conditions de vagues sont en moyenne relativement peu énergétiques, mais soumises à une forte saisonnalité avec des tempêtes violentes en hiver et des valeurs de H_s ⁹ dépassant chaque hiver les 2m (Figure 10). La direction principale des vagues est sud-est (Figure 9).

Sur la côte ouest et nord-ouest, les conditions de vagues sont bien plus énergétiques, avec des valeurs de H_s dépassant 2m en toute saison et 4m en hiver (Figure 11). La direction principale des vagues est ouest (Figure 9).

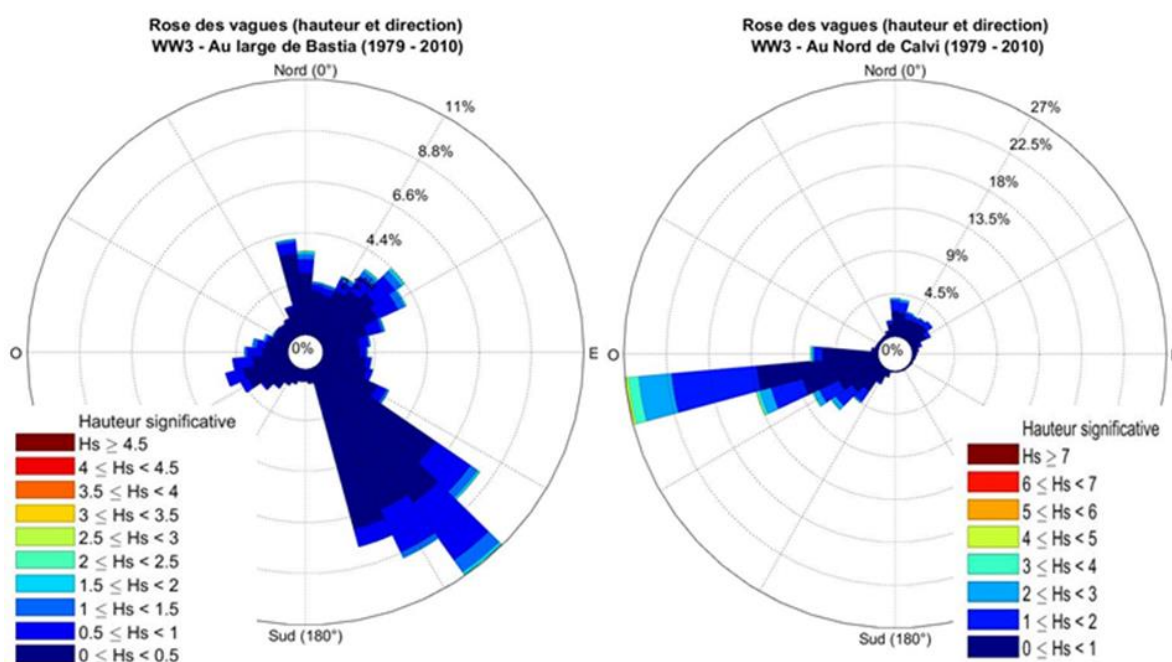


Figure 9 : Roses des vagues calculées : au large de Bastia (en haut) et au large de Calvi (en bas) entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).

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.

⁹ H_s : hauteur significative des vagues en mètre, elle représente la moyenne du tiers supérieur des vagues.

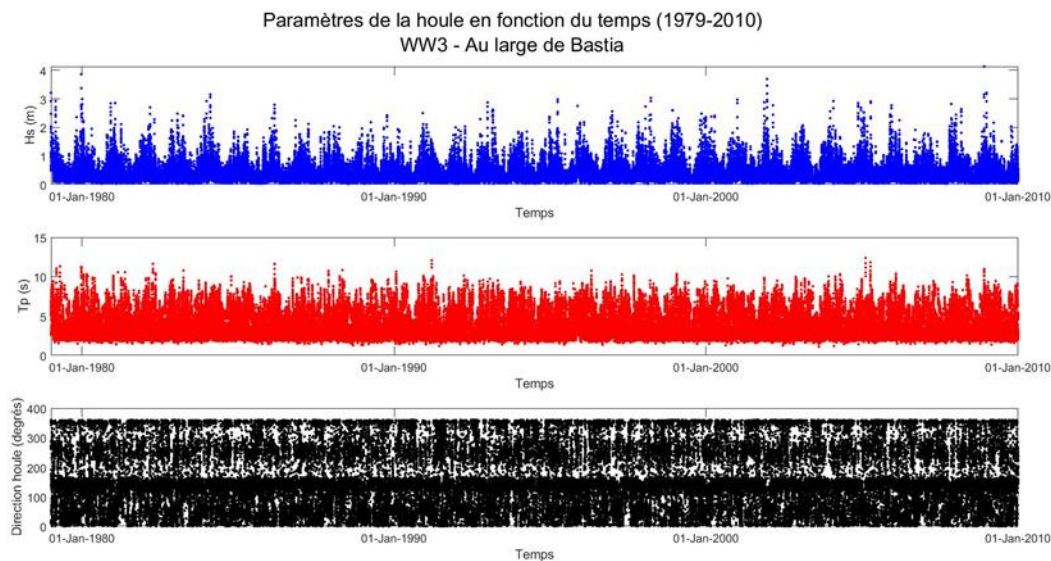


Figure 10 : Paramètres de la houle au large de Bastia entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).

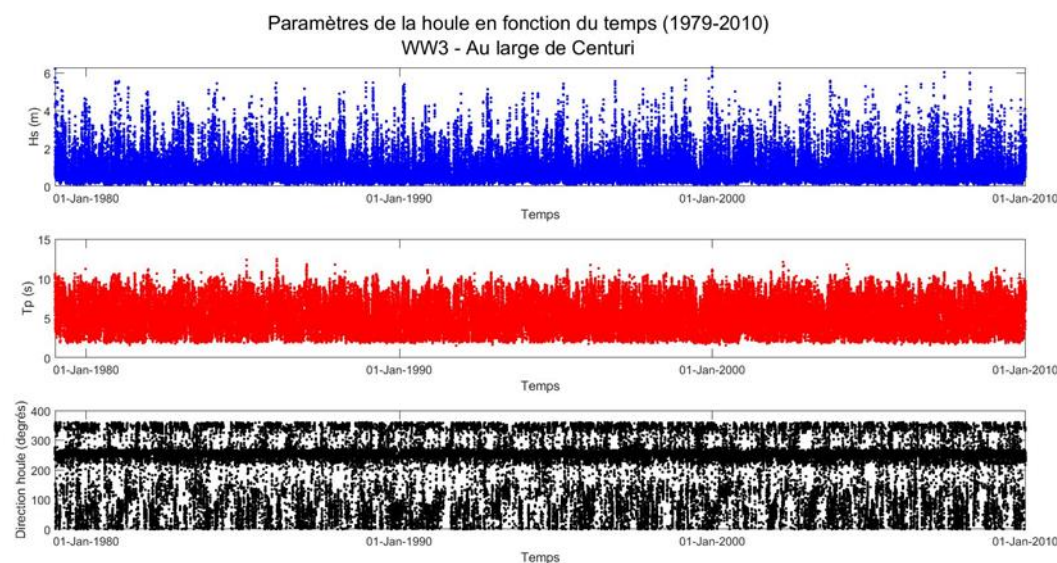


Figure 11 : Paramètres de la houle au large de Centuri entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).

Concernant les courants marins, peu de données existent sur les eaux bordants la Corse et elles restent très générales. Des courants de densité sont toutefois identifiés sur la façade orientale. Ces courants de profondeur sont engendrés par les différences de températures des masses d'eau. Ainsi, un courant de densité du nord vers le sud est identifié le long de la plaine orientale. Ce courant de « profondeur » longe la pente de la plateforme continentale et décroît rapidement à l'approche des côtes, son influence sur le littoral est négligeable (Pluquet, 2006).

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. Le long du Lido de la Marana, la dérive littorale est principalement orientée du sud vers le nord car les vagues dominantes

viennent du sud-est. Au nord de Bastia, la côte rocheuse est interrompue par endroit, par des plages de poche qui représentent des cellules sédimentaires quasi-closes. La dérive littorale y est matérialisée par une rotation de plage 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 entraîneront un déplacement vers le nord de la plage.

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 et Figure 11), peu d'articles dans les médias ou sur les bases de données de catastrophes naturelles témoignent de leurs impacts. Même si le secteur de Bastia est bien documenté, il n'existe pas de témoignage dans les médias pour la majorité des pics de hauteur significative des vagues supérieures à 2 m. Il est donc compliqué de déduire en termes d'impacts pour chaque événement marquant, un caractère généralisé à la Haute-Corse ou bien seulement localisé au niveau de secteurs plus exposés. Une quinzaine d'événements majeurs survenant en Haute-Corse 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 (Figure 12 – Bastia et Figure 13 – côte orientale). 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 constatés sur plusieurs sites, notamment sur le front de mer de Bastia et en différents endroits sur la Plaine orientale. Sur la façade ouest, aucun témoignage de submersion marine n'a été enregistré.

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 14). Des rafales dépassant 130 km/h sont enregistrées dans l'après-midi, une pointe de 188 km/h est observée au Cap-Corse.



Figure 12 : Illustration des franchissements de paquets de mer Quai des Martyrs à gauche, Allée du 173^{ème} RI à droite, le 29/10/2018 (Bastia, Source Facebook).



Figure 13 : Figures sédimentaires et dégâts témoignant de l'action des vagues (31/10/2018), Plage de Moriani à gauche (commune de San Nicolao), Plage de Tavignano Padulone à droite (commune d'Aléria).

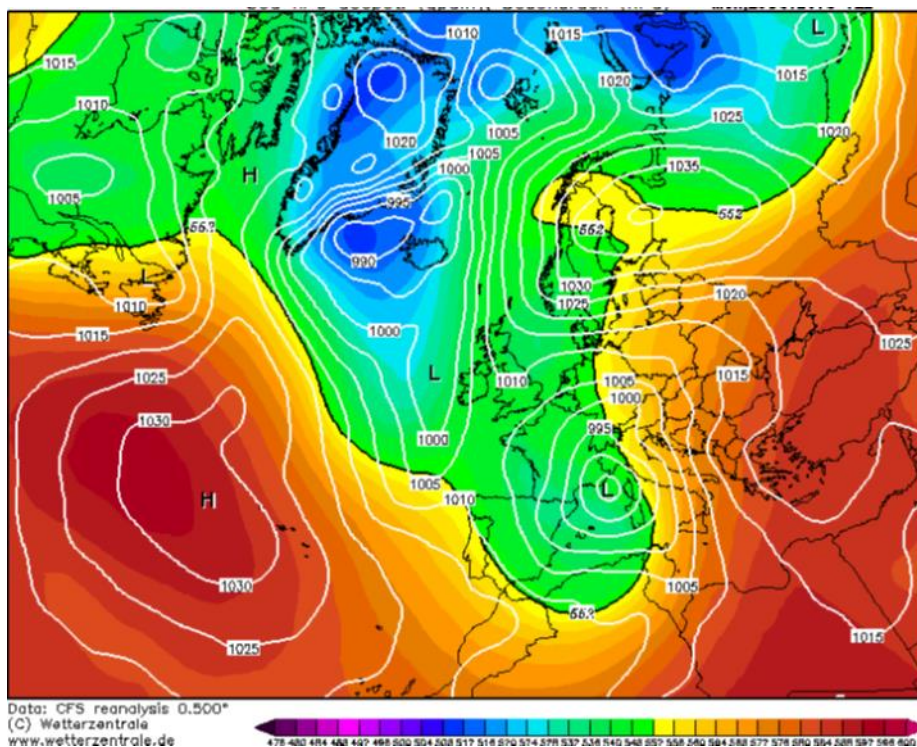


Figure 14 : Pression atmosphérique le 29/10/2018 à 12h UTC (Source : www.wetterzentrale.de).

L'impact considérable de cette tempête provient de la conjonction de plusieurs facteurs environnementaux simultanés. La Figure 15 et la Figure 16 présentent 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), respectivement pour la façade ouest et la façade est.

Sur 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 événement, avec une très forte dépression (980 hPa).

Sur la façade est, la hauteur significative de la houle atteint 5 m et les houles sont de secteur sud-est (houlographe d'Alistro). La vitesse du vent moyen enregistrée à la station de Bastia atteint 60 km/h lors de cet événement, avec une très forte dépression (980 hPa). Un niveau d'eau particulièrement élevé a été mesuré au marégraphe de Solenzara à 0,65 m/NGF (soit 1,129 m/ZH, le 29/10/2018 à 12h).

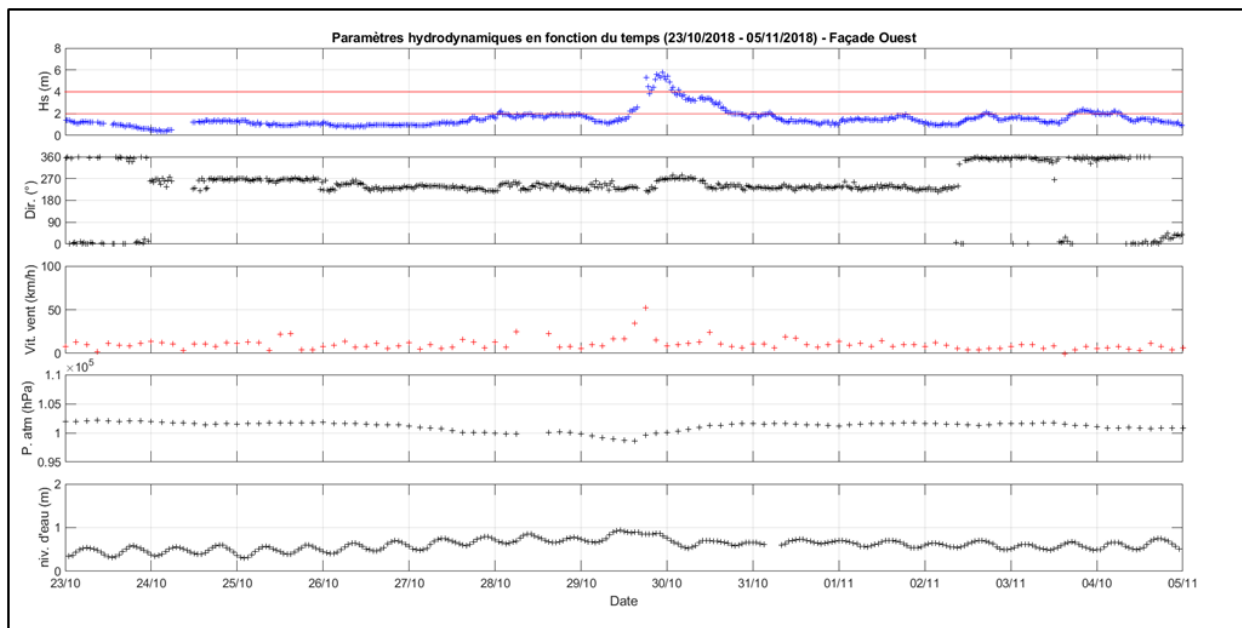


Figure 15 : Paramètres météorologiques et météo-marins mesurés du 23/10/2018 au 05/11/2018 sur la façade ouest : Hauteur significative de la houle et direction pic des vagues (source : Houlographe de la Revellata, CANDHIS), vitesse du vent et pression atmosphériques (source : Synop MétéoFrance, station d’Ajaccio) et niveau d’eau (source : Marégraphe du SHOM à Ajaccio).

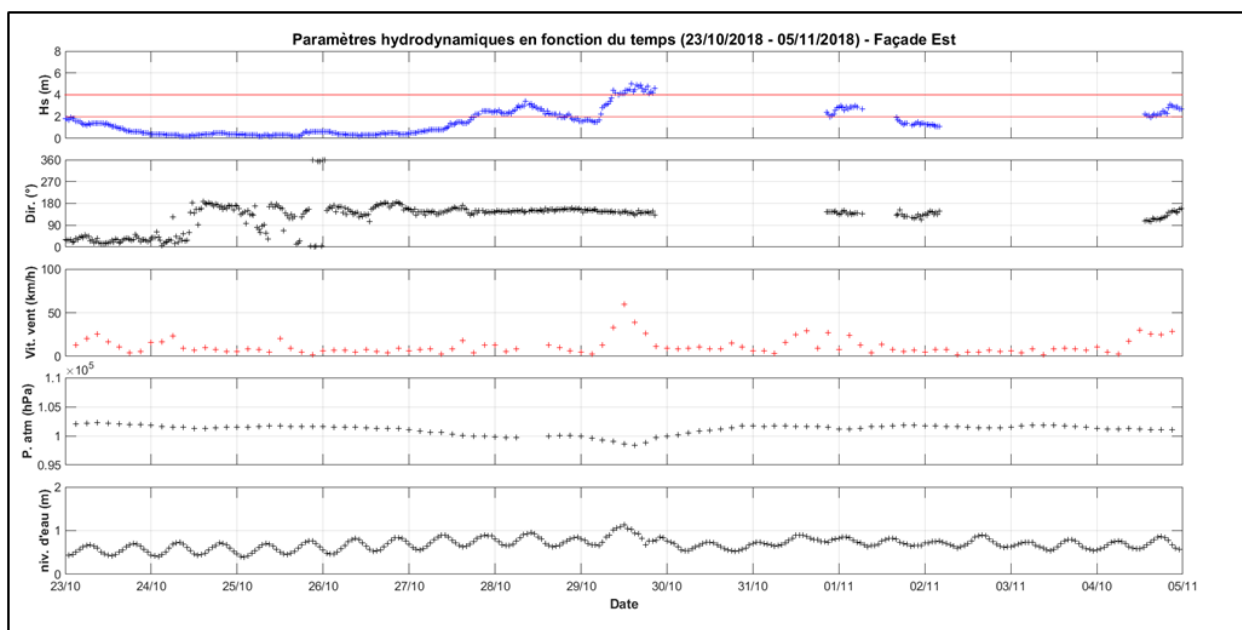


Figure 16 : Paramètres météorologiques et météo-marins mesurés du 23/10/2018 au 05/11/2018 sur la façade est : Hauteur significative de la houle et direction pic des vagues (source : Houlographe d’Alistro, CANDHIS), vitesse du vent et pression atmosphériques (source : Synop MétéoFrance, station de Bastia) et niveau d’eau (source : Marégraphe du SHOM à Solenzara).

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

L'approche historique sur les 40 dernières années et l'analyse des bases de données météorologiques 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 inverse¹⁰. Cette surcote atmosphérique peut atteindre 25 cm comme ce fut le cas lors de la tempête des 27-28 novembre 2008 (Météo France, 2008).

Pourtant, 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. D'autre part, aucune submersion marine par rupture d'ouvrage ou brèche dans le cordon dunaire n'a été recensée (hormis dans la zone portuaire de Cargèse lors de la tempête des 27-29 décembre 2017).

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 Haute-Corse.

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 pour plus de détails) : 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 DDT2B, la CAB et la CCMG sur les scénarios à considérer (configuration géomorphologique des embouchures, modalités de prise en compte des structures de protection et des connexions hydrauliques, cf. paragraphes 5.5 et 6.5).

Afin de prendre en compte la conjonction de submersion marine et de crue, le choix de la période de retour des débits fluviaux (Q) du Golo et des cours d'eau côtiers a été fait en concertation avec la DDT2B, la CAB et la CCMG 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 précitée (06/07/2018) 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).*

¹⁰ 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 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 17). 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 techniques d'acquisition.

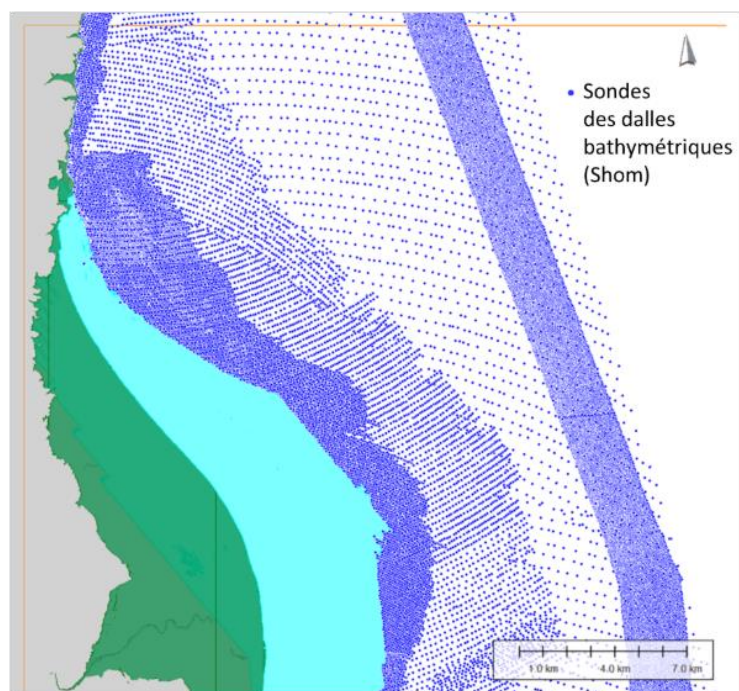


Figure 17 : Exemple de semis de sondes extraits des dalles bathymétriques du Shom aux abords de Bastia.

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 WGS84¹¹.

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 18). 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.

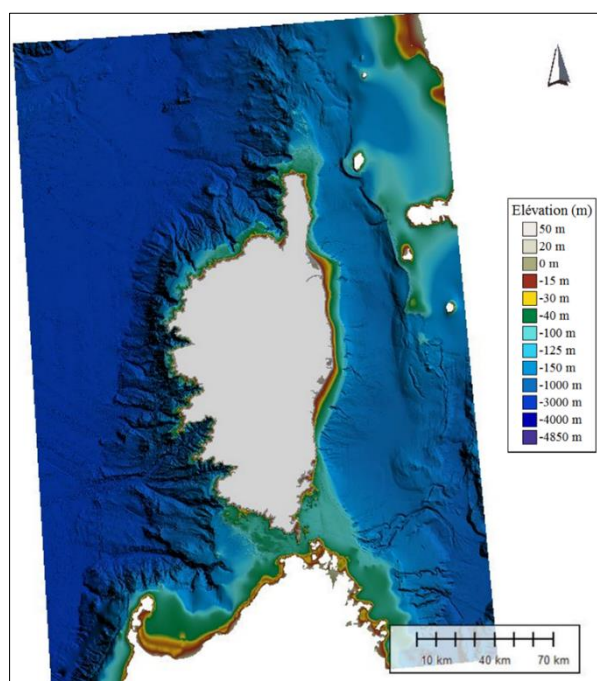


Figure 18 : Produit MNT Bathymétrique de façade de la Corse à 100 m (Shom, 2015).

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 WGS84¹².

¹¹ Spécifications techniques externes des dalles bathymétriques du Shom : https://diffusion.shom.fr/media/wysiwyg/pdf/specs_externes_dalles_bathymetriques_2015_1.pdf

¹² 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 19). 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.

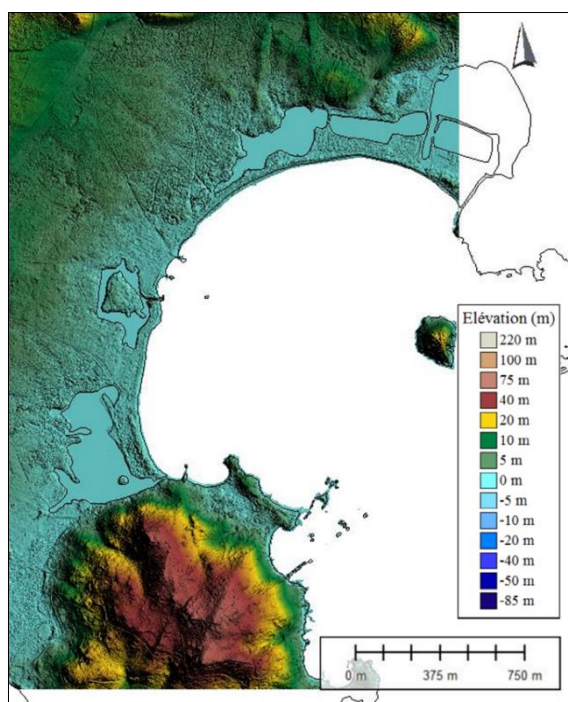


Figure 19 : Extrait du produit RGE ALTI® 1 m Corse (IGN).

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 20). 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.

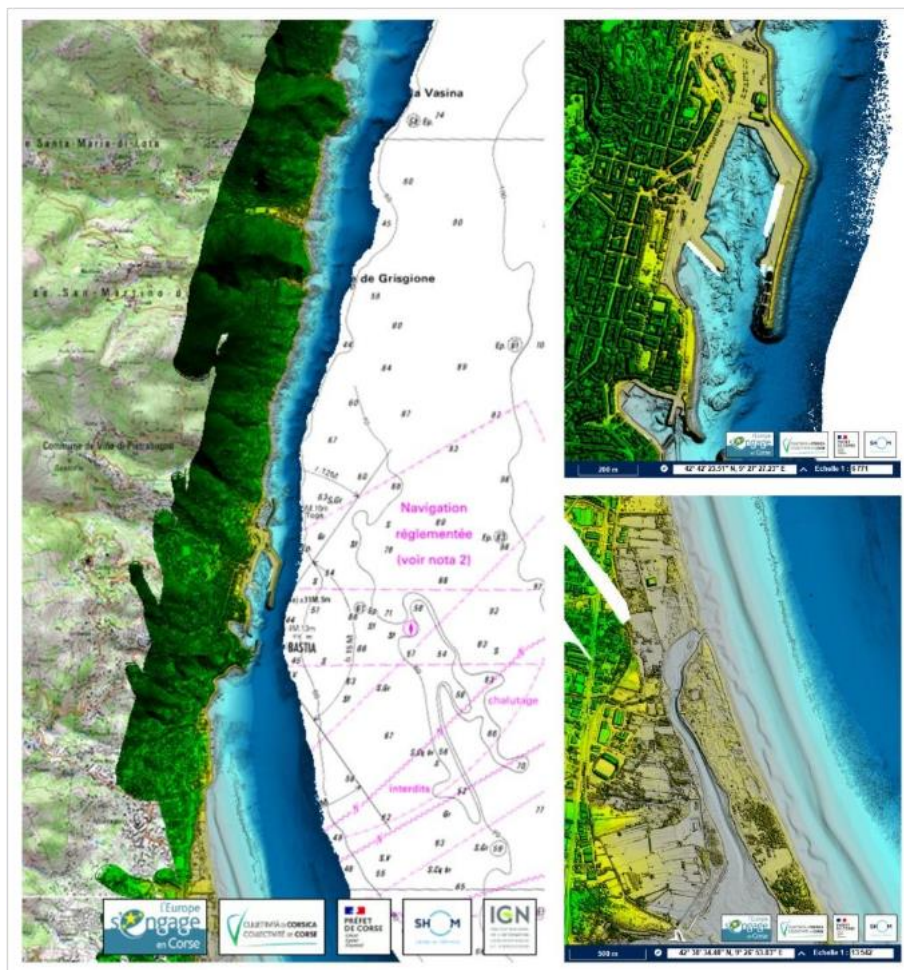


Figure 20 : Extrait du produit Lidar « partie maritime » CORSE–2017-2018 sur le secteur de la Communauté d'Agglomération de Bastia (CAB) et la Communauté de Commune Marana-Golo (CCMG) (Shom - Collectivité de Corse - Dreal Corse, 2020) (Source : Shom).

Ces données proviennent de produits géographiques acquis par lidars topographique, topobathymétrique 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.

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 terre¹³. 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.

¹³ 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.

Les points d'extraction des données météo-marines utilisés sont présentés sur la Figure 21 :

- 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 593.
- 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 53.

Dans l'étude portant sur les ZBPESM en Haute-Corse, ce couple de points a été sélectionné afin de générer des événements centennaux de vagues, niveaux et vents forçant les modèles numériques pour l'emprise élargie de Bastia (cf. rapport BRGM/RP-69915-FR).

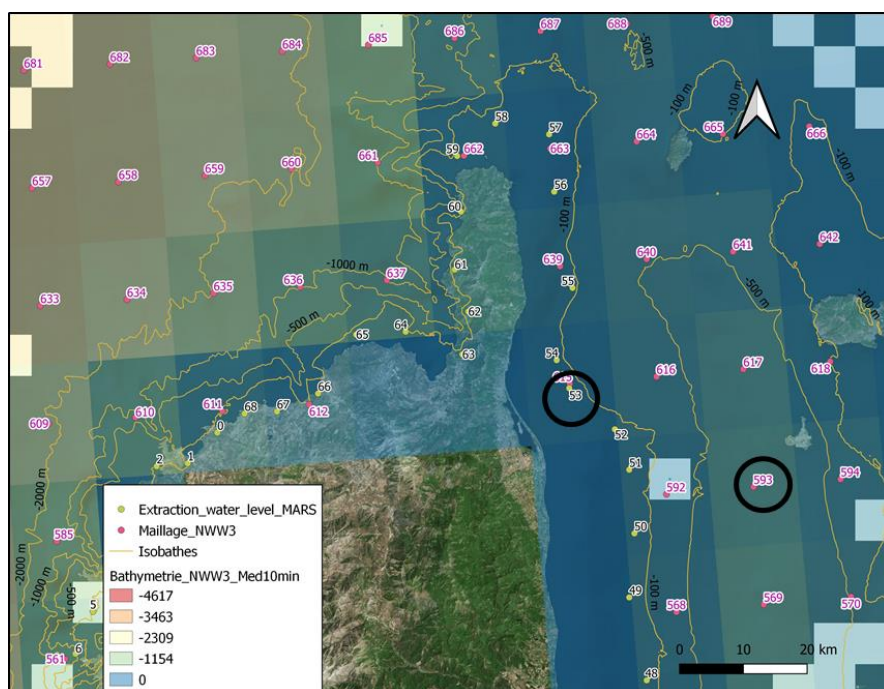


Figure 21 : Localisation des points d'extraction des données de vagues et vents NWW3 MED (en rose) et de niveaux d'eau MARS_MED_BRGM (en jaune). Les extractions utilisées sur les secteurs de la CAB et de la CCMG sont entourées en noir.

Les séries temporelles des données extraites pour le couple NWW3 593/CORSE 53 sont présentées à la Figure 22 et décrites dans les paragraphes suivants.

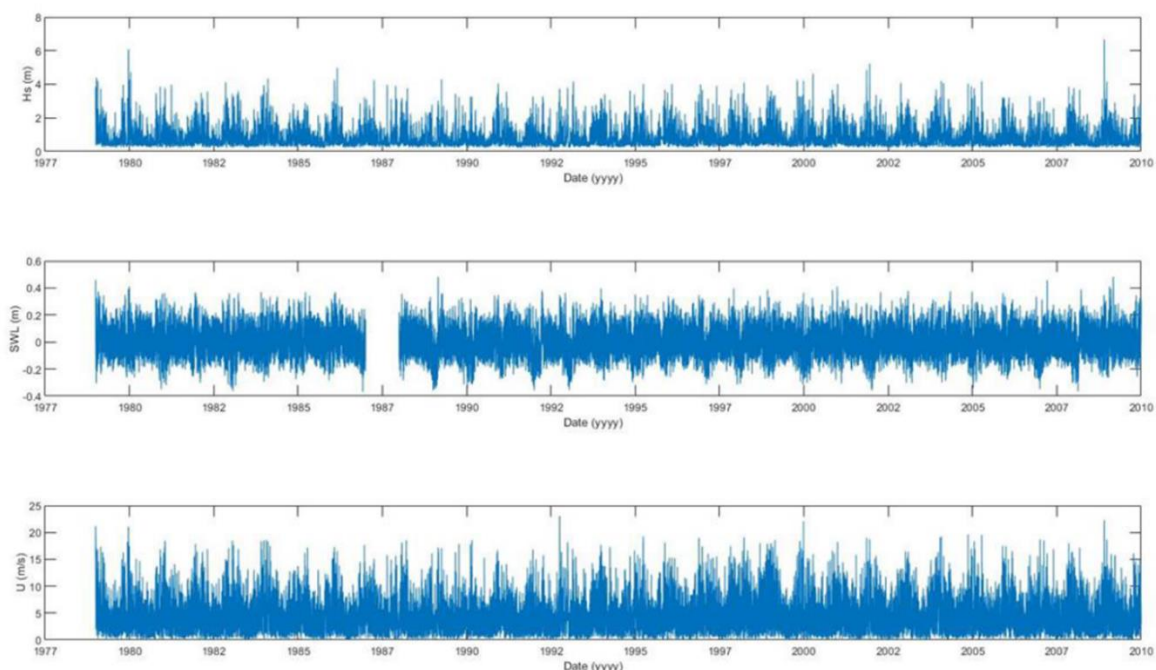


Figure 22 : Séries temporelles des conditions météo-marines utilisées pour les analyses au couple NWW3 593/ CORSE 53, et issues de l'étude des ZBPESM (BRGM/RP-69915-FR).

4.1. NIVEAUX D'EAU (SWL)

La série temporelle de niveaux d'eau au repos ou *Still Water Level* SWL, 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 22, 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 22, haut).

Ces données sont caractérisées par un biais négatif, corrigé en appliquant une correction linéaire aux données NWW3 MED (cf. ZBPESM, rapport BRGM/RP-69915-FR). Cette correction est issue de la régression linéaire entre des observations houlographiques et les données originales du modèle, et s'exprime telle que :

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

Au point NWW3 593, 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 23).

Le secteur ouest-sud-ouest semble générer les vagues les plus pénalisantes au regard de la situation morphologique du site d'étude. Nous nous intéressons donc uniquement à ce secteur de provenance de vagues, tout en conservant l'intégralité de la série temporelle.

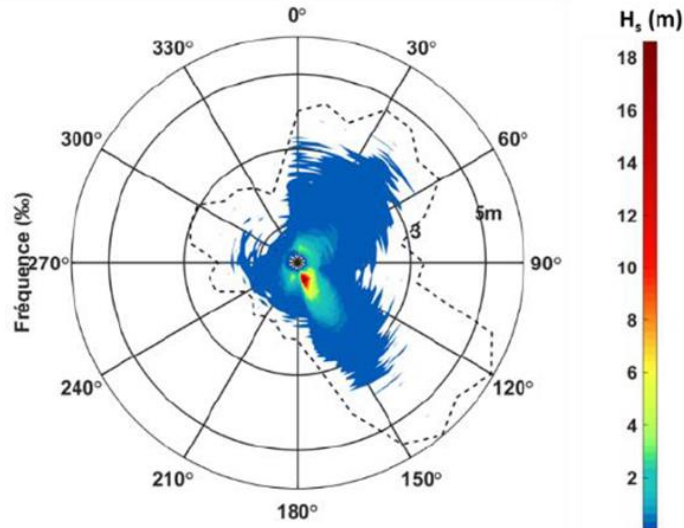


Figure 23 : Rose des vagues au point NWW3 593.

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 22, bas). La Figure 24 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 (vent de sud-est, 150°N).

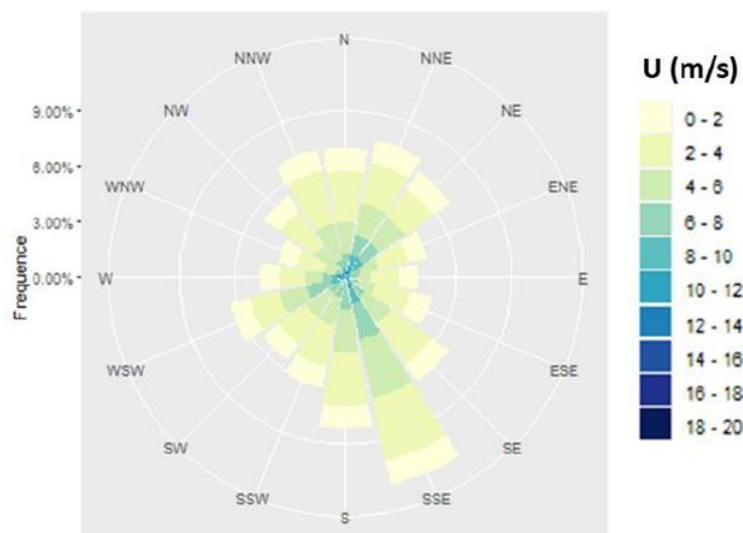


Figure 24 : Rose des vents au point NWW3 593.

5. Evènements de références

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-69915-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 [...] 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 (29/10/2018)**, pour laquelle il a été établi un arrêté de catastrophe naturelle (publié au JO du 7/12/2018) pour les communes de Bastia et Biguglia (entre autres) est donc prise comme évènement historique majeur, puisqu'elle a notamment provoqué des « **inondations et choc mécanique lié à l'action des vagues** ».

En complément, nous nous intéressons à des événements de périodes de retours 100 ans calculés par méthode des probabilités conjointes dans l'étude des Zones Basses Potentiellement Exposées aux Submersions Marines (rapport BRGM/RP-69915-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 ZBPESM en Haute-Corse (BRGM/RP-69915-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 (H_s ; 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-69915-FR et sont reprises en Annexe1.

Le tableau suivant reprend les combinaisons centennales calculées. Les plus pénalisantes à la côte sont employées dans la suite, pour la présente étude, comme forçage des modèles numériques. Les combinaisons retenues pour la présente étude, menant à des franchissements sont entourées en vert et celles menant à des franchissements/débordements sont entourées en fuchsia.

Combinaisons	Hs (m)	Tp (s)	U (m/s)	SWL (m)
1	5.79	9.81	20.12	0.1
2	5.31	9.28	21.44	0.1
3	6.44	10.54	16.01	0.1
4	5.69	9.53	20.41	0.15
5	6.15	10.19	18.16	0.15
6	5.17	9.34	21.47	0.15
7	5.64	9.59	20.38	0.2
8	6.4	10.51	14.49	0.2
9	4.78	9.18	22.68	0.2
10	5.74	10.09	19.62	0.25
11	6.19	10.31	17.14	0.25
12	4.35	9.12	22.94	0.25
13	3.05	7.62	23.21	0.25
14	6.31	10.37	14.03	0.25
15	5.26	9.39	19.46	0.3
16	5.71	9.94	17.6	0.3
17	5.95	10.24	15.34	0.3
18	4.48	9.05	21.64	0.3
19	4	7.94	22.02	0.3
20	4.83	9.14	18.55	0.35
21	5.2	9.12	16.96	0.35
22	5.34	9.68	15.51	0.35
23	4.21	7.43	19.96	0.35
24	3.17	8.32	20.81	0.35
25	4.29	7.93	17.39	0.4
26	4.6	9.25	14.83	0.4
27	3.8	7.49	18.59	0.4
28	3.23	6.61	19.25	0.4
29	2.44	6.18	19.69	0.4
30	3.58	7.31	15.64	0.45
31	4.05	7.23	12.86	0.45
32	4.26	8.5	9.64	0.45
33	3.29	6.89	17.27	0.45
34	2.34	6.74	18.32	0.45
35	1.76	7.02	18.56	0.45
36	2.5	6.23	12.69	0.5
37	2.78	6.5	11.61	0.5
38	2.97	7.89	9.36	0.5
39	2.2	6.91	14.31	0.5
40	1.65	6.01	14.73	0.5

Figure 25 : Valeurs des paramètres de vagues (Hs et Tp), de vent (U) et de niveau d'eau (SWL en m/NM¹⁴) au large de Bastia (point NWW3 593 / CORSE 53). En vert, les combinaisons menant à des franchissements ; en fuchsia celles menant à des franchissements/débordements.

¹⁴ m/NM : l'unité est le m, par rapport au niveau moyen NM.

5.2. RETOUR D'EXPERIENCE SUR L'APPROCHE STATIQUE

L'approche « statique », déployée dans l'étude précédente (rapport BRGM/RP-69915-FR) a permis une identification des ZBPESM en Haute-Corse. 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 26. L'extrait de la carte des ZBPESM montre que la submersion constatée lors de la tempête Adrian (29/10/2018) sur le quai des Martyrs et dans les rues perpendiculaires, 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).

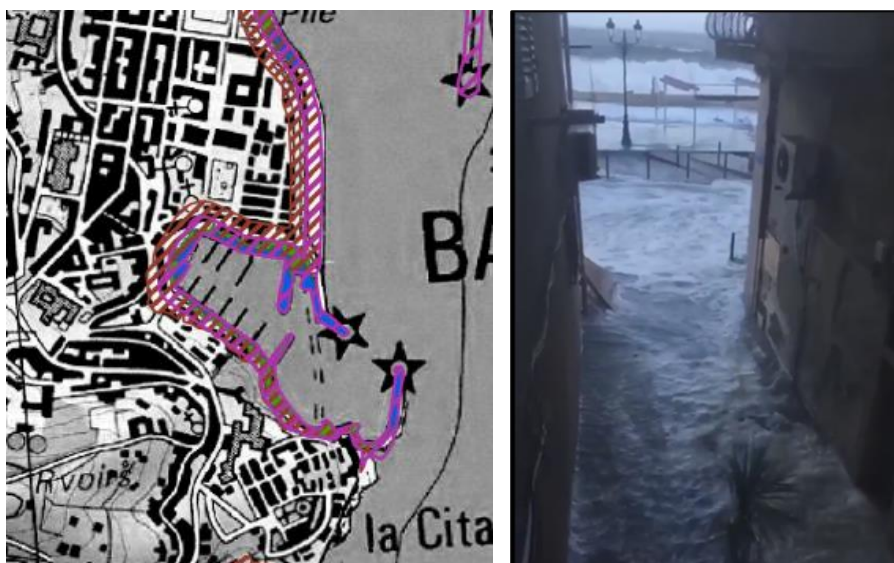


Figure 26 : Extrait de la carte des Zones Basses Potentiellement Exposées aux Submersions Marines à Bastia (à gauche, rapport RP-69915-FR, 2021) et illustration de la submersion marine par franchissement de paquets de mer à Bastia lors de la tempête Adrian (29/10/2018, image de droite).

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 ce cas sur le pourtour de l'étang de Biguglia (cf. paragraphe 9.4).

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 du Cap-Corse (cf. paragraphe 9.4).

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.

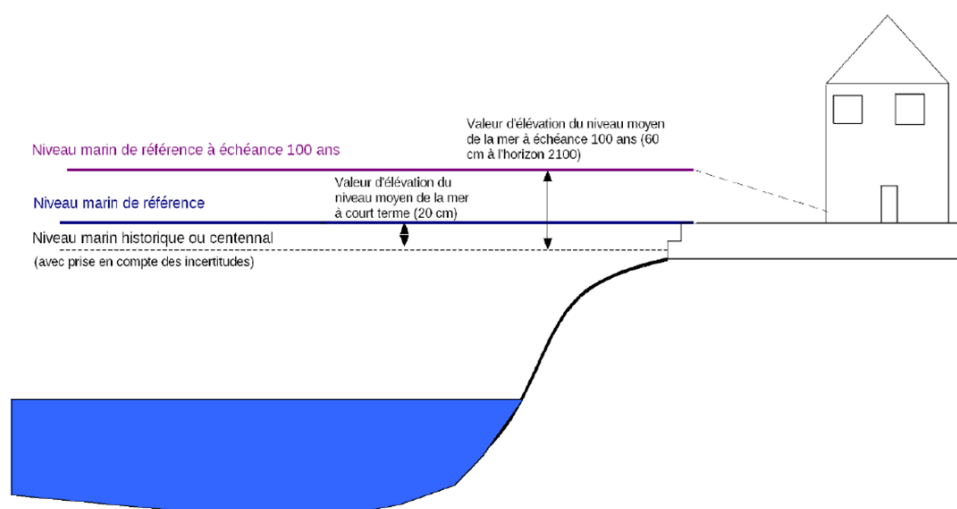


Figure 27 : Recommandations pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en lien avec le changement climatique (MEDDE, mai 2014).

5.4. DEBITS DES COURS D'EAU

La zone d'étude se distingue par la présence d'un vaste étang et est traversée par un réseau hydrographique comprenant un cours d'eau principal, le Golo, ainsi que plusieurs torrents ou fleuves et rivières secondaires (section 5.4). Dans ce type d'environnement, le niveau d'eau à la côte pendant les évènements extrêmes peut être influencé par la combinaison des phénomènes côtiers et des apports fluviaux. Les études précédentes (Colmet et al. 2019, Tunin-Ley et al. 2014)

ont montré, en particulier, que le niveau d'eau dans l'étang de Biguglia n'est pas contrôlé par le seul forçage marin, mais que considérer l'apport des débits des différents affluents et primordiale pour une description réaliste de la dynamique de l'étang.

Bien que l'objet de ce travail ne soit pas de faire une étude des probabilités conjointes d'occurrence entre les événements marins extrêmes et les crues des rivières, nous avons néanmoins considéré et injecté dans le modèle les débits enregistrés pour validation dans le cas historique (tempête Adrian), et les débits caractéristiques avec période de retour de 2 ans pour les autres simulations.

Les études et bases de données sur lesquelles s'est appuyé le choix du débit fluvial sont les suivantes :

- Etude BRLi, 2020 « *Etude de l'aléa inondation sur les bassins versants du Golo et des cours situés entre l'exutoire de ce fleuve et le sud de Bastia* ».
- Etude SUEZ 2023 « *Etude de caractérisation des inondations et analyse des solutions d'aménagement sur les bassins versant des ruisseaux situés sur le territoire de la Communauté d'Agglomération de Bastia* », rapport de phase 2.
- Base de données SHYREG (<https://shyreg.recover.inrae.fr/>), générée par Hydris hydrologie à partir d'une méthode développée par l'INRAE afin de générer de très longues chroniques de quantiles de pluies et de débit à l'échelle régionale au pas d'espace de 1 km².

La base de données de l'HydroPortail (<https://hydro.eaufrance.fr/>) fournit les débits du Golo lors des crues et tempêtes majeures (chronique de 57 ans) :

- 1850 m³/s pour la crue de 1873 ;
- 2100 m³/s pour la crue de 1938 ;
- **~ 250 m³/s lors de la tempête Adrian (29/10/2018) ;**
- ~ 300 m³/s lors de la tempête du 27-28/11/2008 ;
- < 50 m³/s lors des tempêtes Lothar et Martin en 1999 et en octobre 2007.

L'étude BRLi (2020) permet de constater que le débit enregistré lors de la dernière tempête majeure (Adrian, 29/10/2018) qui a généré des phénomènes de submersion marine, a une période de retour de 2 ans. **C'est donc une période de retour de 2 ans qui a été choisie pour les débits de l'ensemble des cours d'eau, en concertation entre la DDT, la CAB, la CCMG et le BRGM.**

Ces valeurs de débits de période de retour de 2 ans sont fournies par la base de données SHYREG et calculées au niveau des exutoires des cours d'eau. C'est pourquoi, elles ont été retenues y compris pour les cours d'eau disposant de stations de mesure mais situées plus en amont. Cette base de données a été validée avec les statistiques issues de 2 stations de mesure du Bévinco (Y7315010) et du Golo (Y7315010) comme illustré dans le Tableau 1.

Ces valeurs ne sont pas disponibles dans la base de données SHYREG pour les cours d'eau de Toga et de Guadello. Etant donné qu'il a été constaté que pour le ruisseau de Fiuminale la relation entre Q2 (débit de période de retour 2 ans) et Q10 (débit de période de retour décennale) était un rapport de 5,4 (Q2 = Q10 / 5,4), il est proposé d'appliquer une règle de 3 pour estimer les Q2

des ruisseaux de Toga et de Guadello car le Q10 sont disponibles dans l'étude du TRI du Grand Bastia (5,7 et 3,1 m³/s respectivement).

Les valeurs retenues sont surlignées en rouge dans le Tableau 1.

Cours d'eau	Ref	Commune	SHYREG Q2 pointe	SHYREG Q2 journalier	Etude CAB SUEZ Q5 pointe	Etude CAB SUEZ Q5 (débit capable)	Etude BRLI 2020 Q2 pointe	Etude BRLI 2020 Q2 journalier	Etude BRLI 2020 Q10 journalier	BCEOM 2006 Q10	TRI Grand Bastia (événement fréquent Q10)	Compa SHYREG/autres données	Valeur retenue
Ruisseau d'Arega	C0576	Brando	5.92	2.15									SHYREG Q2 journalier
Ruisseau de Poggioio	C01401	Santa Maria di Lota	11	4.32	81.5								SHYREG Q2 journalier
Ruisseau de Grigione	C0156	San Martino di Lota	6.11	2.2									SHYREG Q2 journalier
Ruisseau de Toga		Bastia/Ville di Pietrabugno			470						5.7	pas de donnée	Q10/5.4 = 1
Ruisseau de Guadello (Vieux Port)		Bastia			30						3.1	pas de donnée	Q10/5.4 = 0,57
Ruisseau Corbaia	C01291	Bastia	12.2	3.26	24			51					SHYREG Q2 journalier
Ruisseau de Lupino	C01129	Bastia	7.83	2.37	39								SHYREG Q2 journalier
Ruisseau de Fiuminale (Fango)	C0353	Bastia	9.01	2.59									SHYREG Q2 journalier
Ruisseau San Pancrazio	C0702	Furiani	10.7	3.39	43.8			62		38			SHYREG Q2 journalier
Ruisseau Sant'Agata	C01334	Furiani	7.86	2.62	12.6			26		44			SHYREG Q2 journalier
Bevinco	C0394	Biguglia	63	26.9						175			SHYREG Q2 journalier
	Y7315010	Biguglia	38.6	17			35	15				Comparaison OK	
Ruisseau de Figareto	C0610	Biguglia	12	3.68									SHYREG Q2 journalier
Ruisseau de Rasignani	Co847	Borgo	22.2	7.32				46		33			SHYREG Q2 journalier
Ruisseau de Mormorana	C0574	Lucciana	30.7	9.77									SHYREG Q2 journalier
Golo	Y7212010	Lucciana	255	163			250	185		880		Comparaison OK	
	C0117	Lucciana	322	208									SHYREG Q2 journalier

Tableau 1 : Bilan des données de débits disponibles pour les cours d'eau de la zone d'étude.

5.5. CORDON LITTORAL ET SCENARIO DE RUINE GENERALISEE

Les 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 du Golo et du Grau de Biguglia. Afin de considérer un scénario pénalisant lors d'un événement de submersion marine, nous nous basons sur les recommandations du Guide PPRL (MEDDE, 2014), et prenons en compte une ruine généralisée de ces embouchures.

Nous menons dans un premier temps une analyse par approche historique à partir des orthophotographies de l'IGN, et d'images satellite afin d'évaluer l'évolution des embouchures. Cela a permis de mettre en évidence les différentes configurations possibles au cours des dernières décennies. En cohérence avec le scénario de ruine généralisée, c'est la configuration la plus défavorable, c'est à dire celle d'une embouchure la plus ouverte possible qui est retenue.

5.5.1. Cas de l'estuaire du Golo

La Figure 28, montre l'évolution récente du Golo, entre 2010 et 2021. Des images plus anciennes de cette évolution sont présentées en Annexe 2. La configuration de l'ouverture des embouchures prise en compte dans le modèle est représentée par des flèches orange. Ainsi, une connexion totale par ruine généralisée du cordon sableux est considérée pour ces embouchures.

La Figure 29 présente des profils pour le scénario de ruine généralisée par arasement total de cordon sableux. Les profils transversaux avant arasement sont présentés en rouge, et en vert après arasement. Ils montrent bien qu'après arasement l'altitude est au niveau ou sous le niveau de la mer.

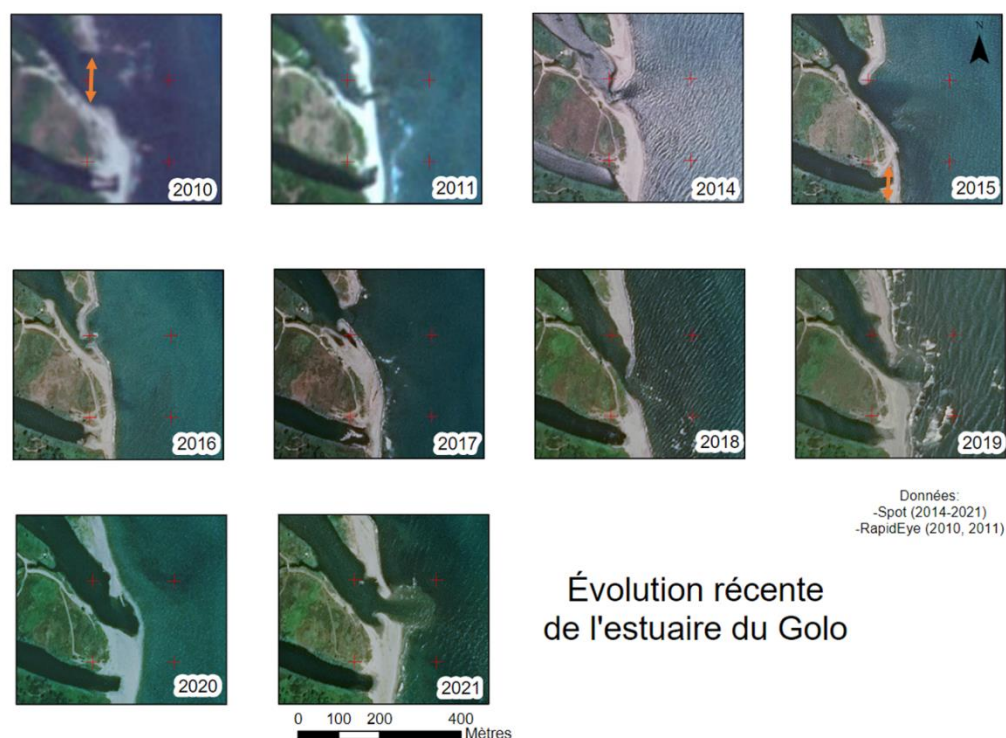


Figure 28 : Images satellite de l'évolution de l'estuaire du Golo entre 2010 et 2021. Les flèches oranges indiquent la configuration d'ouverture de l'embouchure pour le scénario de référence.

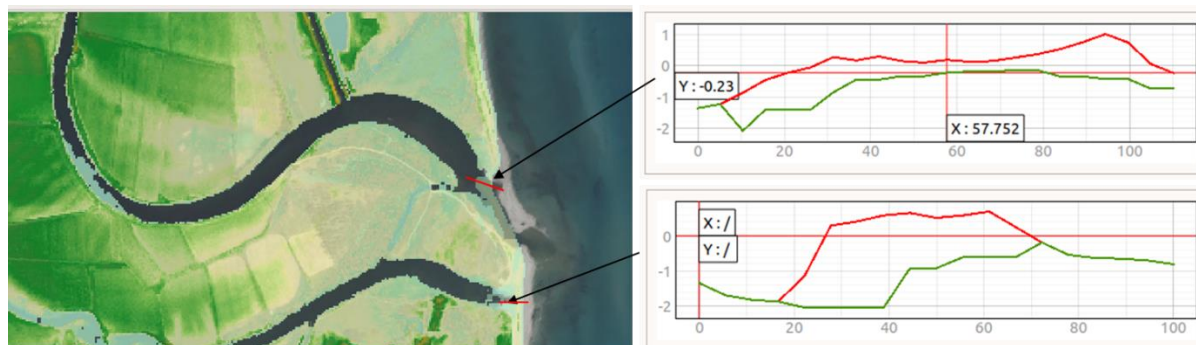


Figure 29 : MNT de l'estuaire du Golo (Gauche) ; scénario de ruine généralisée par arasement total de cordon sableux, profils avant arasement en rouge et après arasement en vert (Droite).

5.5.2. Cas du Grau de Biguglia

La Figure 30, présente l'évolution récente du grau de Biguglia, entre 2010 et 2021. Des orthophotographies plus anciennes de cette évolution sont présentées en Annexe 2. La configuration de l'ouverture de l'embouchure prise en compte dans le modèle est représentée par la flèche orange et a été validé par la DDTM 2B.

Sur la Figure 31, le profil transversal avant arasement est représenté en rouge, et en vert après arasement total de cordon sableux.

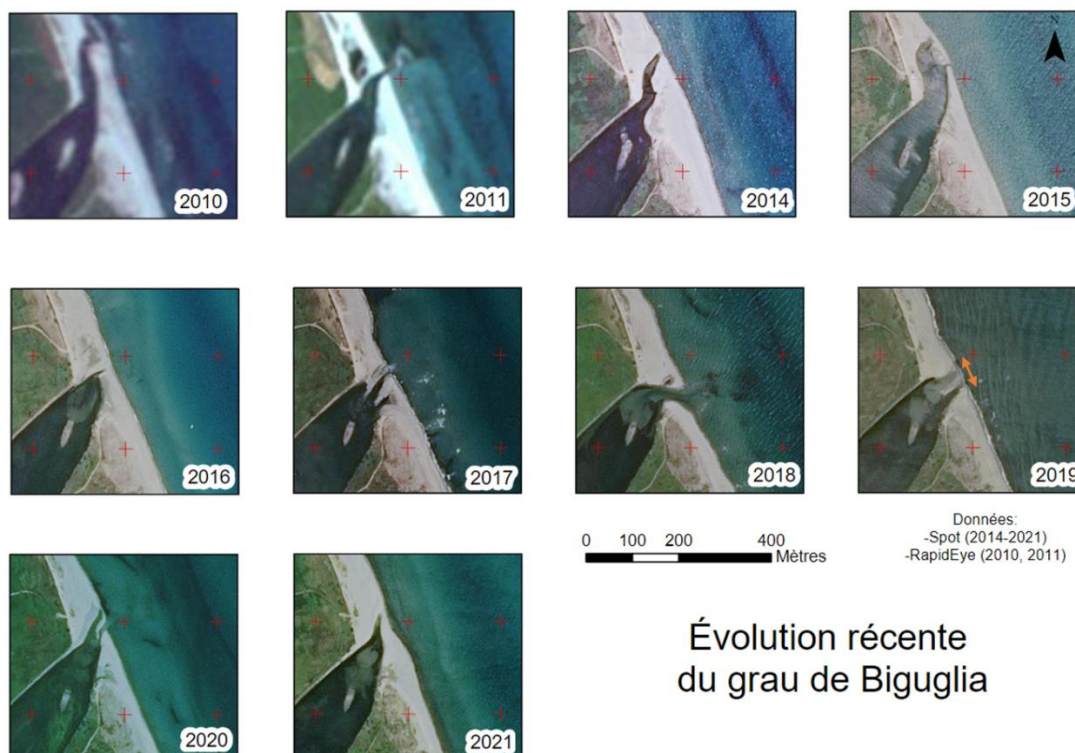


Figure 30 : Images satellite de l'évolution du Grau de Biguglia entre 2010 et 2021. La flèche orange indique la configuration d'ouverture de l'embouchure pour le scénario de référence.

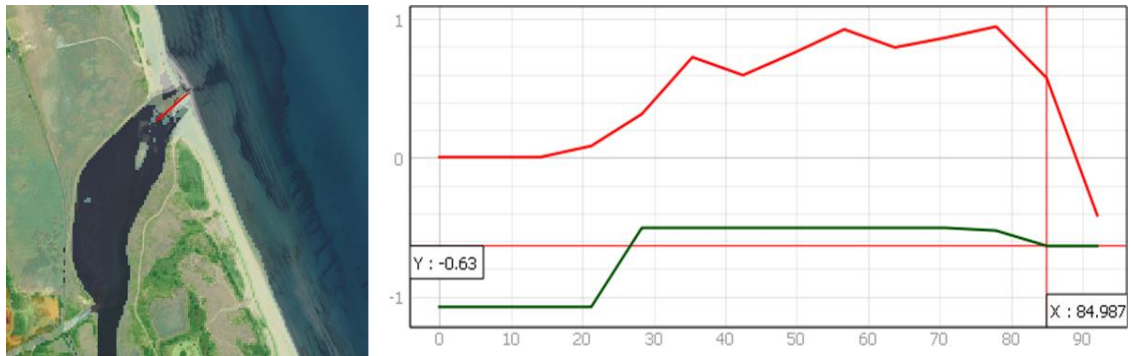


Figure 31 : MNT du grau de Biguglia (Gauche) ; scénario de ruine généralisée par arasement total de cordon sableux, profils avant arasement en rouge et après arasement en vert (Droite).

6. Stratégie de modélisation

Notre stratégie numérique pour évaluer l'aléa de submersion côtière repose sur l'utilisation de trois outils numériques : le modèle hydrodynamique UHAINA (Filippini et al. 2024) pour la simulation du niveau de l'eau et des courants, le modèle spectral de vagues WAVEWATCH3 (WW3) (Tolman 2009) et le modèle à résolution de phase (dit vague-à-vague) SWASH (Zijlema et al. 2011) pour la propagation des vagues et les franchissements. La stratégie de modélisation repose sur trois étapes (Figure 32 ci-dessous) associant les 3 codes pour simuler la submersion côtière par débordement et franchissement :

- **1. Propagation des vagues du large vers le rivage à l'aide du modèle WW3, forcé à partir des séries temporelles instationnaires des spectres des vagues, du niveau d'eau et du vent, issues des cas historiques ou bien des événements synthétiques (issus de l'analyse statistique 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 (Brodtkorb et al. 2000)
 - **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 la durée 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 forcé par les niveaux d'eau au large, le vent et les caractéristiques des vagues simulées par WW3 (prise en compte du *wave-setup* et des courants induits par les vagues également) pour calculer le débordement.** Dans les zones où les franchissements peuvent entraîner l'inondation des 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.

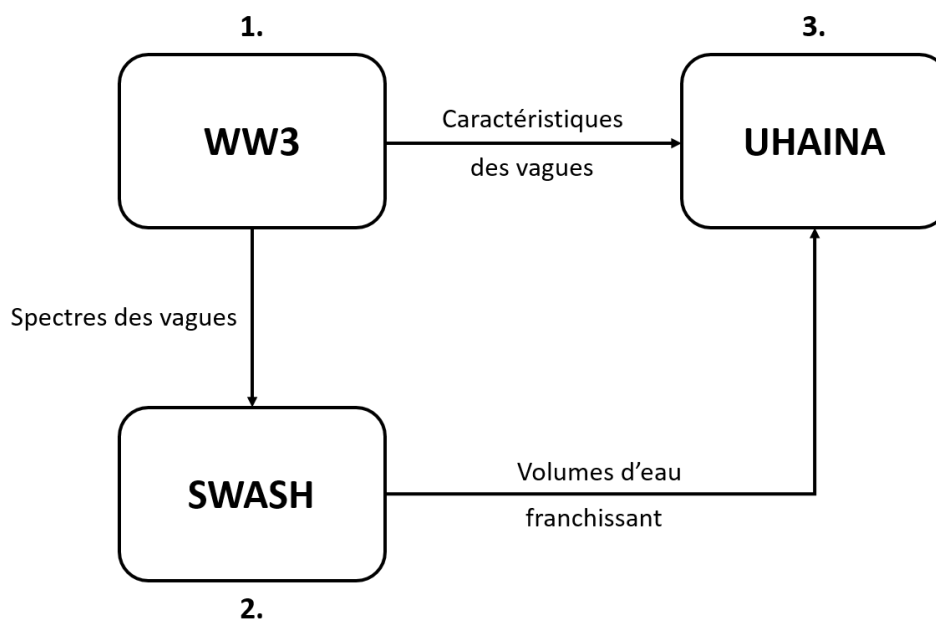


Figure 32 : Schéma de la stratégie de modélisation.

6.1. MODELE UHAINA

Ce modèle hydrodynamique est utilisé pour la propagation du niveau d'eau et pour la simulation de la submersion par débordement. 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 de la submersion, UHAINA garantit le respect de la topographie (crête des digues par exemple) 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.

Dans le cadre de cette étude, UHAINA tient compte :

- de la marée prévue, déterminée à partir de la base de données des composantes harmoniques FES2014 (Lyard et al. 2021);
- 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 32) ;
- des volumes d'eau franchissants, grâce à un chaînage avec le modèle non-hydrostatique SWASH (Figure 32) ;
- 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 comme pour le Golo par exemple ;
- du coefficient de frottement (via des coefficients de Manning) 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) sont appliquées 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 franchissants, calculés à partir des profils SWASH, sont injectés localement comme montré dans la section 6.9.

Le modèle fournit une carte de l'évolution du niveau de l'eau, de la hauteur de l'eau et des courants moyens toutes les 10 minutes. Il calcule également le niveau et la vitesse maximum de l'eau, ainsi que l'aléa, toutes les 5 minutes.

6.2. MODELE WAVEWATCH3

Le modèle WW3 (Tolman 2009) résout l'équation de conservation de la densité d'action des vagues à l'aide de grilles de calcul structurées (différences finies) ou non-structurées (éléments finis). Il est capable de reproduire les différents processus liés aux vagues, de la haute mer au rivage, tels que la génération par le vent, la propagation dans l'espace (réfraction, interactions avec les courants, etc.) 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 comme décrit dans Ardhuin et al (2010), avec le spectre des vagues discrétisé en 36 directions (par pas de 10°) et 32 fréquences (correspondant à des périodes de vagues comprises entre ~1,4 et ~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 de vagues directionnels aux limites du domaine issus des calculs de scénarios à grande échelle : construits à partir des caractéristiques des vagues (hauteur significative, période, direction du pic et dispersion directionnelle). Ces variables sont calculées à l'aide de la boîte à outils WAFO (Brodtkorb, et al. 2000) ;
- l'intensité et la direction instationnaires du vent, appliqués de façon homogène sur l'ensemble du domaine de calcul.

Les spectres directionnels des vagues et les niveaux d'eau (marée + surcote) sont appliqués de façon homogène sur sa frontière de marine. 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 vagues (Hs, Tp, Dp entre autres) toutes les 10 minutes.

6.3. 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 déferlants. Ces volumes peuvent, ensuite, être pris en compte dans la simulation UHAINA, à l'étape finale (3) de la stratégie de modélisation (Figure 32). 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 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 ont une résolution spatiale de 1 m de la topo-bathymétrie pour une propagation correcte des vagues. Le frottement au fond est également pris en compte via des coefficients de Manning.

6.4. DEFINITION DES ZONES D'ETUDE

Pour faciliter la réalisation de l'étude et notamment réduire le coup du temps de calcul lié aux simulations, le domaine d'étude a été partagé en trois secteurs et étudiés séparément, du nord vers le sud :

- Le secteur de Bastia nord : couvrant le littoral entre le Port de Toga et le village de Lavasina ;
- Le secteur du front de mer de Bastia ;
- Le secteur de Bastia sud : couvrant l'étang de Biguglia et la plaine et le littoral entre l'Anse de Porto-Vecchio et la Plage du Cap Sud.

L'emprise spatiale de ces domaines (Figure 33) couvre des zones maritimes étendues : suffisamment larges pour bien représenter la propagation de la surcote atmosphérique et la transformation des vagues depuis le large (~300m de profondeur) vers la côte ; tandis que sur terre, la limite est située à une altimétrie de niveau +10 m.

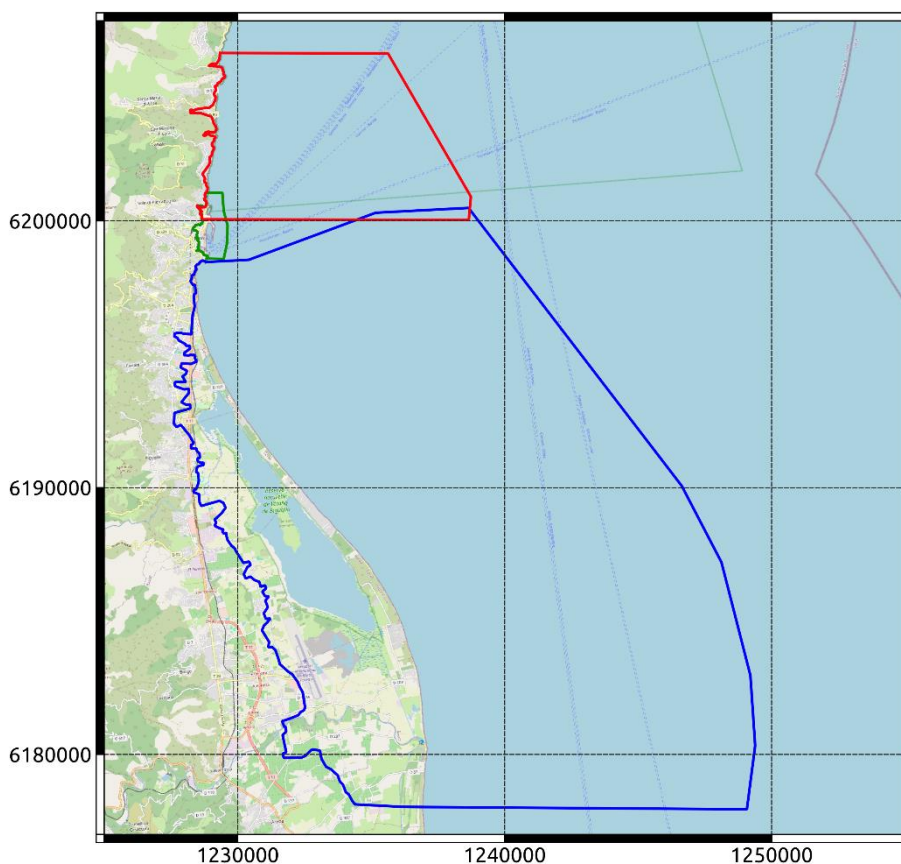


Figure 33 : Emprise spatiale des trois grilles de calcul utilisées. En rouge : la frontière pour le secteur de Bastia nord. En vert : la frontière pour le secteur du front de mer de Bastia. En bleu : la frontière pour le secteur de Bastia sud.

6.5. 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 l'MNT produit à très haute résolution (1 m) et les intégrer au maillage du modèle.

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

Une sélection basée sur le critère d'altitude a permis de repérer les éléments linéaires qui auront réellement une influence sur le comportement hydraulique de la submersion. La Figure 34 montre des routes et cours d'eau dont l'altitude de crête et du lit peut contraindre la propagation de la submersion. La BD Topo a été utilisée pour identifier ces éléments, de même que les observations de terrain. Certains passages identifiés peuvent notamment faciliter la propagation de la submersion à l'intérieur des terres (cf. Figure 35).

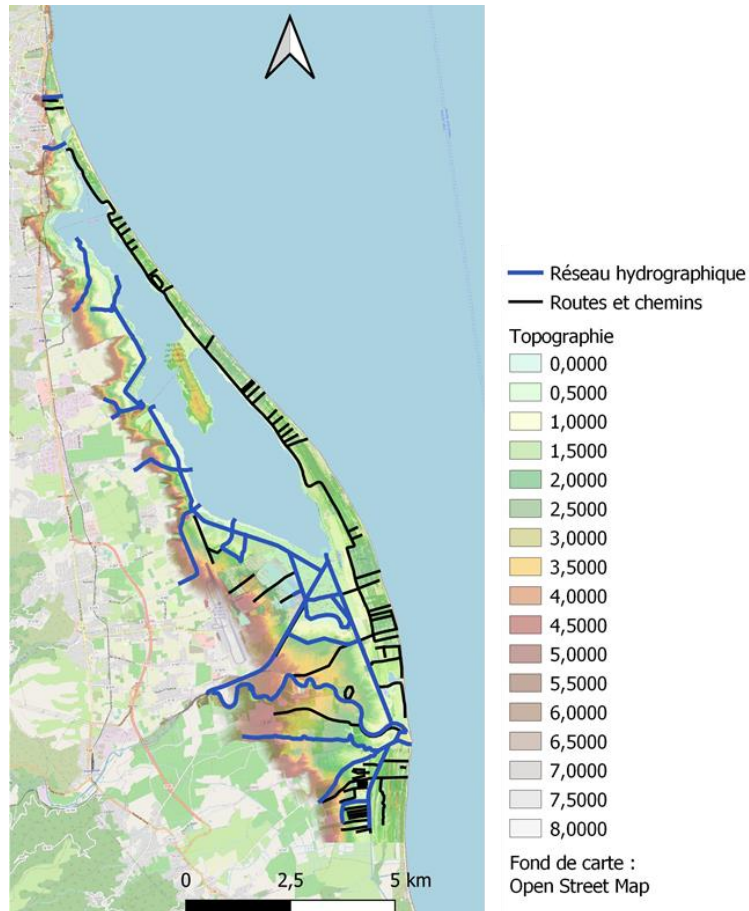


Figure 34: Eléments linéaires structurants identifiés sur la BD Topo et par analyse sur le terrain. Zoom sur la zone d'étude.



Figure 35 : Passage identifié connecté à la plage et à l'étang. Les parcelles adjacentes sont en zones basses. Prise de vue 03/2021. Les croix noires entourées en rouge représentent des prises de vue ou des notes géoréférencées.

6.5.2. 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 Haute-Corse. De plus, la base ouvrages du Cerema¹⁵ (Figure 37) ainsi que des visites de terrain d'une étude antérieure du BRGM (Paquier et al., 2021) 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 géotubes, 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.

⇒ *Pour cette raison, la réfection et le confortement des enrochements du front de mer de Bastia (quai des Martyrs, route territoriale T11) en cours au moment des simulations n'ont pas été pris en compte. C'est la topographie de l'ouvrage issue des données topographiques Litto3D (SHOM, 2017-2018) qui a été utilisée.*

De plus, les murets rehaussant les enrochements du quai des Martyrs ainsi que celui longeant l'allée du 173^{ème} Régiment ont été arasés (Figure 36).



Figure 36 : Murets arasés pour le scénario de ruine généralisée.

¹⁵<https://cerema.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=d5d4b0af642f47769bf463c40a7573a3>

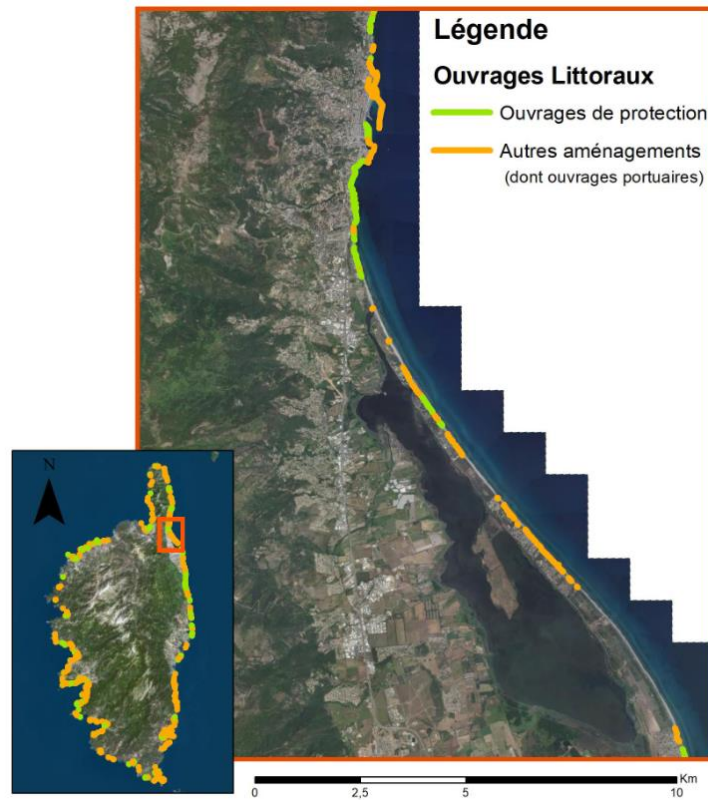


Figure 37 : Ouvrages sélectionnés dans la base ouvrages du Cerema ainsi que dans la base construite par le BRGM. Zoom sur la zone d'étude.

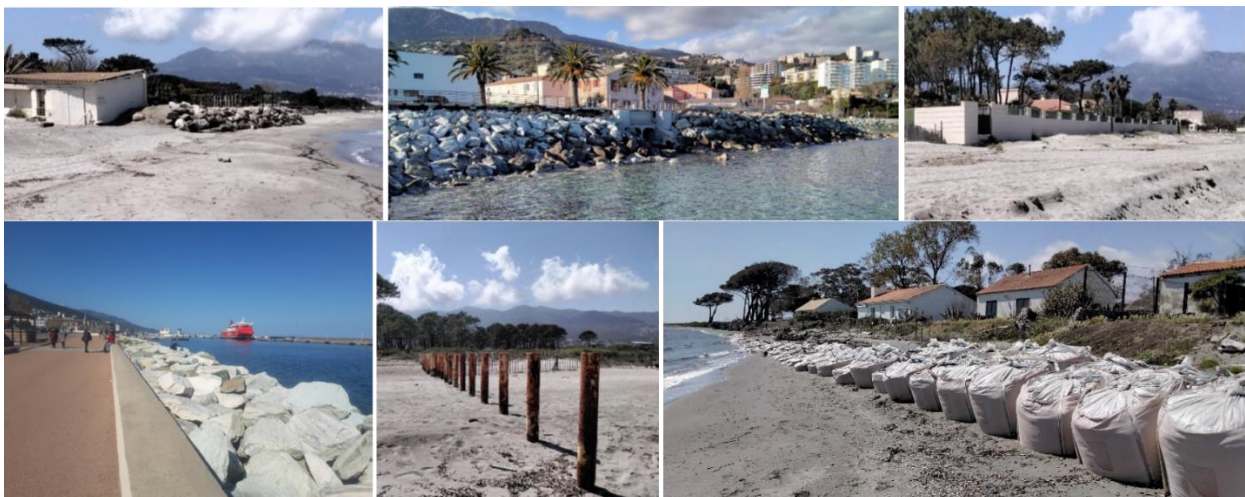


Figure 38 : Panel de certains ouvrages ou défenses recensés dans la base Cerema et l'inventaire BRGM.

6.5.3. Lignes de contraintes

L'intégration des éléments identifiés dans les sections précédentes (6.5.1 et 6.5.2) 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.

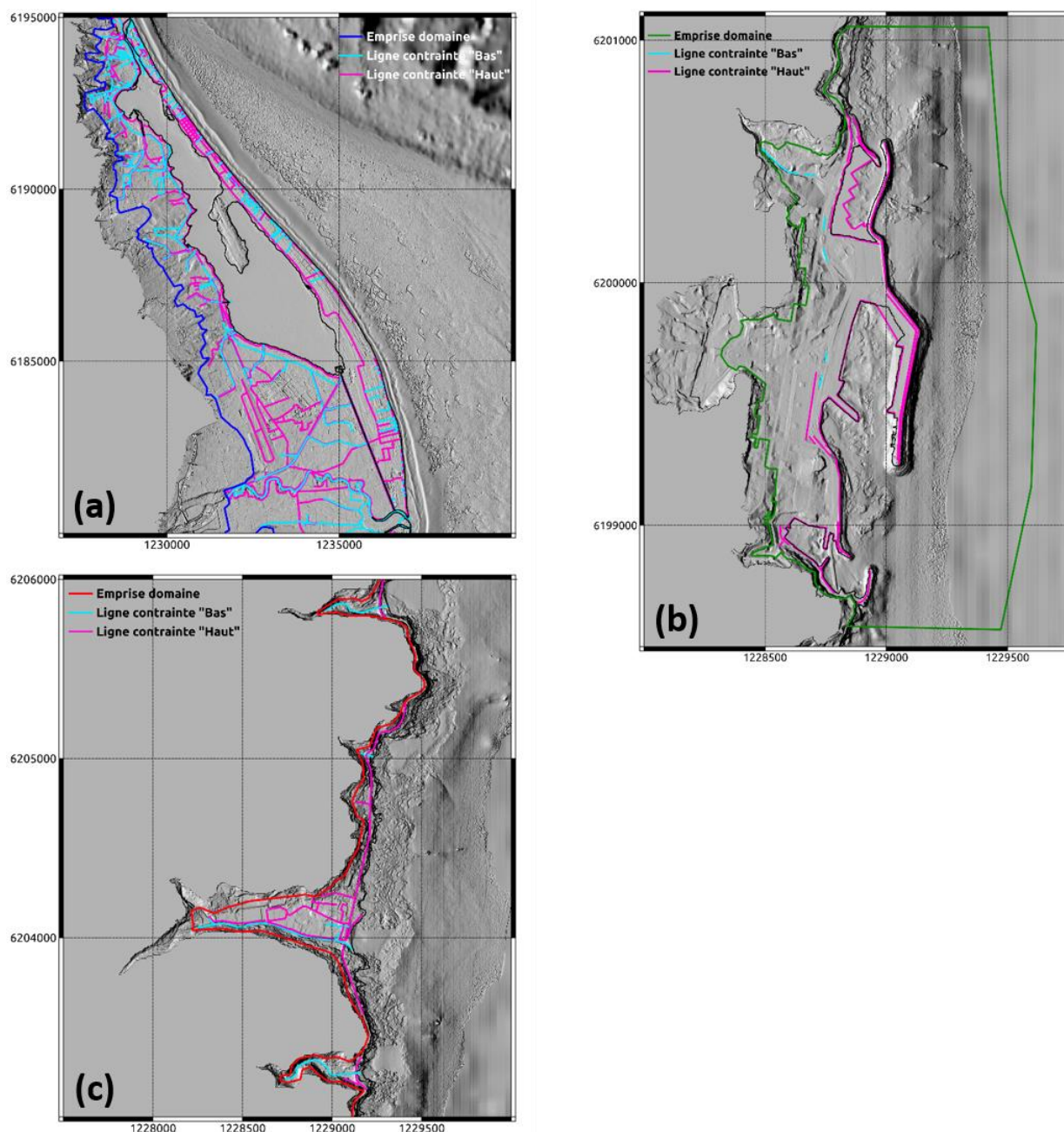


Figure 39 : Utilisation des lignes de contrainte pour les trois modèles : (a) secteur de Bastia sud ; (b) secteur du front de mer de Bastia ; (c) secteur de Bastia nord.

6.5.4. 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 formules 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 et autorise enfin la représentation de deux voies d'écoulement superposées. Il convient de noter que pour de connexions hydrauliques de larges dimensions (certains ponts par exemple), dans la mesure où la résolution du maillage le permet, une « ligne de contrainte » a été utilisée.



Figure 40 : Exemples de connexions hydrauliques sur la route territoriale T11 à Bastia.

6.6. PRISE EN COMPTE DE L'OCCUPATION DU SOL ET DES FROTTEMENTS ASSOCIES SUR LE FOND

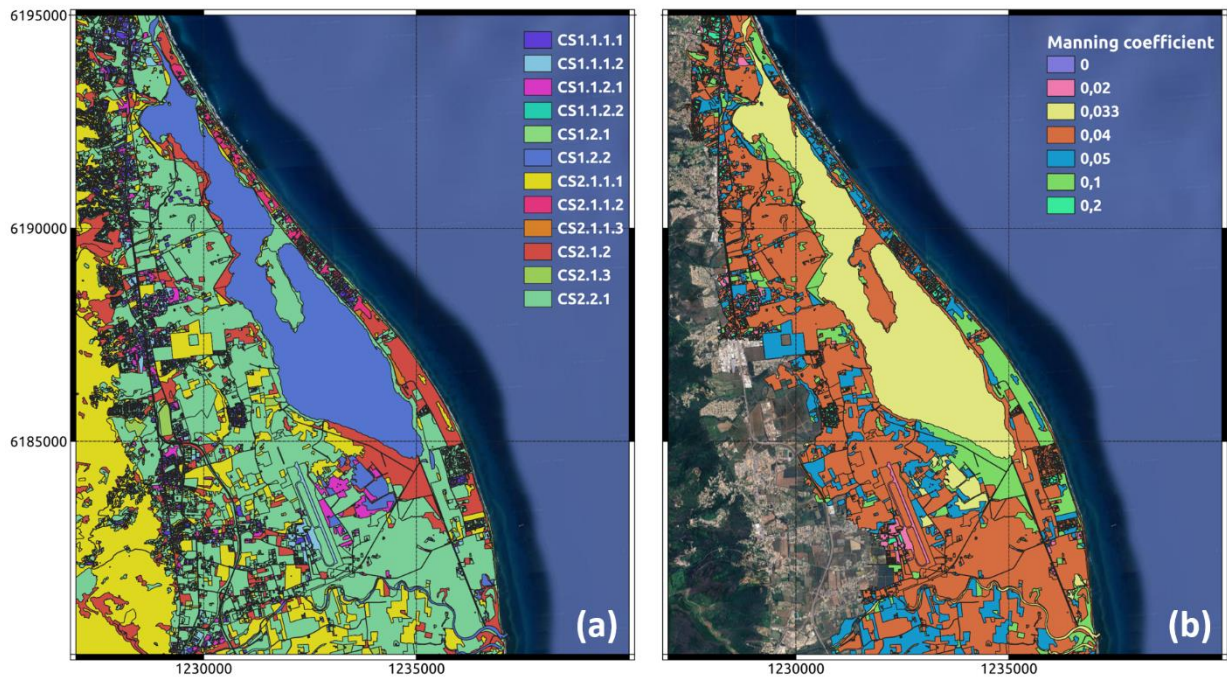
Le **frottement du fond** est une forme de résistance que le fond exerce sur l'écoulement de l'eau, en provoquant un ralentissement du flux. Ce ralentissement dépend de l'occupation du sol. Une représentation spatialisée de cet effet peut être construite à partir des données de l'occupation du sol du domaine d'étude. Pour ce travail, les données OCS-GE¹⁶ 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 41.

Une valeur de rugosité peut donc être associée à chaque classe d'occupation identifiée en termes de coefficient de Manning (Tableau 1). 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 s/m^{1/3} dans les zones à

¹⁶ OCS-GE : <https://geoservices.ign.fr/ocsge>

faible frottement (fond marin, rivières...) jusqu'à $0.16 \text{ s/m}^{1/3}$ pour les zones à fort frottement (forêts, zones arbustives denses...).

Quand la résolution spatiale d'un modèle numérique ne permet pas de représenter explicitement l'habitat ou les structures qui occupent le sol, leur effet sur l'écoulement est représenté via un paramètre de frottement caractéristique augmenté (Tissu urbain continu/discontinu, Zones industrielles etc... dans le Tableau 1).



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

Table 1 : Correspondance entre les typologies d'occupation du sol et les coefficients de Manning (en $s/m^{1/3}$) utilisés dans cette étude.

6.7. MAILLAGE

Les codes UHAINA et WW3 décrits dans les paragraphes 6.1 et 6.2 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 enjeu

(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. 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 6.6).

6.7.1. Secteurs de Bastia nord et de Bastia sud

Dans les secteurs de grande emprise spatiale (Bastia nord et sud) une taille de mailles variable entre 500m au large et 15m à terre a été utilisée. Les maillages résultants (Figure 42 et Figure 43) ont respectivement 75 000 et 340 000 éléments. La résolution utilisée n'étant pas assez fine pour représenter explicitement la présence de bâtiments et de structures au sol, des valeurs élevées du coefficient de rugosité ont été utilisés pour les zones urbaines (voir paragraphe 6.6).

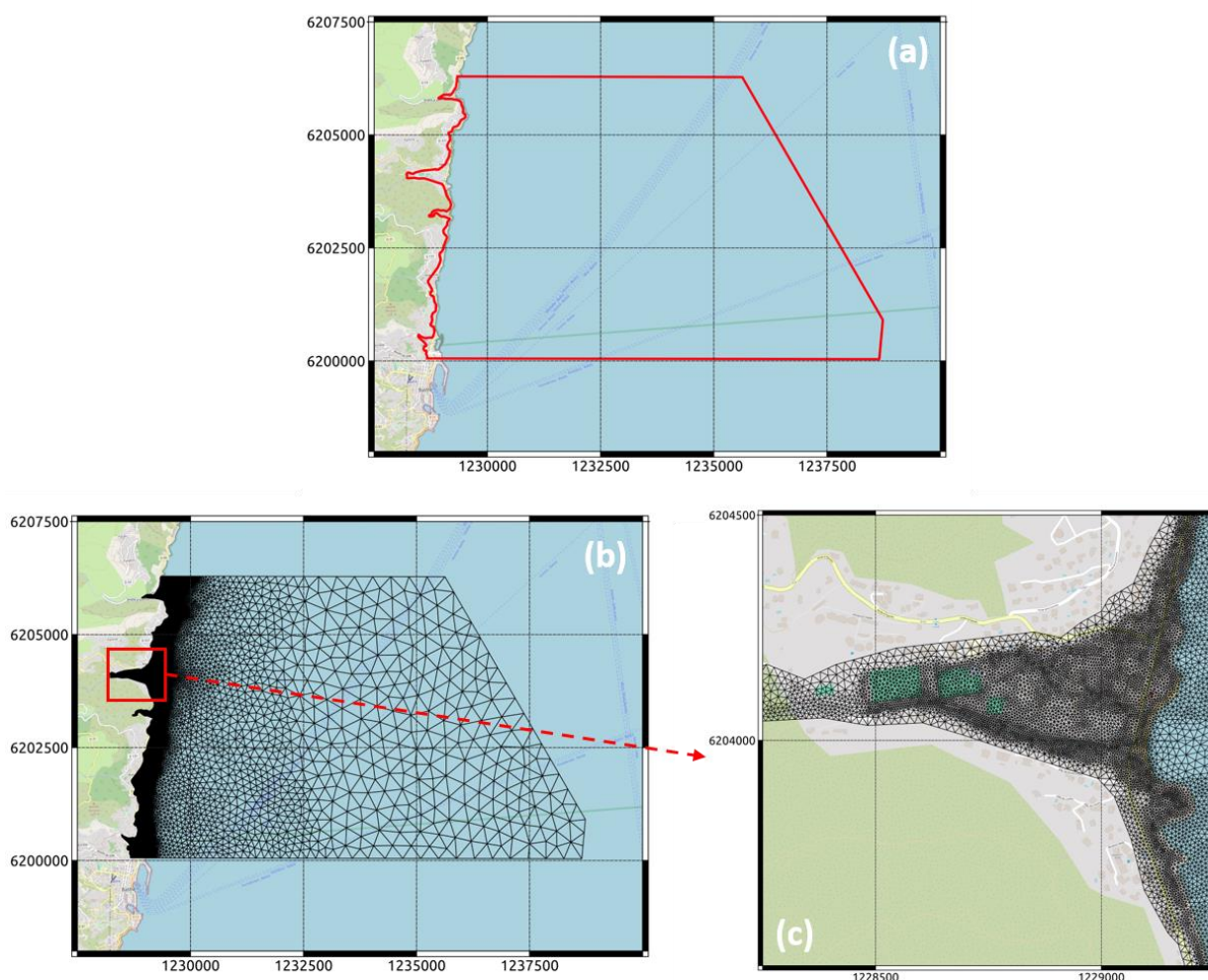


Figure 42 : Maillage de calcul réalisé pour le secteur de Bastia nord avec un zoom sur la zone du littoral de Miomo (c).

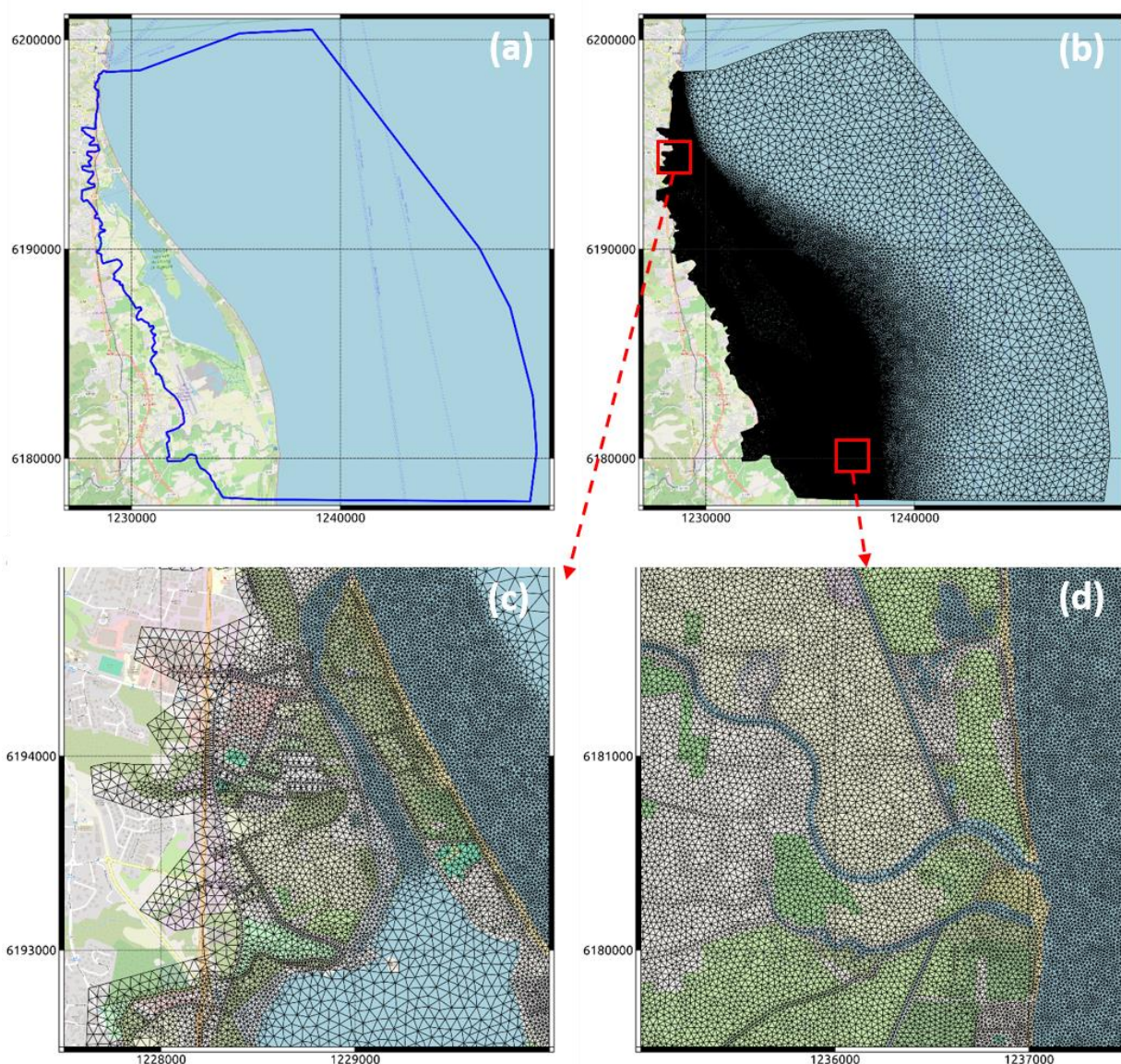


Figure 43 : Maillage de calcul réalisé pour le secteur de Bastia sud avec un zoom sur l'embouchure de l'étang de Biguglia (c) et l'estuaire du Golo (d).

6.7.2. Secteur du front de mer de Bastia

Le secteur du front de mer de Bastia, ayant une étendue spatiale limitée, autorise l'emploi d'une discrétisation spatiale bien plus fine nécessaire à la simulation de la submersion marine sur un secteur fortement urbanisé. Ici, la taille des mailles varie de 50 mètres au large à 1 mètre à terre, ce qui permet de représenter avec une précision suffisante l'empreinte au sol des bâtiments. Dans cette approche de modélisation, le bâti est modélisé comme des obstacles imperméables et de hauteur infinie (sans risque de débordement par-dessus). La Figure 44 représente le maillage pour ce secteur.

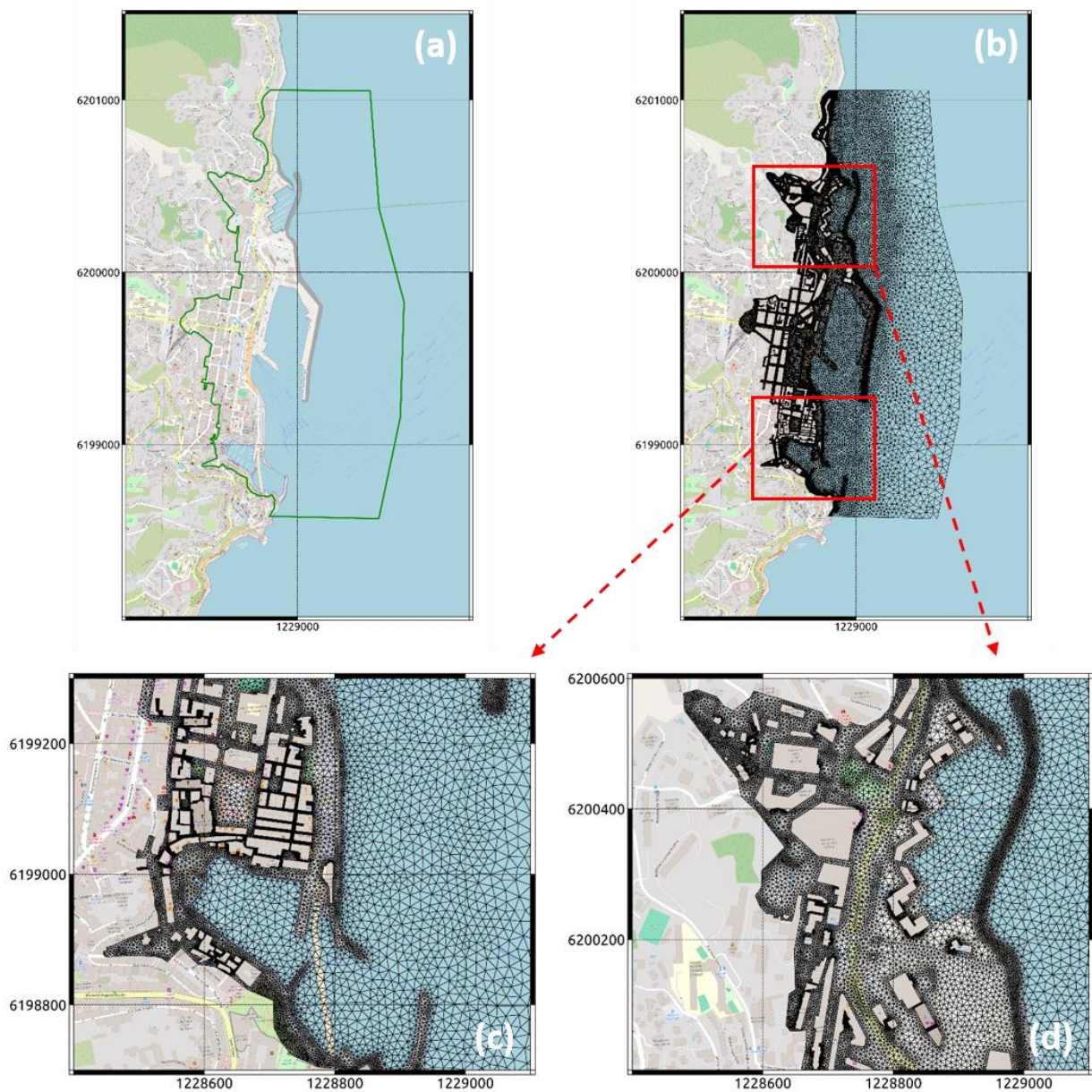


Figure 44 : maillage de calcul réalisé pour le secteur du front de mer de Bastia avec zoom sur le Vieux Port (c) et le Port Toga (d).

6.8. POINTS D'INJECTION ET EXTRACTION DE DEBITS

Comme évoqué dans la section 5.4, cette étude doit prendre en compte les débits des cours d'eau qui y sont présents. Les Figure 45, Figure 46 et Figure 48 montrent les points d'injections de ces débits pour les trois domaines de calculs. Exception faite pour le Golo (flèche bleu clair en Figure 45), dont le débit est directement injecté à partir du bord du domaine de calcul, les débits des autres (14) cours d'eau considérés sont injectés à l'intérieur du domaine de calcul : dans le lit de la rivière si elle se jette directement en mer, ou à leur point de déversement dans l'étang de Biguglia ou dans les ports, le cas échéant.

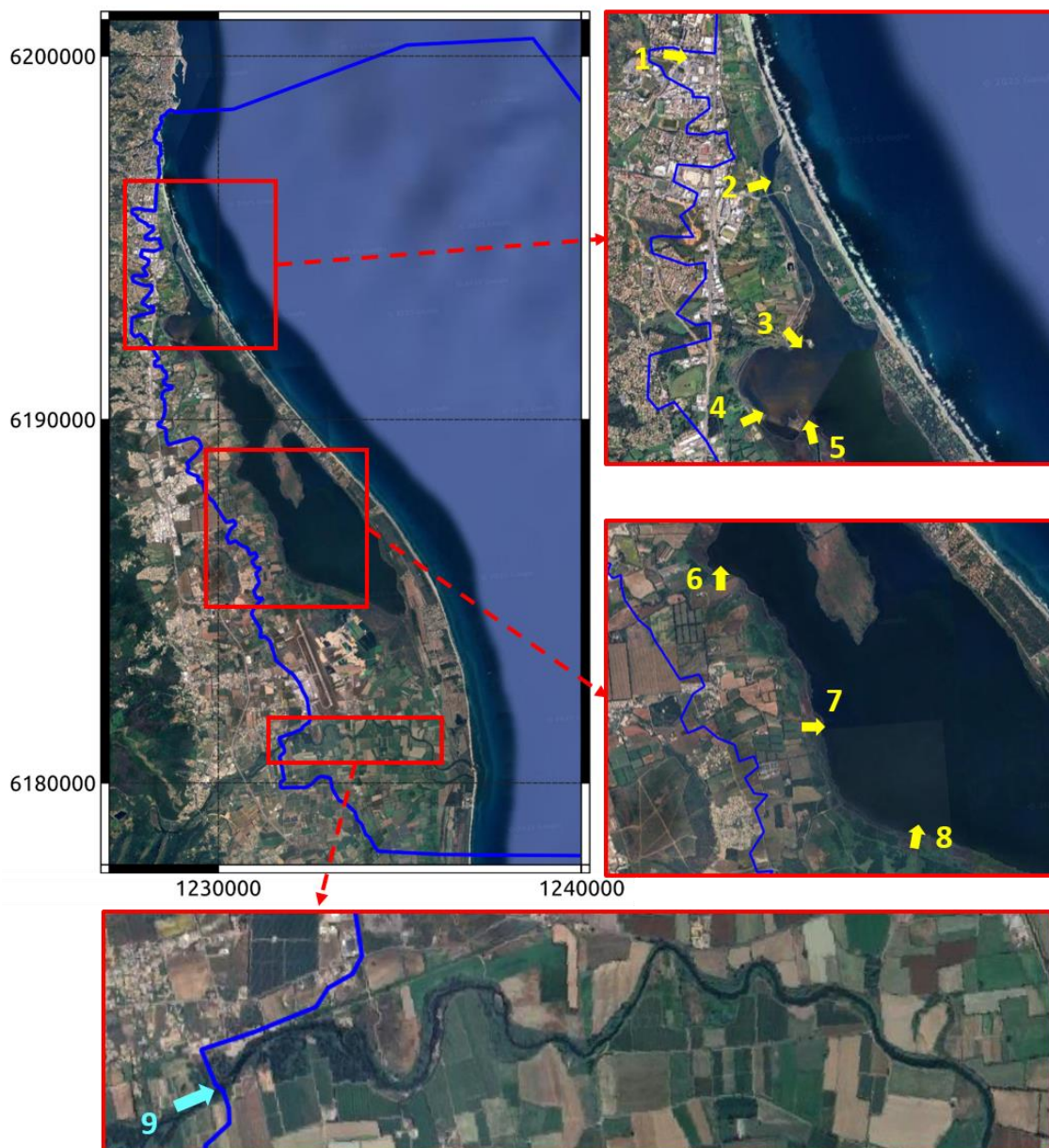


Figure 45 : Points d'injection des débits des rivières prises en compte dans le modèle du secteur de Bastia sud : 1. Corbaia, 2. San Pancrazio, 3. Santa Agata, 4. San Lorenzo, 5. Bevinco, 6. Figareto, 7. Rassignani, 8. Mormorana, 9. Golo.



Figure 46 : Points d'injection des débits des rivières prises en compte dans le modèle du secteur du front de mer de Bastia : 10. Toga, 11. Fiuminale, 12. Tunnel du Vieux Port, 13. Guadello.

Le front de mer de Bastia est caractérisé par la présence du tunnel du Vieux Port, un ouvrage à deux voies situé sur la route territoriale RT11 (ex-RN193) et créé pour faciliter l'accès au centre-ville et à la gare maritime de Bastia. Le tunnel, visible en Figure 47, a une partie immergée de 250m qui cour en dessous du Vieux-Port. Lors des épisodes de tempête, les eaux provenant des franchissements peuvent s'introduire dans le tunnel. Des pompes y sont installées afin d'assurer leur évacuation vers la mer. Compte tenu de la dimension du tunnel, des volumes d'eau importants peuvent donc y pénétrer et être soustraits à la masse d'eau disponible pour la submersion de la ville en surface. La prise en compte de cet effet dans le modèle (stagnation de l'eau à l'entrée du tunnel) se fait par un point d'extraction (en violet en Figure 46) qui a la capacité d'enlever du modèle des débits jusqu'à 50m³/s.



Figure 47 : A gauche, image de l'entrée du tunnel du Vieux Port de Bastia. A droite, en bleu claire son parcours.

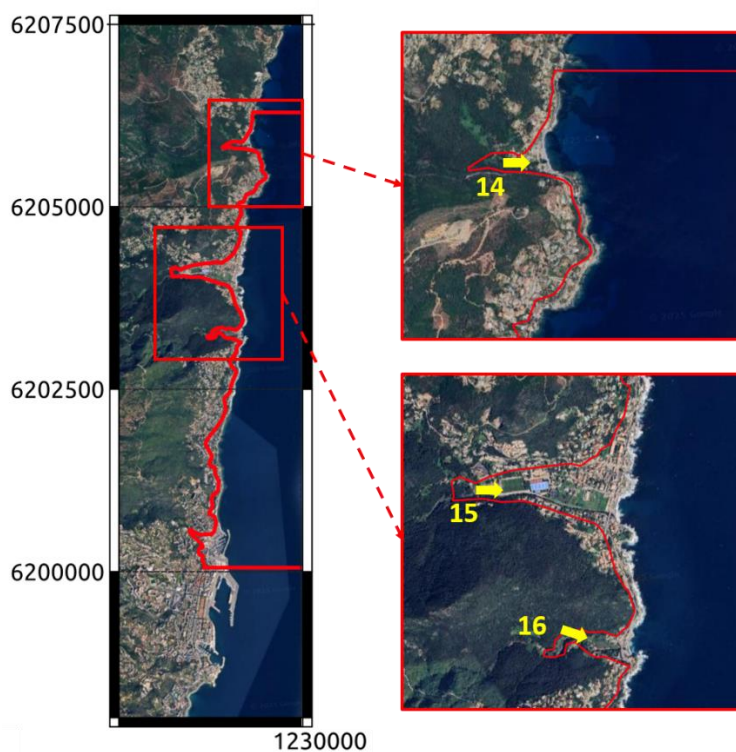


Figure 48 : Points d'injection des débits des rivières prises en compte dans le modèle du secteur de Bastia nord : 14. Arega, 15. Poggiolo, 16. Grigione.

6.9. DEFINITION 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 156, 65 et 40 profils ont été implantés respectivement pour les secteurs de Bastia sud, le front de mer de Bastia et Bastia nord (voir Figure 49, Figure 50 et Figure 51).

Deux types de profils sont à distinguer sur ces figures :

- 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 Figure 52 A ;
- 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 52 B). Il est à noter que c'est le cas pour l'ensemble des profils de Bastia nord.

Les débits franchissant ainsi calculés (profils en jaune) sont ensuite injectés dans UHAINA au niveau de l'extrémité du profil à terre. C'est le cas pour le secteur de Bastia sud (Figure 49 b, c, et d). Néanmoins lorsque le profil est représentatif d'un segment de longueur importante, plusieurs points d'injection sont définis pour le segment afin d'éviter les survitesses comme pour le port de Bastia par exemple (Figure 50).

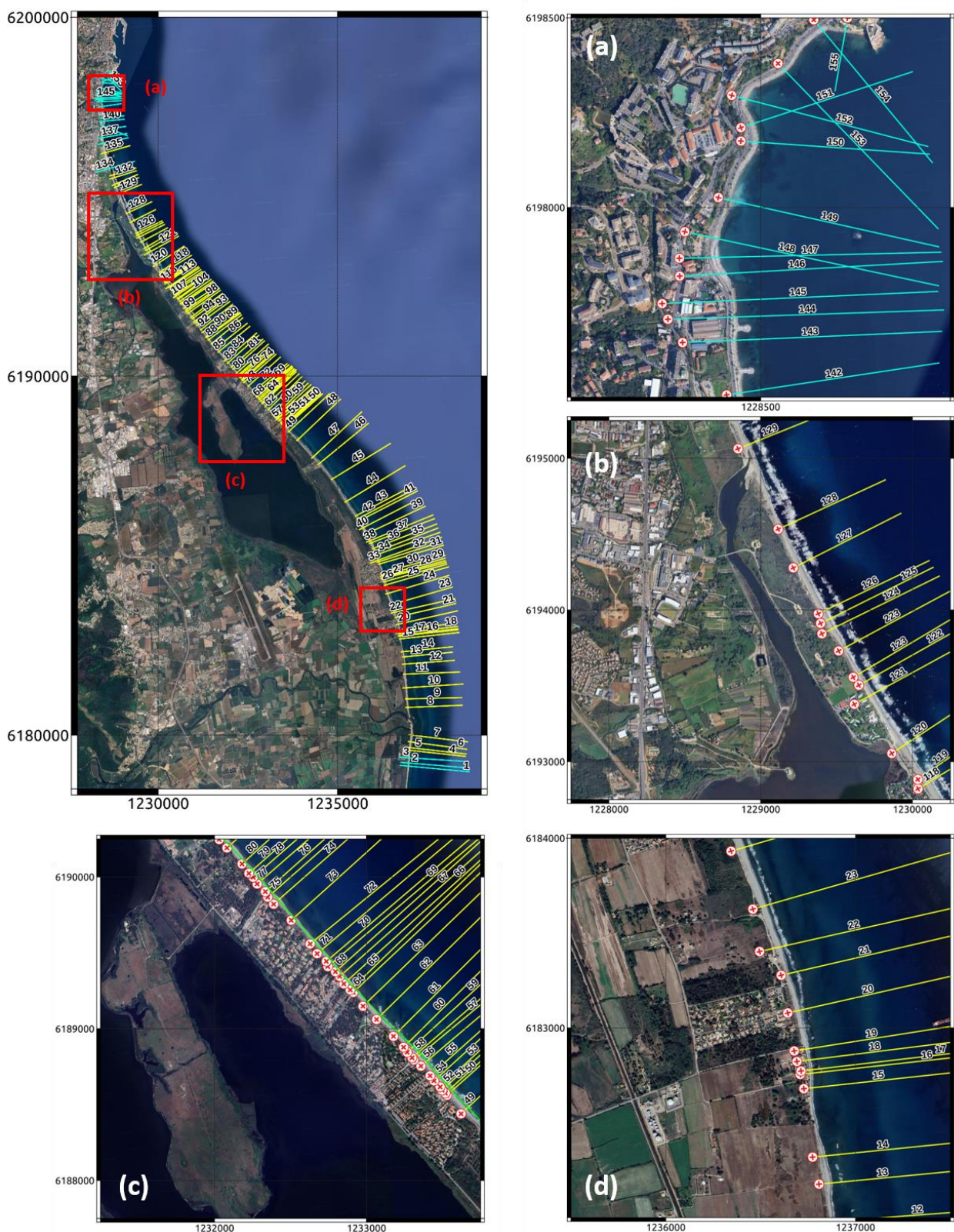


Figure 49 : Profils définis dans le secteur de Bastia sud. Les profils en **jaune** sont ceux dont les données de débit sont prises en compte dans le modèle 2D. Les profils en **bleu** sont ceux dont les débits ne sont pas injectés. Les croix représentent les points d'injection pour chaque profil.

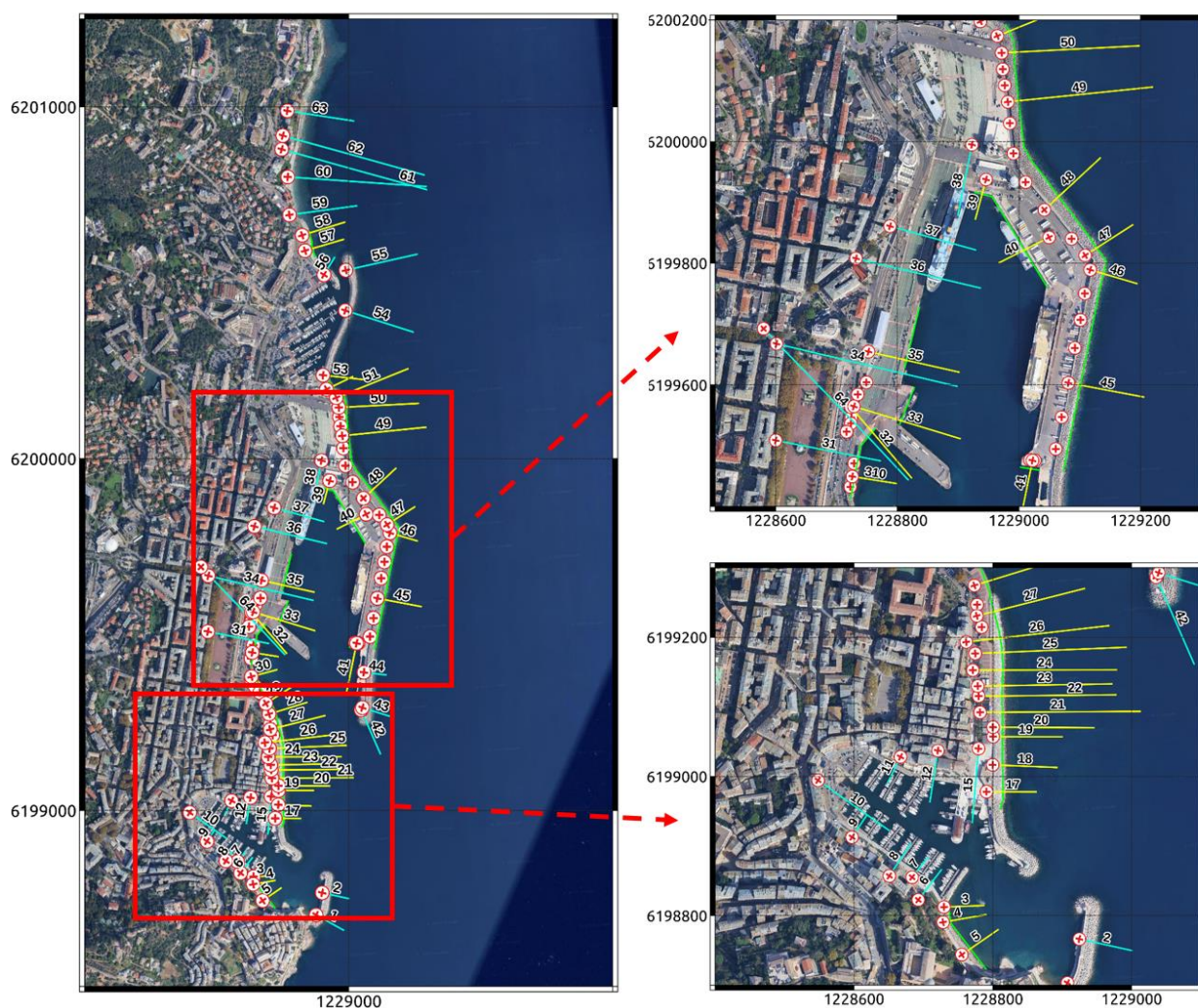


Figure 50 : Profils définis dans le secteur du front de mer de Bastia. Les profils en **jaune** sont ceux dont les données de débit sont prises en compte dans le modèle 2D. Les profils en **bleu** sont ceux dont les débits ne sont pas injectés. Les croix représentent les points d'injection pour chaque profil.



Figure 51 : Profils définis dans le secteur de Bastia nord.

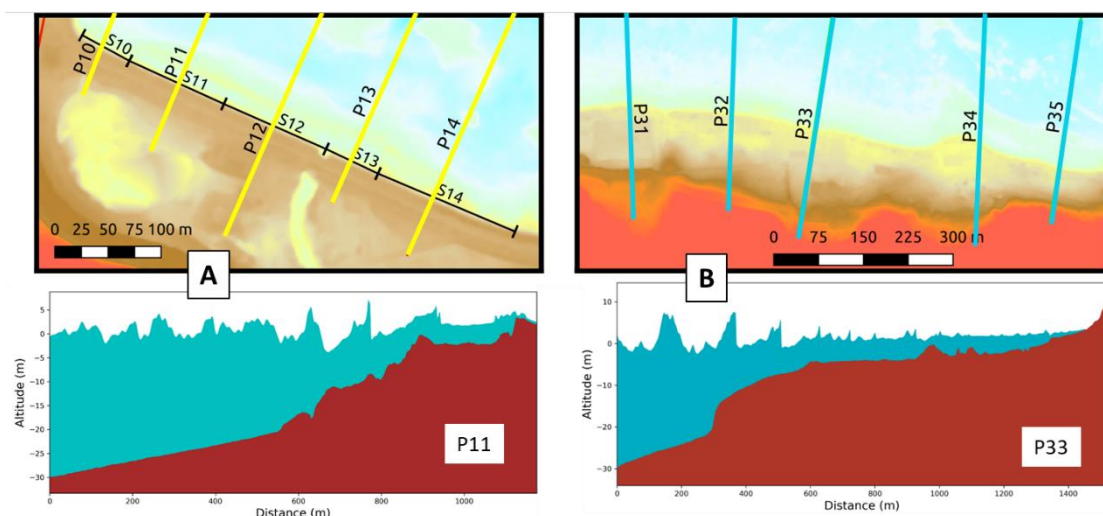


Figure 52 : Illustration des 2 types de profils, A : segmentation du linéaire côtier, calcul des débits franchissant par SWASH (en bas) pour une injection dans Uhaina ; B : calcul de la submersion directement avec SWASH.

7. Validation : Simulation de la tempête Adrian

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

Les simulations concernent uniquement les secteurs du front de mer de Bastia et Bastia sud car il n'y a pas d'observations pour Bastia nord. Les forçages utilisés pour la modélisation proviennent pour :

- les débits des cours d'eau de l'HydroPortail (<https://hydro.eaufrance.fr>)
- les conditions de vagues au large 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 de Bastia Poretta
- les niveaux d'eau au large de reconstruits en additionnant la marée issue de FES2014 avec la surcote (baromètre inverse) déduit des enregistrements météorologiques à l'aéroport de Bastia Poretta

La Figure 53 représente la série temporelle des forçages météo-marins utilisés pour la modélisation de la submersion (période simulée allant du 29/10/ 03:00 au 30/10 08:00). On constate que lors de la tempête la hauteur significative des vagues (H_s), leur période pic (T_p) et leur direction pic (dp_nau) ont atteint des valeurs $\sim 4.5\text{m}$, 10s , et 154° . En ce qui concerne les niveaux d'eau (Xe_NGF) les vitesses (u_{10}) et les directions du vent, ces valeurs sont respectivement de $\sim 0.5\text{m}$, 16 m/s et 140° . On outre en remarque un déphasage temporelle d'environ 4h entre le pic de vent/niveaux d'eau et le pic de H_s des vagues.

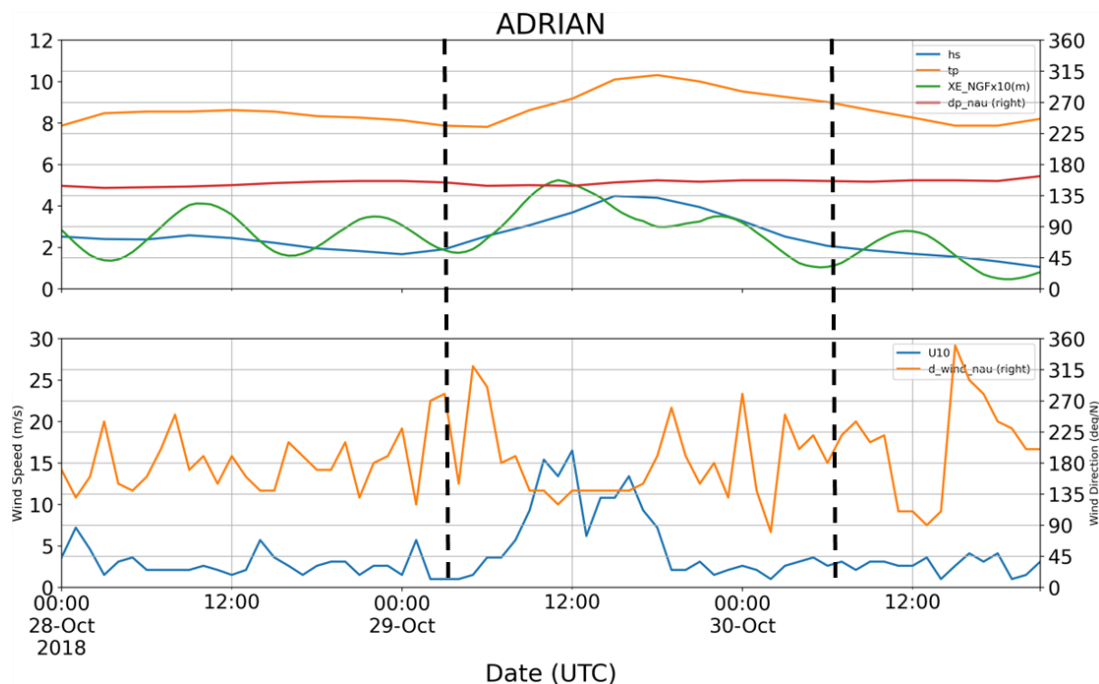


Figure 53 : Série temporelle des forçages météo-marins utilisés pour simuler la submersion générée par la tempête ADRIAN.

La simulation de la propagation des vagues du large vers le rivage avec WW3 (Figure 54) montre :

- d'une part, le rôle de protection du vieux port Bastia (au sud) et du port de Bastia (au nord) où seules des vagues inférieures à 1.5m de Hs peuvent pénétrer
- et d'autre part, la forte exposition du linéaire côtier encadré par ces 2 ports avec des vagues pouvant dépasser les 3m de Hs avec une période pic de 10s qui vont venir déferler sur le front de mer

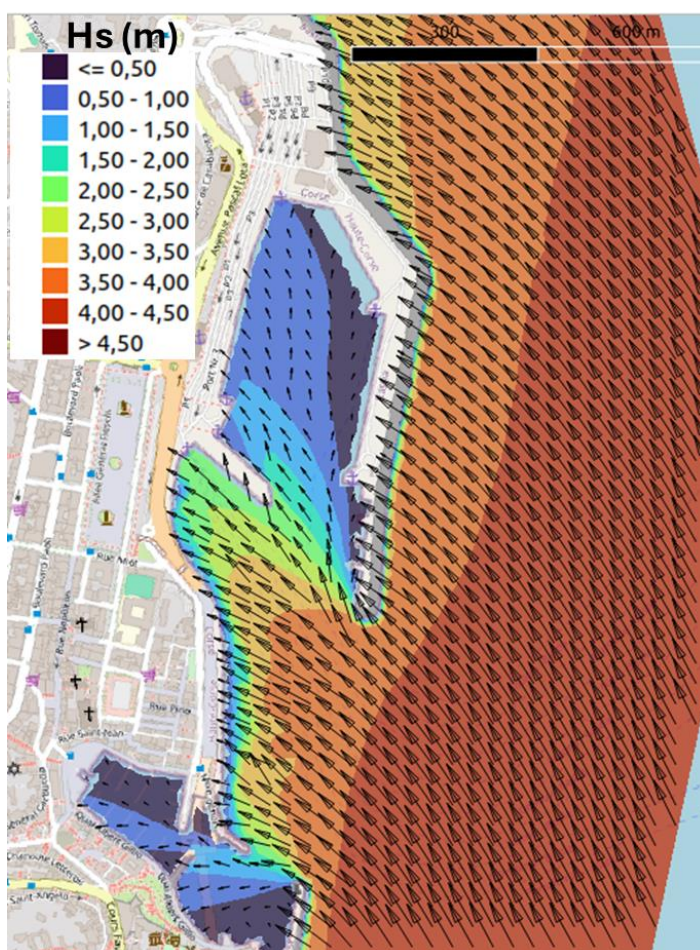


Figure 54 : Simulation des hauteurs significatives maximales des vagues et de leur direction de propagation (flèches) lors de la tempête ADRIAN sur le front de mer de Bastia.

La modélisation de l'événement mettant en œuvre la chaîne complète des codes WW3/SWASH/UHAINA sur ce secteur permet de reproduire les observations illustrées Figure 12 avec :

- la submersion du quai des Martyrs et la pénétration des écoulements d'eau au niveau des rues (Figure 55 à gauche) ;
- l'inondation des abords de l'Allée du 173ème RIM (Figure 55 à droite).

En ce qui concerne Bastia sud, la chaîne de modélisation permet également de capturer les laines de mer observées à la suite de la tempête ADRIAN au nord du Lotissement Plage de la Marana.

Ces résultats montrent donc un bon accord avec les observations.

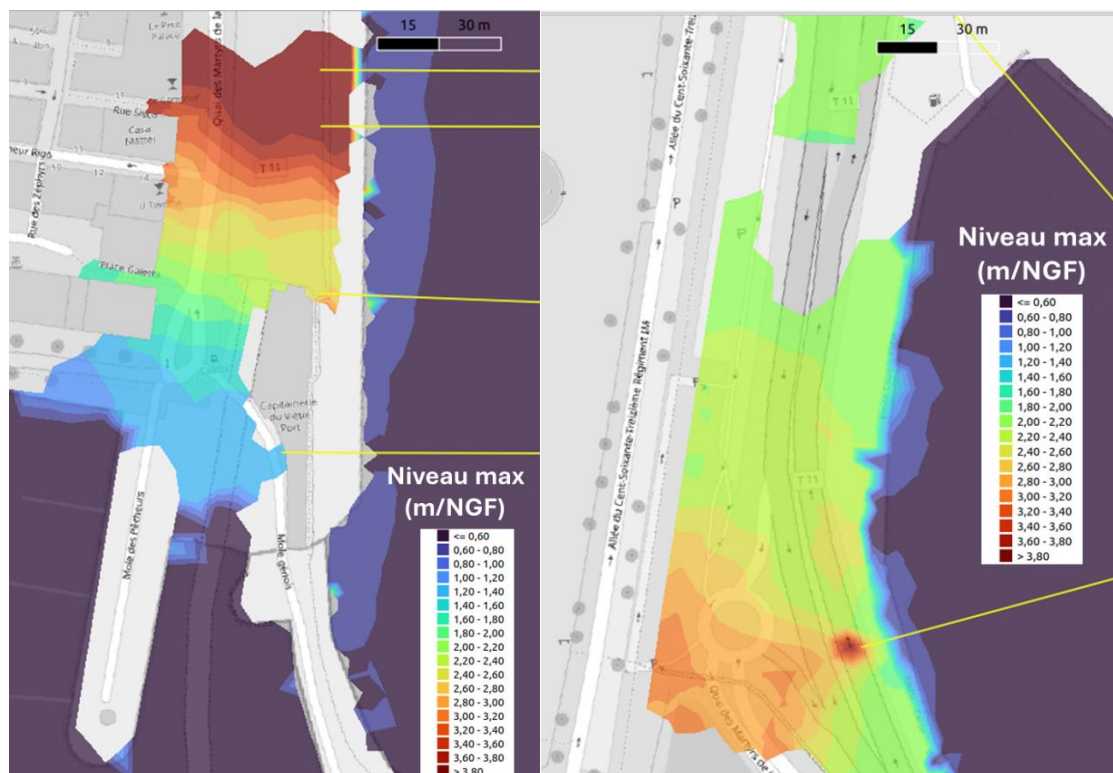


Figure 55 : Niveaux maximaux du plan d'eau simulés sur le front de mer de Bastia : Quai des Martyrs à gauche et Allée du 173^{ème} RIM à droite. Traits jaunes : profils SWASH.

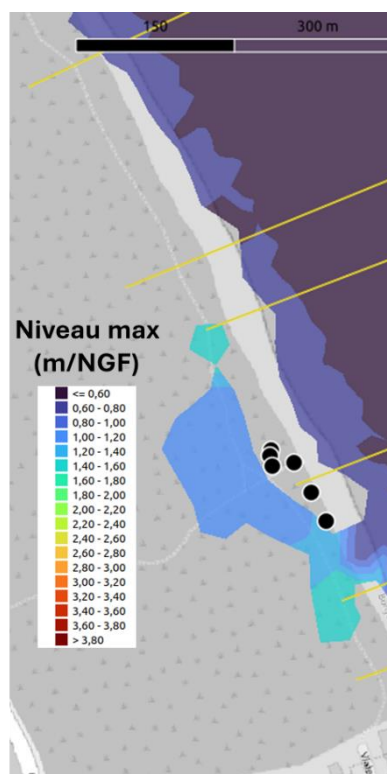


Figure 56 : Niveaux maximaux du plan d'eau simulés au nord du Lotissement Plage de la Marana. Traits jaunes : profils SWASH. Points noirs : observations des hautes mers pour ADRIAN.

8. Simulation des événements de référence

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

8.1.1. 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 6 scénarios présélectionnés (voir Tableau 2, 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)
14	6.31	10.37	150	14.03	157	0.25
17	5.95	10.24	150	15.34	157	0.3
22	5.34	9.68	150	15.51	157	0.35
26	4.6	9.25	150	14.83	157	0.4
32	4.26	8.5	150	9.64	157	0.45
38	2.97	7.89	150	9.36	157	0.5

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

Dans un premier temps, la chronologie de la tempête Adrian (Figure 53) a été normalisée et appliquée aux différents scénarios afin d'obtenir des séries temporelles des forçages météo-marins pour les différents scénarios. Un exemple des forçages obtenus pour le scénario 14 avec les niveaux d'eau pour l'actuel (sse_actuel) et à horizon 2100 (sse_2100) est illustré Figure 57 (les directions des vagues et du vent sont constantes, respectivement de 150° et de 157°).

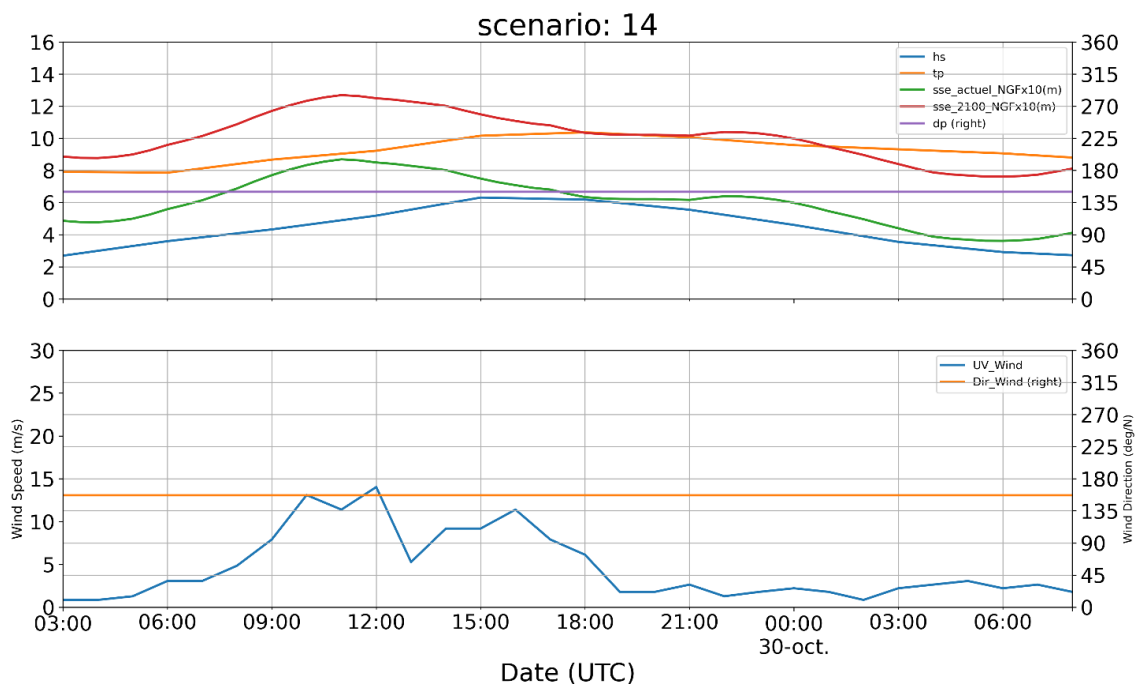


Figure 57 : Exemple de série temporelle des forçages météo-marins obtenus pour le scénario 14.

Par la suite, les séries temporelles ainsi obtenues ont été utilisées pour simuler les 6 scénarios pour chacun des secteurs étudiés avec le chaînage des codes WW3 et SWASH. A ce stade de l'étude, pour la sélection des scénarios, l'utilisation d'UHAINA n'est pas nécessaire. L'utilisation de WW3 et SWASH est suffisante pour le calcul des volumes débordant et/ou franchissant. Les résultats de ces simulations indiquent que les scénarios les plus impactants sont :

- 14 et 32 pour Bastia nord
- 14 et 17 pour le front de mer de Bastia
- 14 et 22 pour Bastia sud

Ce sont donc ces 2 scénarios par site (au lieu des 6 scénarios initiaux du Tableau 2) 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 les 3 secteurs étudiés.

8.1.2. Exemples de résultats de simulation

Les résultats bruts des simulations sont présentés en exemple pour le secteur du front de mer de Bastia (Figure 58, Figure 59 et Figure 62) et du grau de l'étang de Biguglia (Figure 60, Figure 61 et Figure 63) : carte du niveau maximal du plan d'eau, carte de hauteur d'eau maximale, carte des vitesses d'écoulement maximales, carte des vitesses de montée des eaux, cartes des aléas. Des zooms sur d'autres secteurs sont présentés en Annexe 4.

La submersion marine sur le front de mer de Bastia est contrôlée par les franchissements de paquets de mer aussi bien à l'horizon actuel qu'à l'échéance 2100. L'inondation peut atteindre des zones dont les altitudes sont proches des 7 m/NGF. Par secteurs, les quais se retrouvent avec plus de 1m de hauteur d'eau avec des écoulements qui se propagent dans les rues adjacentes avec des vitesses dépassant 1 m/s. Les hauteurs maximales d'eau (dépassant les 2m) se retrouvent rue des Zéphyr.

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 faible à une vitesse de montée des eaux élevée a été estimé à 0.30 m/h.

Sur le front de mer de Bastia, la vitesse de montée des eaux (V_m) est faible sauf au nord de la rue des Zéphyrus ($V_m \sim 1$ m/h) là où les vitesses d'écoulement sont également rapides (> 0.5 m/s).

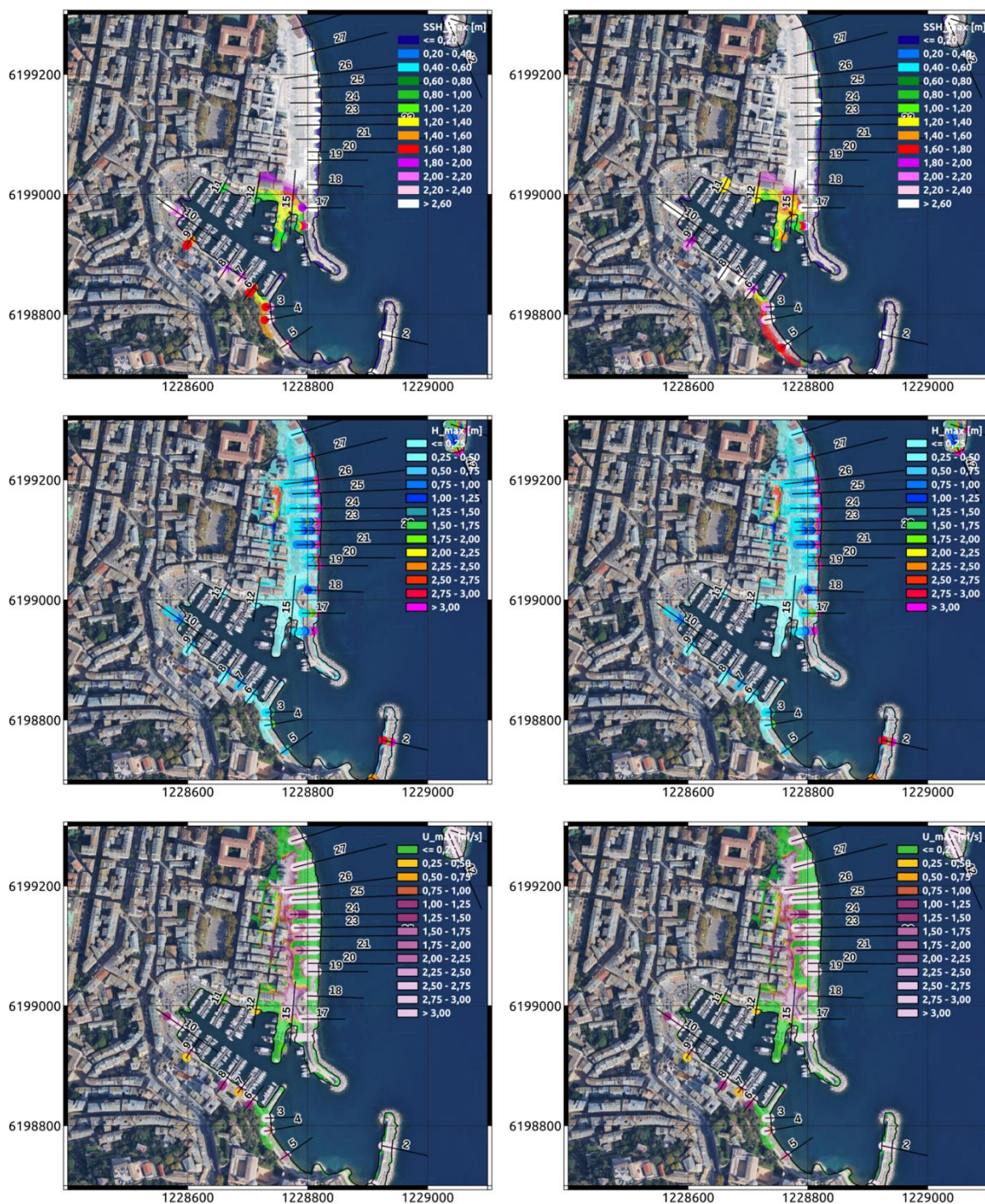


Figure 58 : Zoom sur le secteur du Vieux Port de Bastia, pour le scénario 14 « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Niveau maximal du plan d'eau (SSH_max m/NGF, en haut), Hauteur d'eau maximale (H_max, au milieu) et Vitesse d'écoulement maximale (U_max, en bas).

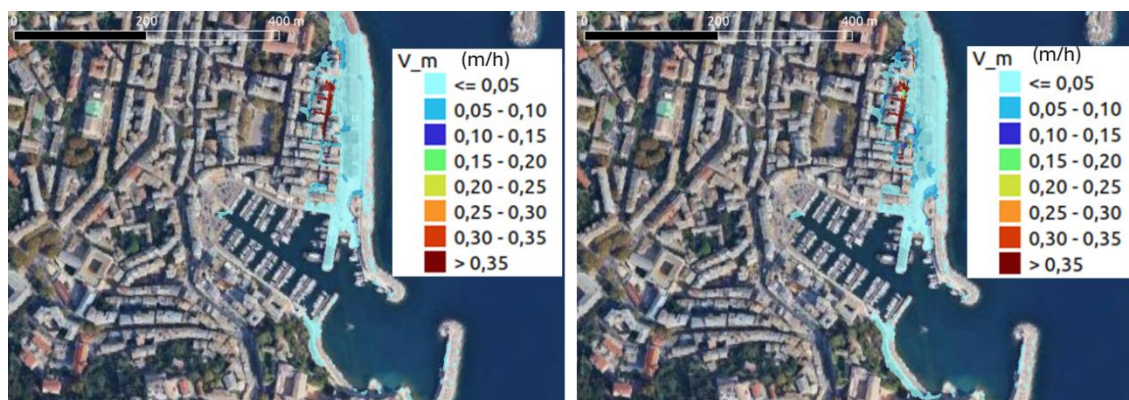


Figure 59 : Zoom sur le secteur du Vieux Port de Bastia, pour le scénario 14 « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Vitesse de montée des eaux (V_m).

En ce qui concerne le secteur du grau de l'étang de Biguglia, on constate que les régimes de débordement et de franchissements par paquets de mer contribuent à la submersion marine pour les 2 échéances temporelles étudiées. Les débordements se limitent aux zones basses dans les altitudes de situent entre ~1.1 m et 1.5 m alors que les franchissements peuvent dépasser les cordons dunaires pour inondées secteurs allant jusqu'à ~2.5 m d'altitude (échéance 2100). Les hauteurs d'eau maximales sont généralement inférieures à 0.5 m et à 1 m respectivement pour l'actuel et 2100.

En dehors des zones de franchissements et des points d'injection de débit dans l'étang de Biguglia, Les vitesses des écoulements sont faibles (inférieures à 0.2 m/s). Il en est de même pour les vitesses de montée des eaux qui restent inférieures à 0.3 m/h.

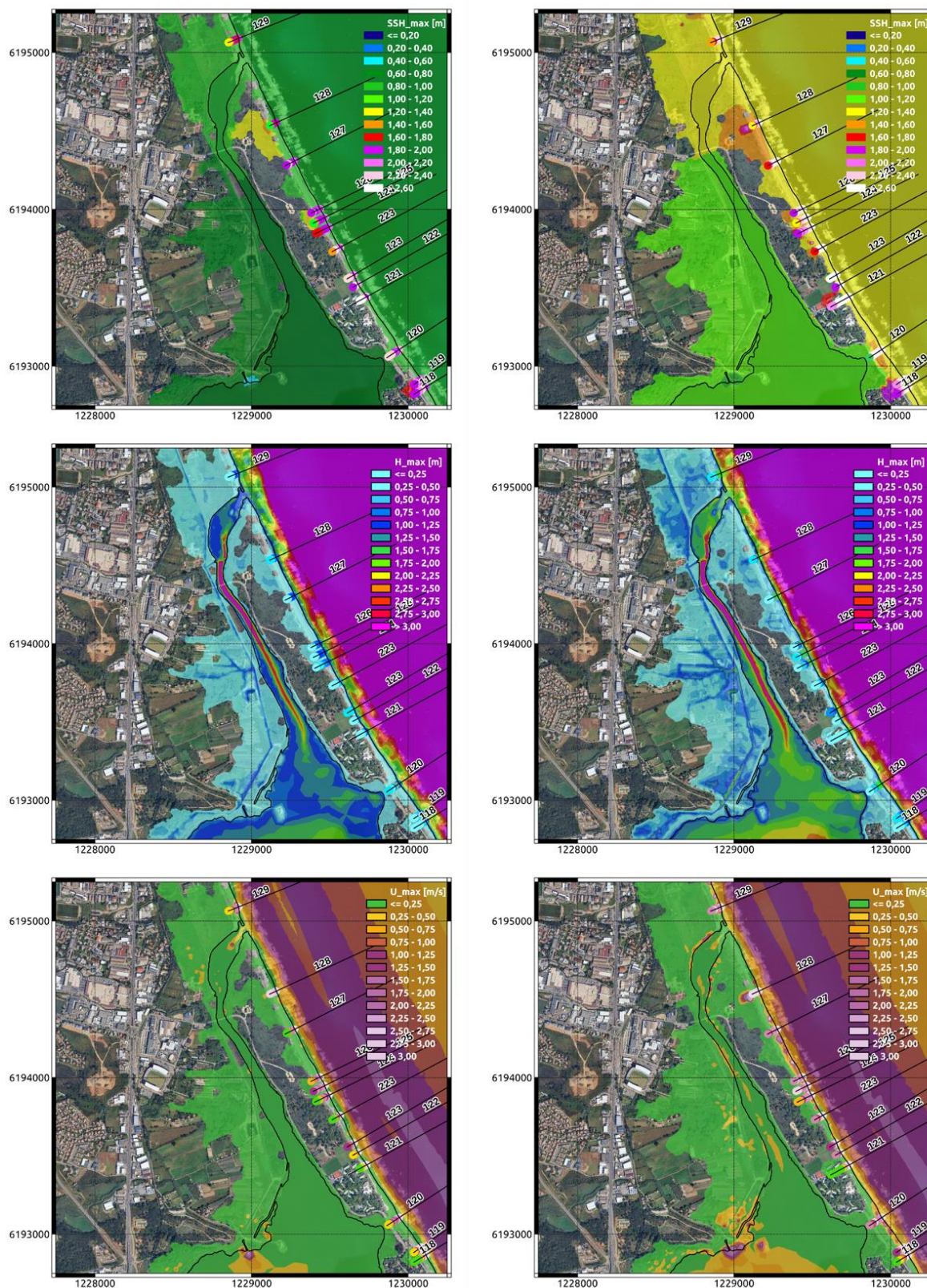


Figure 60 : Zoom sur le secteur du Grau de l'étang de Biguglia, pour le scénario 14 « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Niveau maximal du plan d'eau (SSH_max/NGF, en haut), Hauteur d'eau maximale (H_max, au milieu) et Vitesse d'écoulement maximale (U_max, en bas).

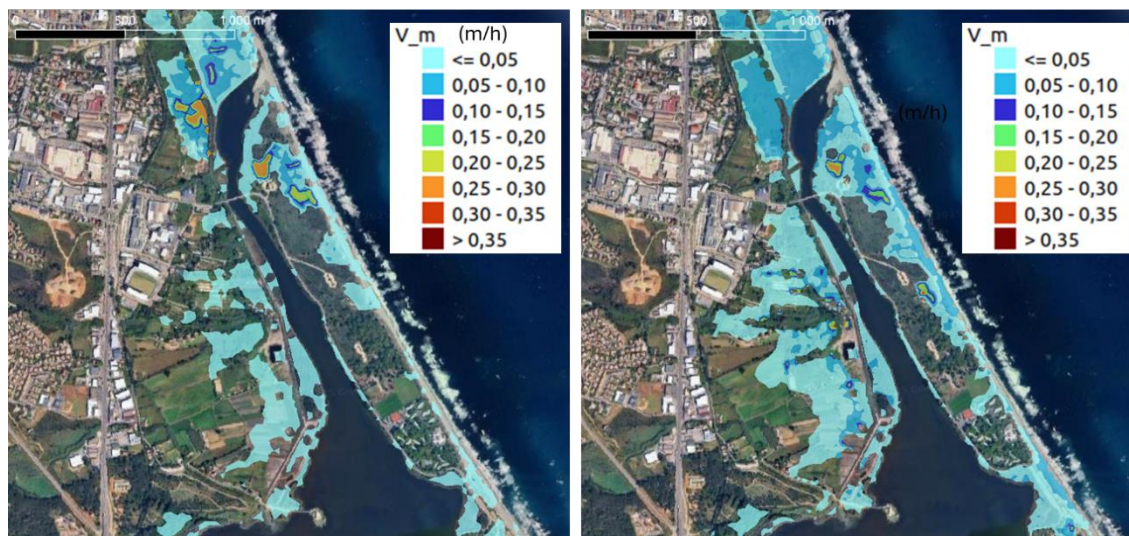


Figure 61 : Zoom sur le secteur du Grau de l'étang de Biguglia, pour le scénario 14 « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Vitesse de montée des eaux (V_m).

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 3.

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

Dans les 3 domaines étudiés ici, la vitesse de montée des eaux est soit lente (comme sur la zone du grau de l'étang de Biguglia), ou bien rapide dans des secteurs caractérisés par des vitesses d'écoulement élevées (comme pour le front de mer de Bastia). C'est pourquoi 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 4 (voir ci-après) qui a été directement intégrée dans la chaîne de calcul. Les Figure 62 et Figure 63 illustrent les sorties brutes des modèles montrant des aléas fort à très fort pour le front de mer de Bastia et majoritairement faible à modéré pour le secteur du l'étang de Biguglia éloignés du front de mer.

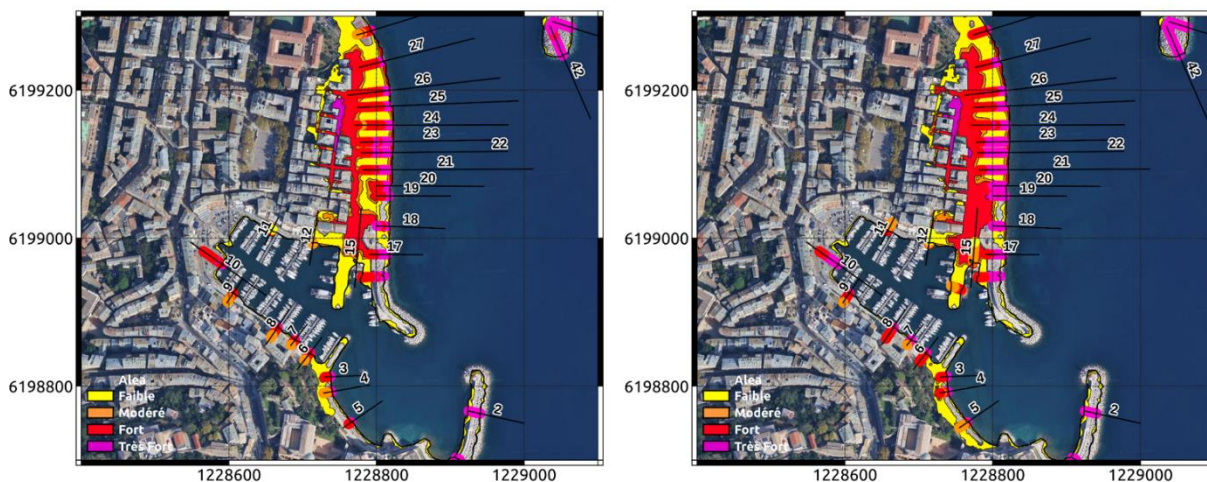


Figure 62 : Carte d'aléa sur le front de mer de Bastia pour le scénario 14, pour les événements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite), zoom sur le Vieux Port de Bastia.

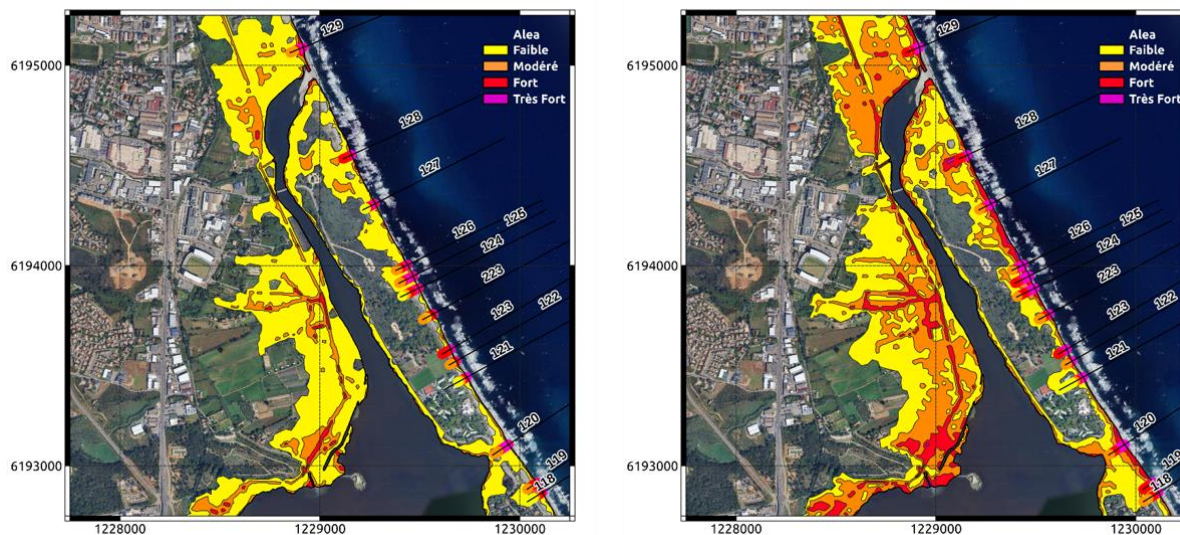


Figure 63 : Cartes d'aléa pour le scénario 14 pour les événements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite), zoom sur le grau de l'étang Biguglia.

9. Cartographie de l'aléa

9.1. 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 64 : 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 4 : Qualification de l'aléa de submersion marine en fonction des classes de hauteur d'eau (H) et des courants à terre (V).

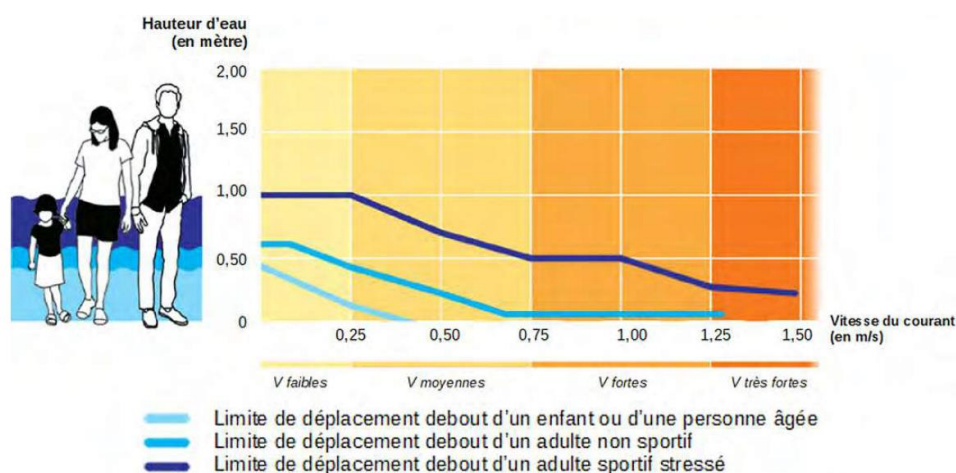


Figure 64 : Possibilité de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (MEDD, 2004).

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

9.2. FUSION DES RESULTATS DE MODELISATION

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.

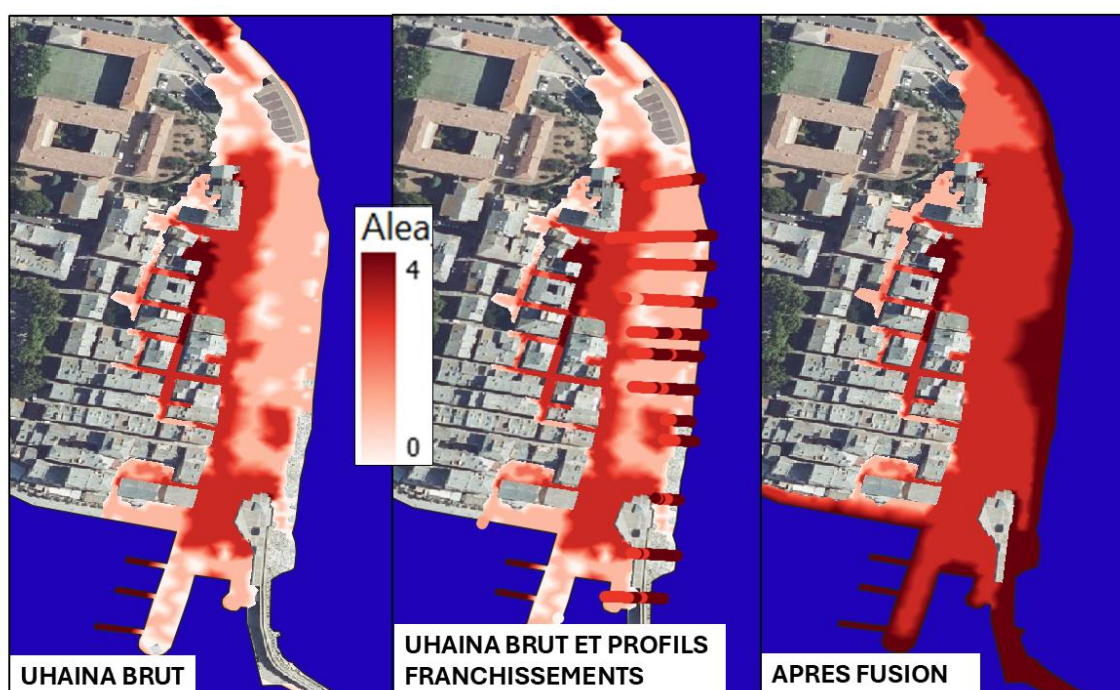


Figure 65 : Exemple de résultats (à droite) après fusion des sorties du modèle UHAINA (à gauche) et des profils du modèle SWASH (au centre), secteur du quai des Martyrs à Bastia.

9.3. 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 66).

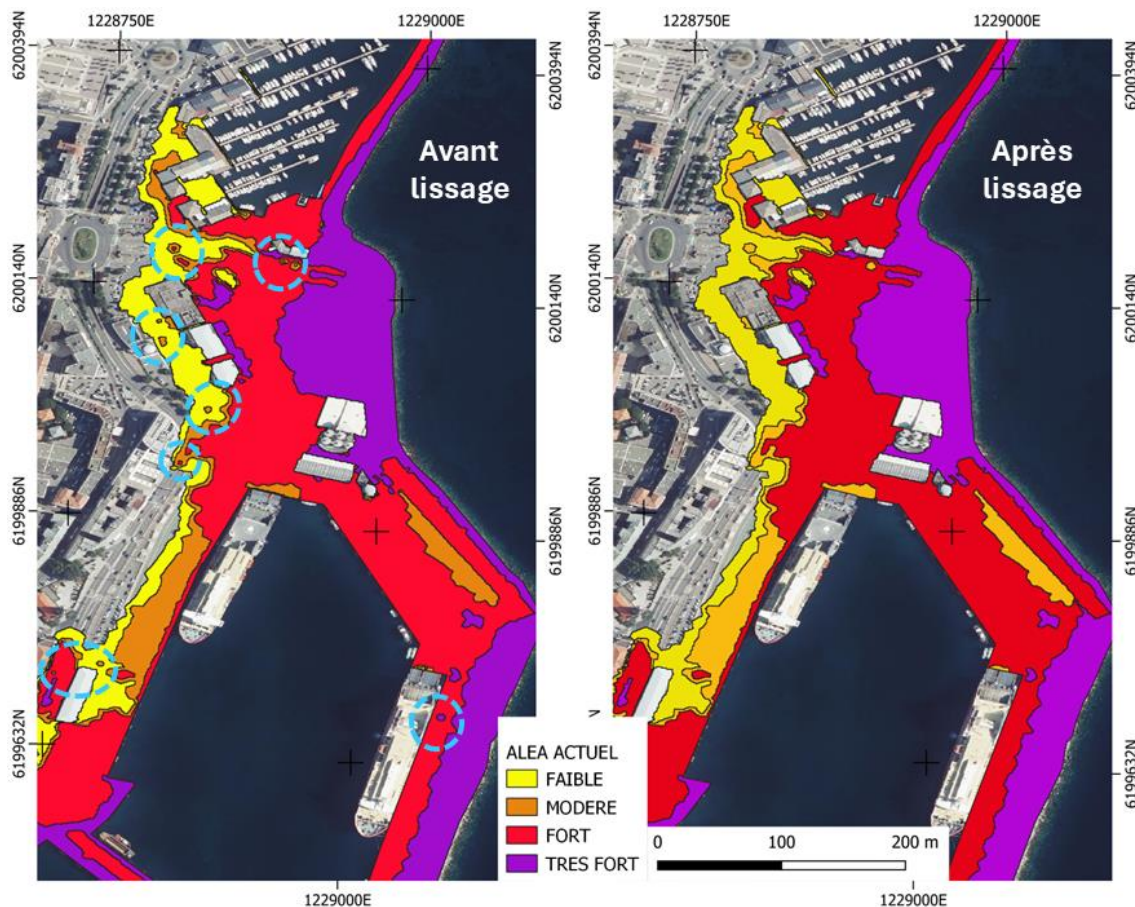


Figure 66 : Exemple (pointillés bleus) de petits polygones fusionnés avec les polygones adjacents.

9.4. 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).

9.4.1. Amélioration des sous-estimations

Au niveau des embouchures des cours d'eau de Poggiolo (Santa-Maria-di-Lota) et de Grigione (San-Martino-di-Lota), 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 telle que l'illustre la Figure 67 pour l'évènement 2100.

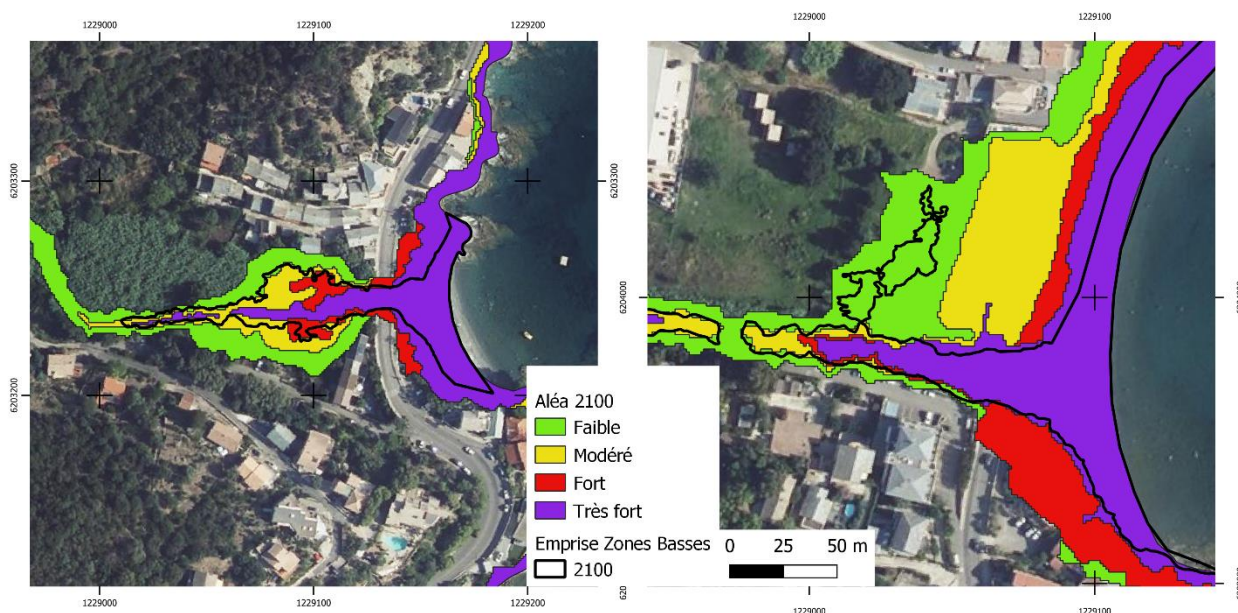


Figure 67 : Comparaison entre l'aléa 2100 calculé dans la présente étude (en couleur) et l'emprise des ZBPESM cartographiée dans l'approche « statique » (en noir).

D'autre part, l'approche « dynamique » a permis de caractériser la submersion marine par franchissement de paquets de mer notamment au niveau du front de mer de Bastia, quai des Martyrs et dans les rues perpendiculaires ainsi que sur la route territoriale au sud du tunnel de Bastia, comme vu précédemment (Figure 73 et Figure 76), là où l'approche « statique » n'indique aucune submersion marine. Sur le Lido de la Marana, l'emprise des franchissements de paquets de mer calculée par l'approche « dynamique » dépasse largement et sur la plupart du linéaire la largeur du cordon dunaire et la largeur de la bande de sécurité¹⁷ de 50 m appliquée sur la cartographie des ZBPESM de l'approche « statique » (Figure 75, rapport BRGM/RP-69915-FR, 2021) telle que recommandée dans le guide du MEDDE de 2014.

9.4.2. Amélioration des sur-estimations

La non prise en compte de la durée de l'évènement par l'approche « statique » pour le calcul des volumes réellement débordant, a permis d'améliorer les surestimations de la cartographie des ZBPESM notamment au niveau des zones les plus basses, comme par exemple, autour de l'étang de Biguglia (Figure 68).

¹⁷ 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.

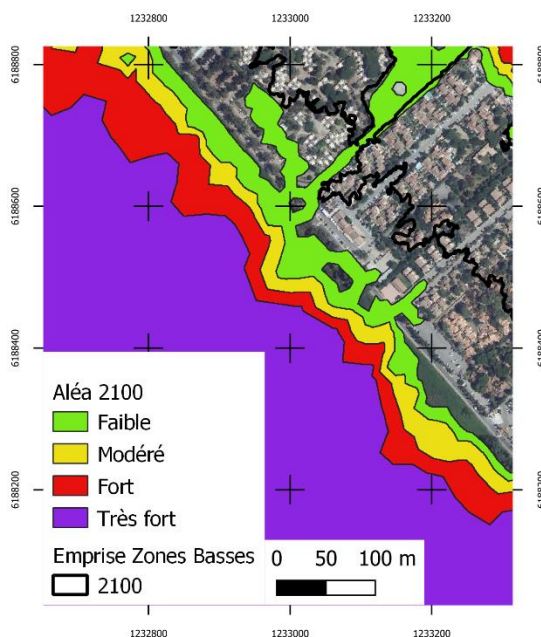


Figure 68 : Exemple de surestimation de l’emprise de la submersion marine pour l’évènement 2100 avec en noir, la limite de l’emprise des ZBPESM de l’approche « statique » et en couleur l’emprise de l’aléa 2100, sur la commune de Biguglia (secteur Pineto).

9.5. 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 à Bastia et au nord de la ville, la largeur de cette bande de sécurité de 25 m sera réduite lorsque l’altitude dépasse 8 m/NGF.

Cette bande de sécurité sera associée à un aléa fort. L’aléa des zones situées au sein de cette bande sera donc rehaussé lorsqu’il est nul, faible ou modéré.

Il est souligné qu’au niveau du Lido de la Marana (Figure 69), l’aléa submersion marine lié essentiellement aux franchissements de paquets de mer est déjà en aléa fort à très fort. Cette bande de sécurité n’a donc pas ou peu d’impact sur le niveau d’aléa (quelques micro-zones en aléa modéré).

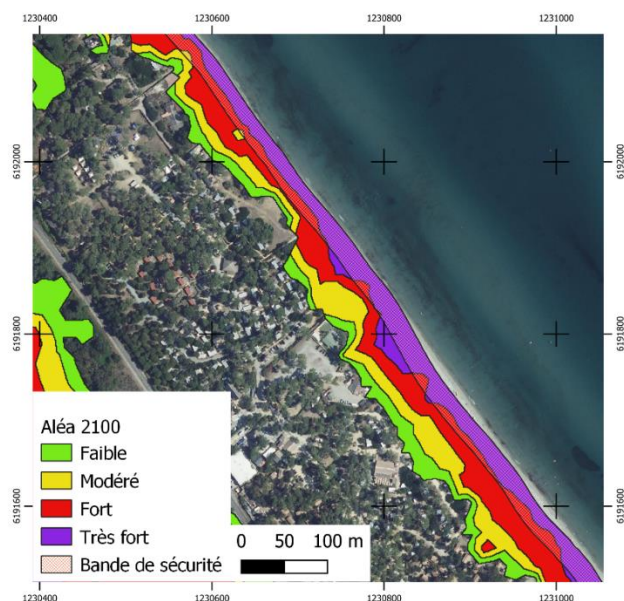


Figure 69 : Exemple de bande de sécurité liée aux chocs mécaniques et projections sur le Lido de la Marana (Biguglia).

Elle a en revanche un impact significatif sur d'autres secteurs comme la route territoriale au sud de Bastia. Une zone où l'aléa actuel est nul et l'aléa 2100 est modéré, passe en aléa fort (Figure 70).

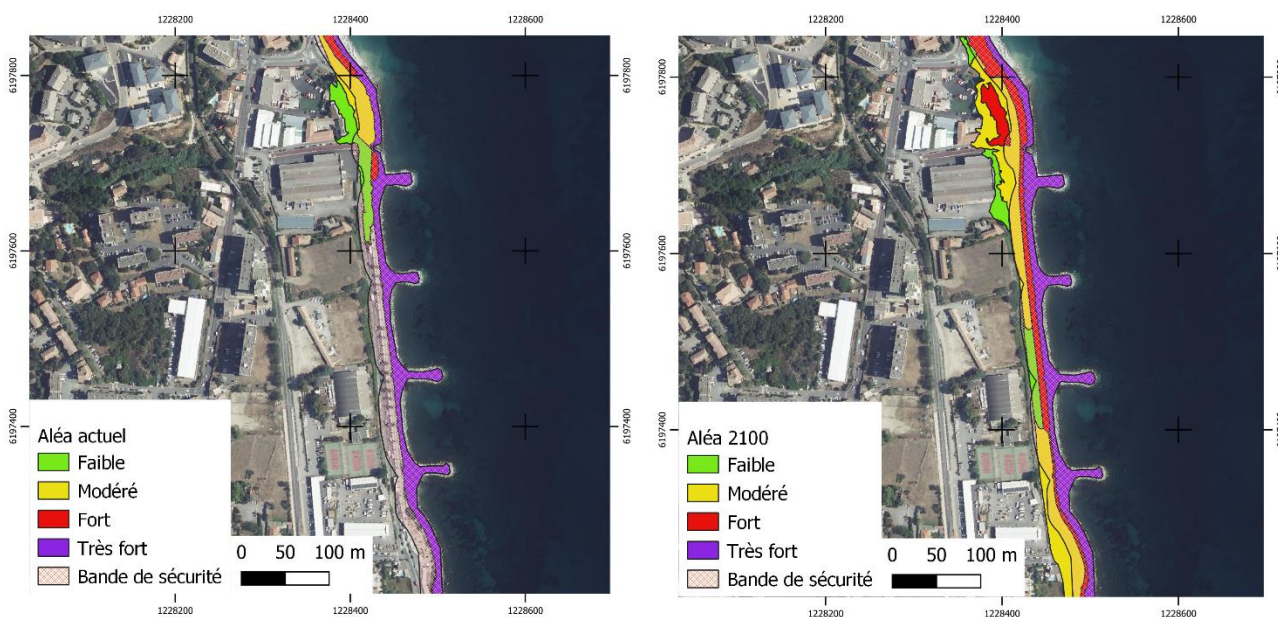


Figure 70 : Exemple de bande de sécurité au niveau de la route territoriale au sud de Bastia, pour l'aléa actuel à gauche et l'aléa 2100 à droite.

La Figure 71 illustre les zones 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.

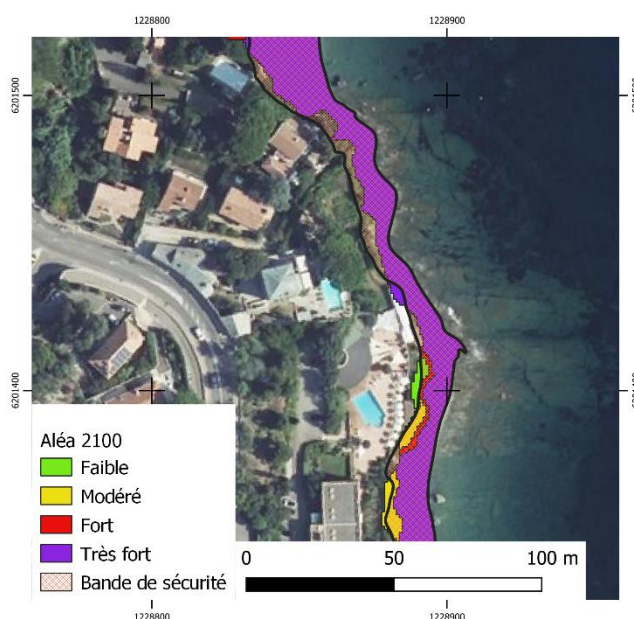


Figure 71 : Exemple de bande de sécurité dont la largeur forfaitaire de 25 m est limitée lorsque l'altitude du terrain naturel dépasse 8 m/NGF.

9.6. EXEMPLES DE RESULTATS

Le secteur Nord de Bastia (communes de Ville-Di-Pietrabugno, San-Martino-Di-Lota et Santa-Maria-Di Lota) se caractérise par une exposition dominante aux franchissements de paquets de mer avec des vitesses d'écoulement importantes et donc un aléa très fort sur les premiers mètres du littoral pour les événements actuel et 2100. Seules les zones basses au niveau des embouchures du ruisseau de Poggiolo sur la commune de Santa-Maria-Di-Lota et du ruisseau de Grisgione sur la commune de San-Martino-Di-Lota, sont exposées à des submersions marines par débordements. Dans ces zones, les emprises de la submersion pénètrent plus loin à l'intérieur des terres mais l'aléa demeure faible à modéré en raison de vitesses d'écoulement plus faibles que sur le front de mer (Figure 72).

Le centre-ville de Bastia est également marqué par d'importants franchissements de paquets de mer notamment au droit du quai des Martyrs (flèches rouges, Figure 73), engendrant des vitesses d'écoulement importantes comme cela a pu être constaté lors d'événements historiques (tempête Adrian notamment). Ces franchissements induisent des écoulements dans certaines rues en arrière avec des vitesses importantes comme indiqués dans le secteur des pointillés noirs sur la carte des vitesses de la Figure 73 et Figure 12 (rue Pino par exemple). Dans ce même secteur (rue des Zéphyrus en particulier) qui représente un point bas, les hauteurs d'eau sont plus importantes avec un aléa fort à très fort (cf. pointillés noirs, Figure 73).

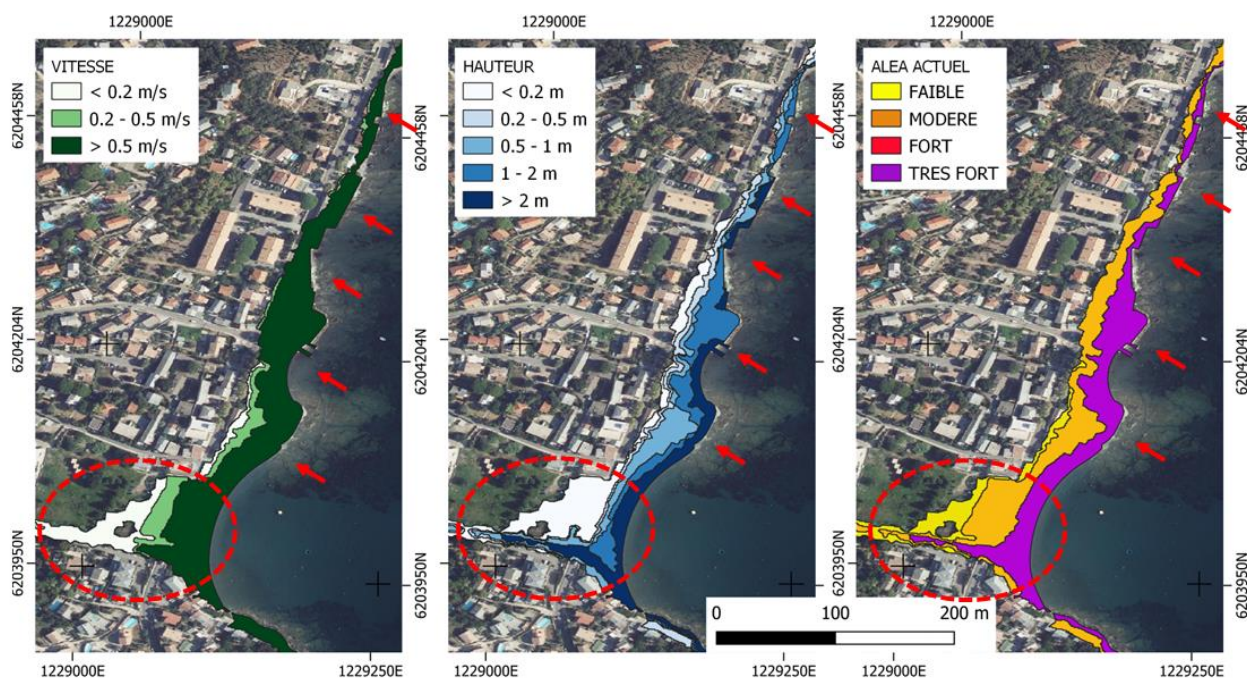


Figure 72 : Exemple du secteur de Miomo (commune de Santa-Maria-Di-Lota) pour l'évènement actuel, avec des débordements par l'embouchure du ruisseau de Poggiolo (pointillés rouges) et les franchissements de paquets de mer dominants sur le reste du linéaire (flèches rouges).

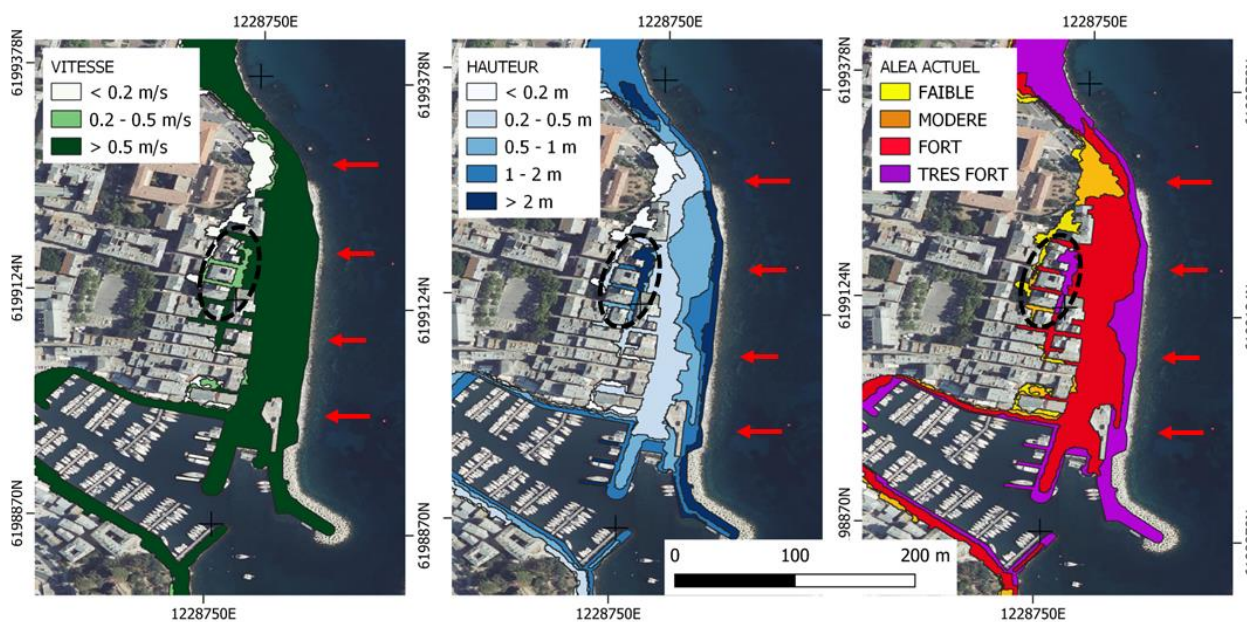


Figure 73 : Exemple du secteur du quai des Martyrs à Bastia pour l'évènement actuel, avec des franchissements importants engendrant des vitesses importantes (> 0.5 m/s) et un aléa fort à très fort (pointillés noirs).

Les ports (Vieux Port, Gare Maritime et Toga) sont concernés par des débordements au niveau des quais. Le secteur à proximité de la place Saint-Nicolas (entre l'exutoire du tunnel et le rond-point de Nogues) est concerné par la combinaison de débordements et de franchissements de paquets de mer avec un aléa très fort induit par des vitesses d'écoulement importantes au niveau de la route territoriale T11 et du parking extérieur Saint-Nicolas.

La route territoriale T11 (route du front de mer) au sud du tunnel de Bastia est exposée à un aléa fort à très fort en lien avec les vitesses d'écoulement importantes générées par des franchissements de paquets de mer. Ces franchissements sont suffisamment importants pour générer des volumes d'eau inondant le secteur du parking sous la maison Dane ainsi que le secteur entre la route T11 et la caserne des pompiers.

Au sud de Bastia, tout le pourtour de l'étang de Biguglia qui présente une topographie basse est exposé à des submersions par débordements avec des entrées d'eau qui s'effectue par le grau de l'étang. L'emprise de la submersion est donc relativement importante mais l'aléa ne dépasse pas globalement pas les niveaux faible et modéré en lien avec des vitesses assez faibles (< 0.2 m/s, Figure 74).

En revanche, la totalité du cordon dunaire du Lido de la Marana est exposée à des franchissements de paquets de mer susceptibles d'inonder les zones basses en arrière (notamment des zones résidentielles, Figure 75).

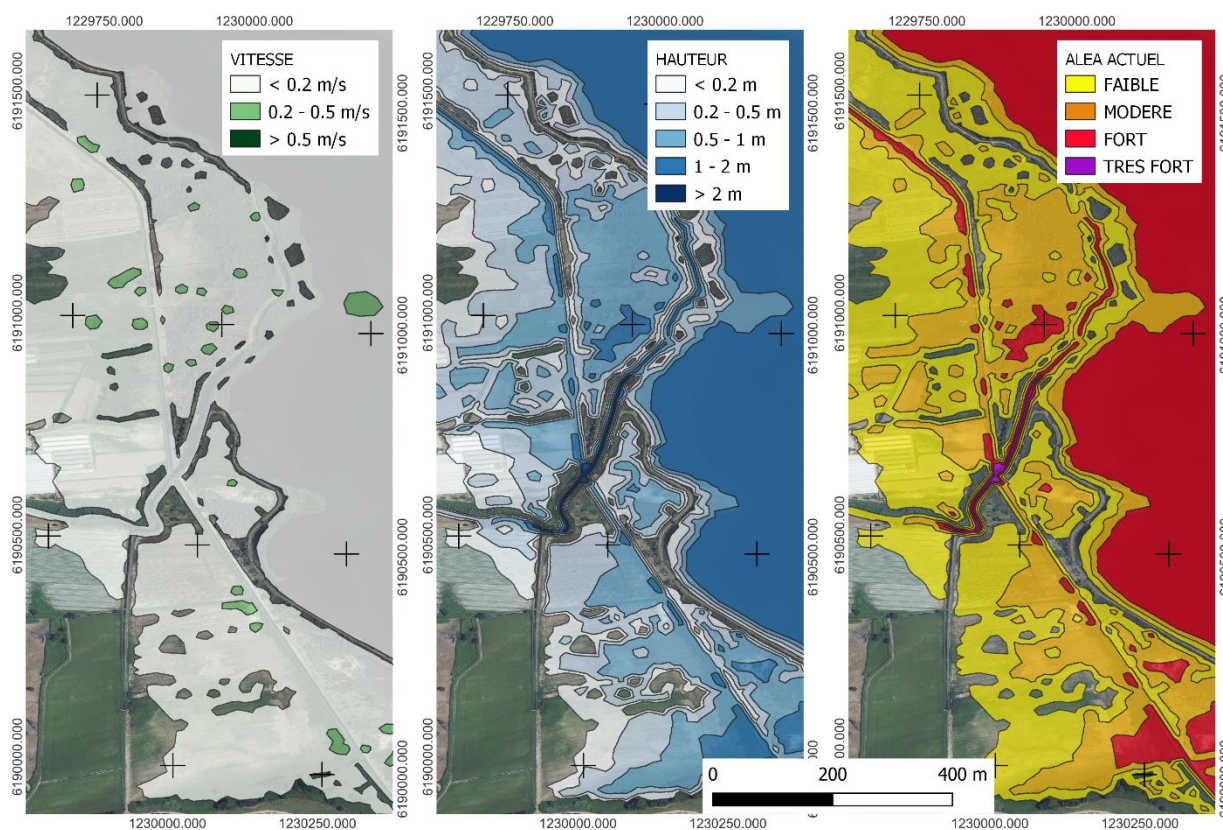


Figure 74 : Exemple de submersion marine par débordement sur la rive nord-ouest de l'étang de Biguglia.

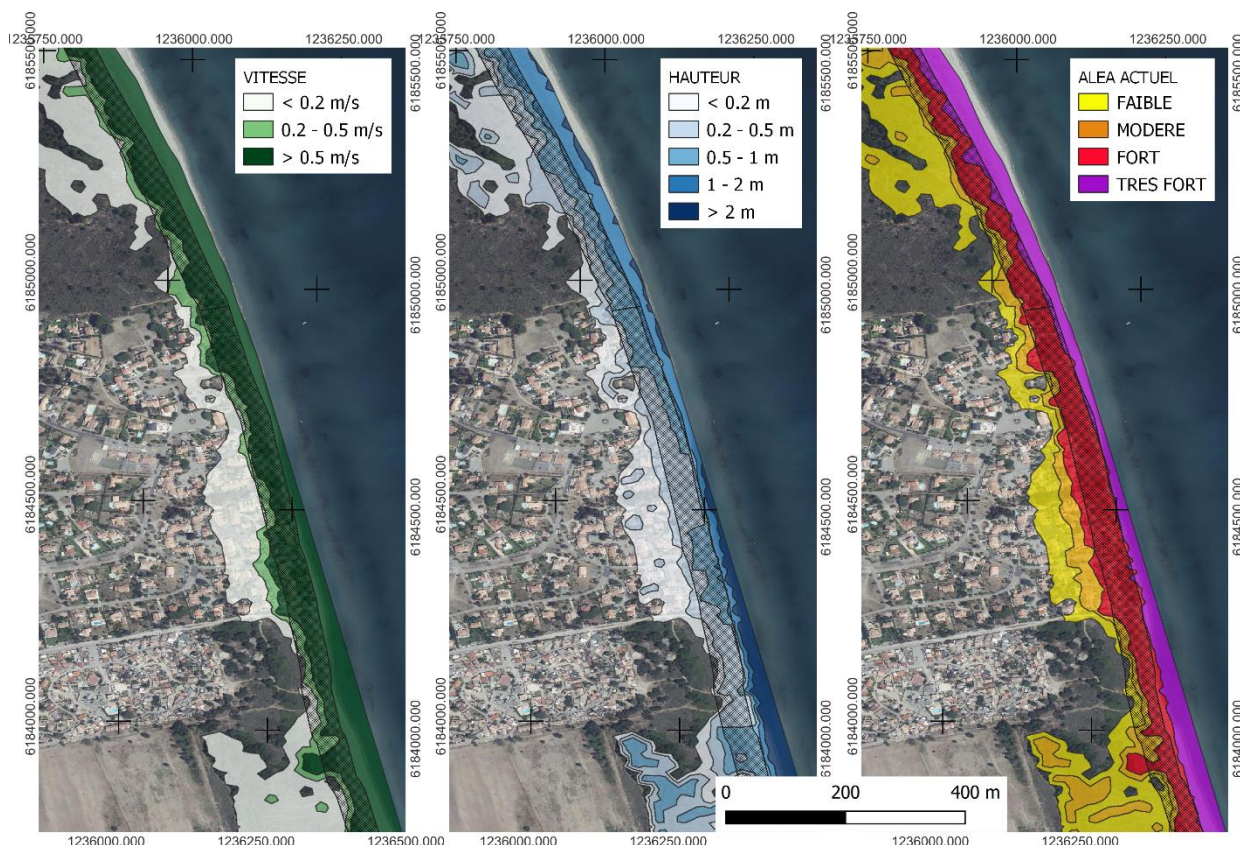


Figure 75 : Exemple de franchissements de paquets de mer sur le cordon dunaire du Lido de la Marana pour l'évènement actuel. Superposition de la bande de sécurité (hachurée gris) appliquée dans l'approche « statique » (rapport BRGM/RP-69915-FR, 2021).

Les secteurs sur lesquels l'augmentation d'emprise de la submersion entre les évènements « actuel » et « 2100 » est le plus marquant correspondent au centre-ville de Bastia (place Saint-Nicolas, rond-point de Nogues), à la route territoriale T11 au sud du tunnel de Bastia entre la caserne des pompiers et l'Arinella (Figure 76) ainsi que les zones basses autour de l'étang de Biguglia. Ailleurs, la topographie contraint l'extension de la submersion et c'est l'augmentation du niveau d'aléa qui marque la différence entre les deux évènements.

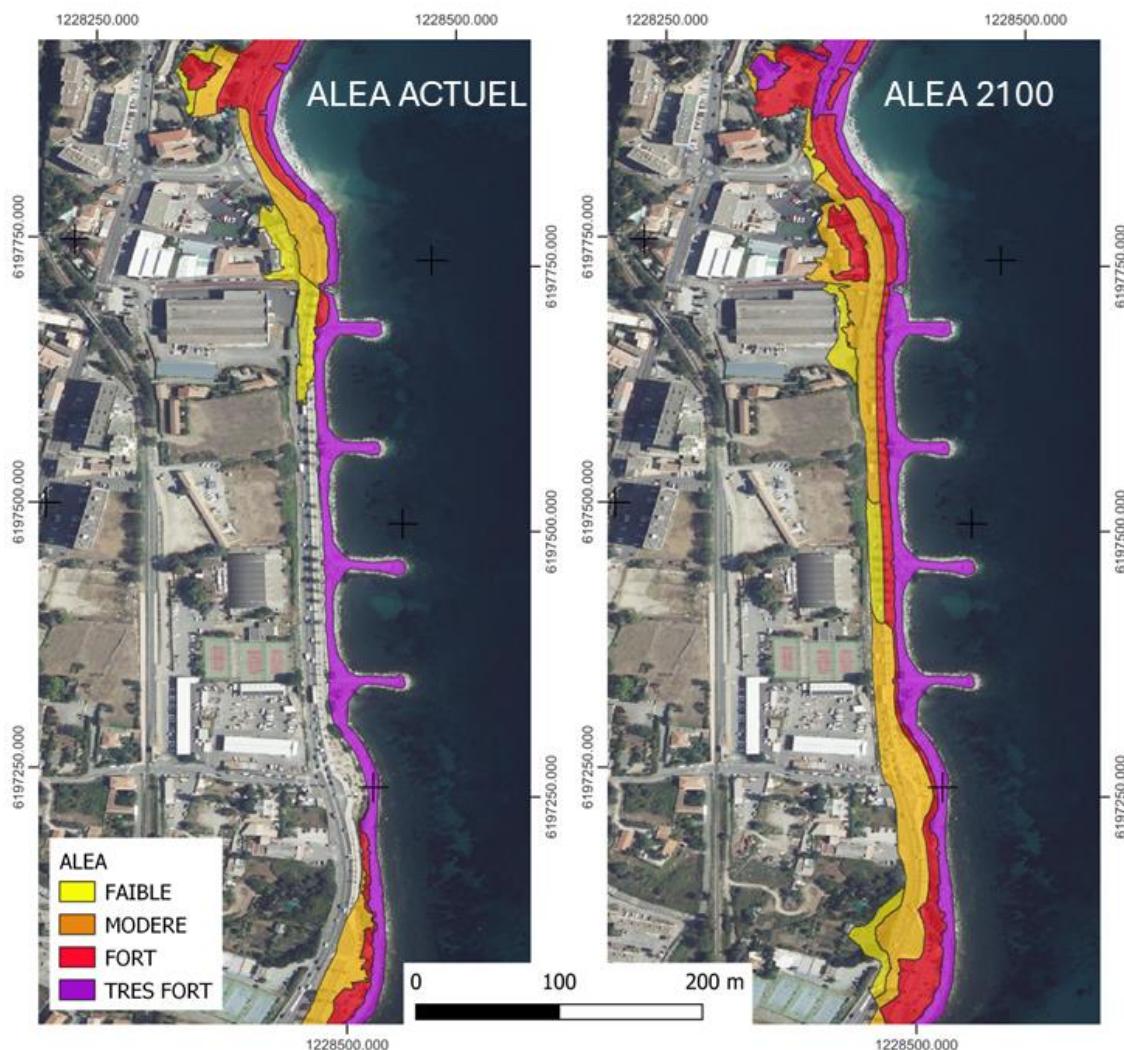


Figure 76 : Exemple de différence d'emprise de la submersion marine entre l'aléa « actuel » et l'aléa « 2100 », sur le secteur de la route territoriale T11 au sud de Bastia.

9.7. PRODUCTION DU SIG ET DE L'ATLAS NUMERIQUE

Les couches (shape) d'aléa ont été formatées selon le nouveau Géostandard¹⁸ du CNIG¹⁹ Plan de Prévention des Risques (PPR, v1. 2024) qui succède à l'ancien standard COVADIS PPR.

Les noms des couches doivent suivre le modèle « [codetypedoc]_codegaspar_zonealeareference_codealea_type objet.shp ». Les 4 couches suivantes sont fournies selon ce modèle :

- pprn_gasparAvenirBastiaNord_ZoneAleaReference_117_s ;
- pprn_gasparAvenirBastiaSud_ZoneAleaReference_117_s ;

¹⁸ Géostandard Risques, Plans de prévention des risques (PPR), Rapport du groupe de travail refonte des Géostandards Risques, version 1.0 – 10 décembre 2024.

¹⁹ Conseil National de l'Information Géolocalisée

- pprn_gasparAvenirBastiaNord_ZoneAleaEcheance100ans_117_s ;
- pprn_gasparAvenirBastiaSud_ZoneAleaEcheance100ans_117_s.

Il n'existe pas de modèle pour les couches de hauteur d'eau et de vitesse d'écoulement.

Pour le codetypedoc, c'est le terme « pprn » qui s'applique pour les PPR naturels prévisibles.

Le codegaspar implique un lien avec la base de données GASPAR²⁰. Comme le PPRN n'est pas encore prescrit, il n'y est pas référencé.

ZoneAleaReference correspond à l'aléa dit « actuel » et ZoneAleaReference100ans correspond à l'aléa dit « 2100 ».

Le codealea « 117 » correspond à de l'inondation par submersion marine.

Pour le type_objet, l'identifiant « s » est employé pour une géométrie surfacique.

Le détail des champs de chaque couche est présenté sur l'exemple de la Figure 77 avec les niveaux d'aléa détaillés dans le Tableau 5 (Géostandard Risques, 2024).

L'occurrence 100 correspond à un évènement de période de retour centennale.

OBJECTID	idZoneAlea	idproc	typeAlea	occurrence	niveauAlea	descriptio	
1	10	10	PPRN-L	117	100	04	Inondation par submersion marine
2	16	16	PPRN-L	117	100	06	Inondation par submersion marine
3	4	4	PPRN-L	117	100	01	Inondation par submersion marine
4	1	1	PPRN-L	117	100	02	Inondation par submersion marine

Figure 77 : Exemple des champs des shapes d'aléa selon le nouveau Géostandard du CNIG PPR.

Code	Libellé niveau
01	Faible
02	Moyen ou Modéré
04	Fort
06	Très fort ou Majeur

Tableau 5 : Liste des valeurs retenues pour caractériser l'intensité des aléas issue du nouveau géostandard risques.

Pour les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement, les couches au format shape produites et fournies sont les suivantes :

HTR_2100_BASTIA_NORD.shp	HTR_ACTUEL_BASTIA_NORD.shp
HTR_2100_BASTIA_SUD.shp	HTR_ACTUEL_BASTIA_SUD.shp
VIT_2100_BASTIA_NORD.shp	VIT_ACTUEL_BASTIA_NORD.shp
VIT_2100_BASTIA_SUD.shp	VIT_ACTUEL_BASTIA_SUD.shp

²⁰ Base nationale de Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques

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>).

10. 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 de Bastia et du cordon littoral du Lido de la Marana, aux franchissements de paquets de mer. La cartographie des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines (Rapport BRGM/RP-69915-FR, 2021) a permis d'identifier les zones exposées aux débordements, en particulier autour de l'étang de Biguglia qui représente une vaste zone lagunaire. 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-69915-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). 4 scénarios ont été entièrement modélisés sur la chaîne de modélisation.

Conformément aux consignes ministérielles du guide du MEDDE (2014, seuls les ouvrages portuaires de Bastia et de Ville-Di-Pietrabugno ont été considérés pérennes. Comme défini en concertation avec la DDT de Haute-Corse, 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'étang de Biguglia et au niveau des embouchures des cours d'eau (communes de San-Martino-di-Lota et de Santa-Maria-di-Lota) sous l'effet des débordements ainsi que dans le centre-ville de Bastia sous l'effet des franchissements de paquets de mer (quai des Martyrs et abords de la place Saint-Nicolas). 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 (communes de San-Martino-di-Lota et de Santa-Maria-di-Lota, route territoriale T11 de Bastia, par exemple). La totalité du cordon littoral du Lido de la Marana est exposé à des franchissements de paquets de mer, conduisant à l'inondation de zones basses situées en arrière. Ce constat conforte l'importance du rôle de protection naturelle que représente la dune dont l'état de conservation est par endroit très dégradé (cf. rapports du Réseau d'Observation du Littoral de Corse, quartiers résidentiels Maraninca à Borgo, Mariana à Lucciana).

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 (MEDE, 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 à Bastia et au nord de la ville, 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 ainsi que dans le Programme d'Actions de Prévention des Inondations de la Communauté de Communes Marana-Golo. C'est pourquoi les couches d'aléa ont été mises au format exploitable dans un Système d'Information Géographique selon le modèle du Géostandard Risque du Conseil National de l'Information Géolocalisée. 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.

11. 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.

Brodtkorb, P.A., et al. (2000) - "WAFO - A Matlab Toolbox For Analysis of Random Waves And Loads." Paper presented at the The Tenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Seattle, Washington, USA.

Brown, J. D., Spencer, T., and Moeller, I. (2007) - 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.

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 mer/Géo*, 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.

Colmet, et. al (2019) – Flux d'eau et de nutriments dans la lagune de Biguglia et l'estuaire du Santu. Rapport IFREMER

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.

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.

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., Guanache 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.

Louisor J., Rohmer J., Bulteau T., Boulahya F., Pedreros R., Maspataud A., Mugica J. (2021) - Deriving the 100-Year Total Water Level around the Coast of Corsica by Combining Trivariate Extreme Value Analysis and Coastal Hydrodynamics Models. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 1347. <https://doi.org/10.3390/jmse9121347>

Lyard, F. H., Allain, D. J., Cancet, M., Carrère, L., and Picot, N. (2021): FES2014 global ocean tide atlas: design and performance, *Ocean Sci.*, 17, 615–649, <https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021>, 2021.

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

Mugica J., Louisor J., Maspataud A., ; Pedreros, R., Koechler, F. (2021) - Caractérisation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines en Haute- Corse. Rapport final. BRGM/RP-69915-FR, 248 p

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.

Paquier A-E., Mugica J., Maspataud A. (2021) - Estimation de l'évolution potentielle du trait de côte aux horizons 2040 & 2100 sur la Plaine orientale (Haute- Corse). Rapport Final. BRGM/RP-70722-FR, 211 p., 8 ann.

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. Édition 2017. 120 p.

Shom - Collectivité de Corse - Dreal Corse (2020) – Produit partie maritime Litto3D® - Corse 2017-2018. https://dx.doi.org/10.17183/L3D_MAR_CORSE_2017_2018".

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

Tunin-Ley A., et al. (2014) – Estimation des échanges entre la mer et la lagune de Biguglia. Rapport IFREMER

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 (produits dans le cadre de l'étude BRGM/RP-69915-FR) se déclinent ici de la façon suivante (Figure 78) :

- une grille MNT à la résolution de 1 m, sur le secteur de la Communauté d'Agglomération de Bastia (CAB) et la Communauté de Commune Marana-Golo (CCMG) ;
- une grille MNT à grande emprise à la résolution de 50 m, du nord du Cap Corse jusqu'à Alistro au sud (produite dans le cadre de l'étude BRGM/RP-69915-FR).

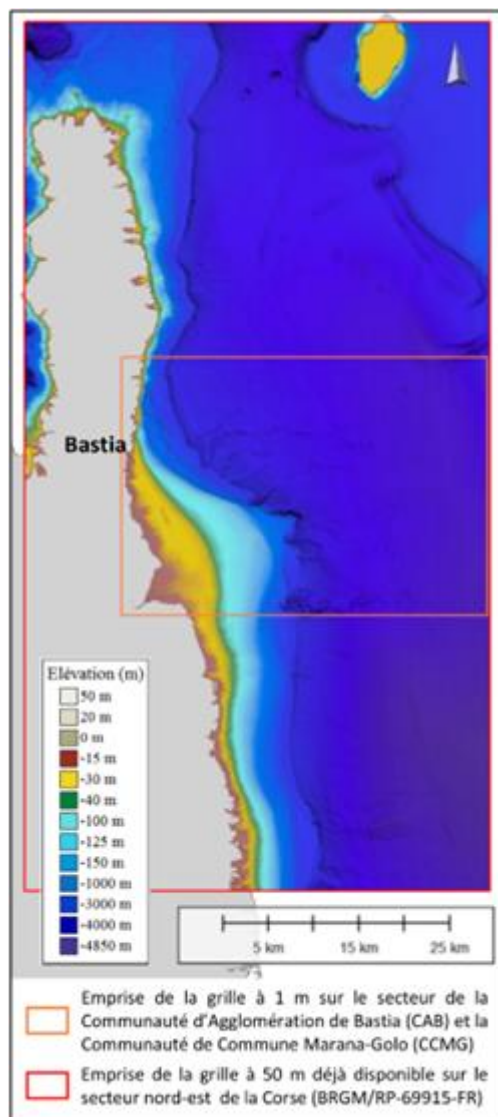


Figure 78 : Extension finale des grilles MNT produites sur le secteur la Communauté d’Agglomération de Bastia (CAB) et la Communauté de Commune Marana-Golo (CCMG).

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 différences sources de données disponibles sur le secteur étendu de la Communauté d’Agglomération de Bastia (CAB) et la Communauté de Commune Marana-Golo (CCMG) est représentée dans la Figure 79.

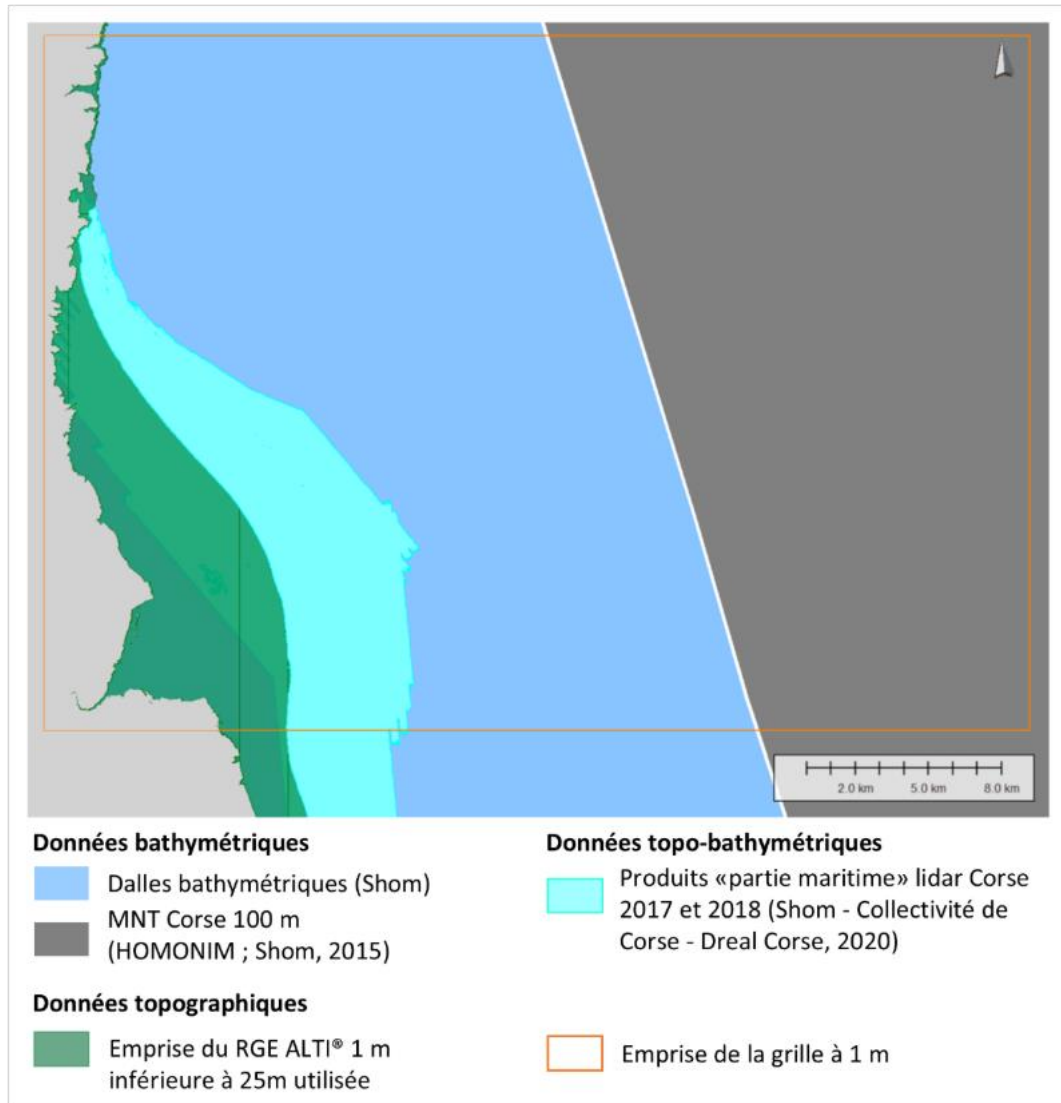


Figure 79 : Localisation des sources de données topo-bathymétriques exploitées sur l'emprise de la grille MNT à 1 m.

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 (Ell) à l'aide du modèle surfacique Bathylli V1.1 (projet Shom («Bathymétrie rapportée à l'ellipsoïde» ; ZH/Elli 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 (Figure 79).

- [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 (Figure 79). 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®.
- 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.

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 80), 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.

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.

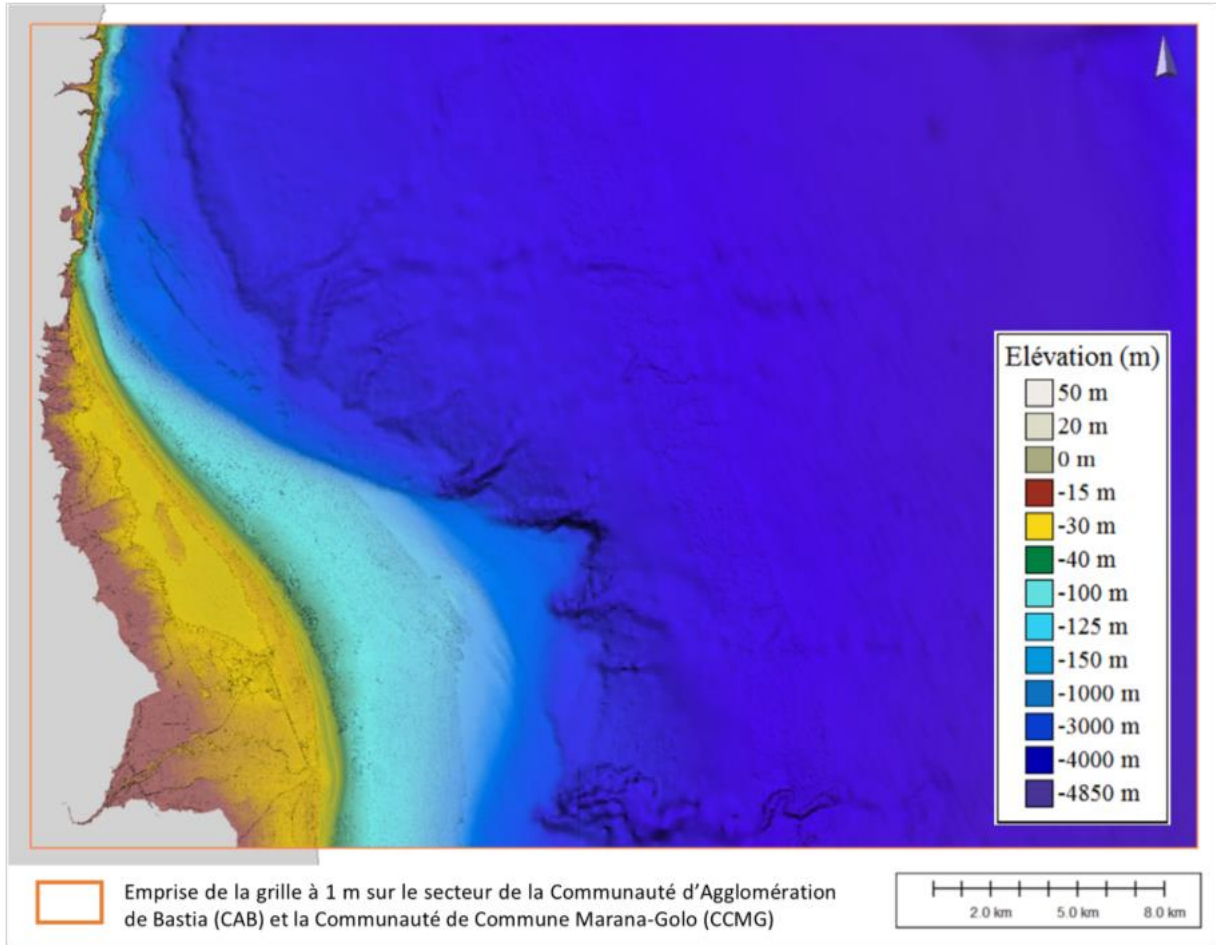


Figure 80 : MNT topo-bathymétriques à 1 m de résolution sur le secteur de la Communauté d'Agglomération de Bastia (CAB) et la Communauté de Commune Marana-Golo (CCMG).

Annexe 2 Probabilités conjointes de Hs, SWL et U au couple NWW3 593 / CORSE 53a

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).

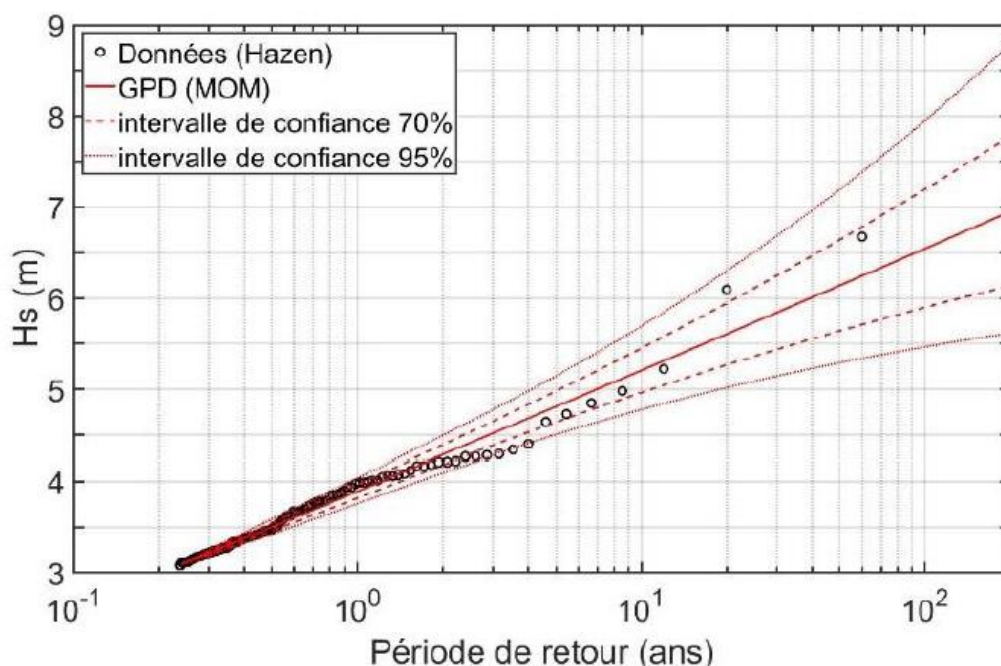


Figure A. 1 Distribution marginale pour la hauteur significative des vagues (Hs) au point d'extraction NWW3 593. Valeur centennale = 6.544m ; Loi appliquée : MOM ; Seuil $u = 3.08m$. La valeur centennale de Hs_{100} et l'intervalle de confiance à 95% sont également reportés.

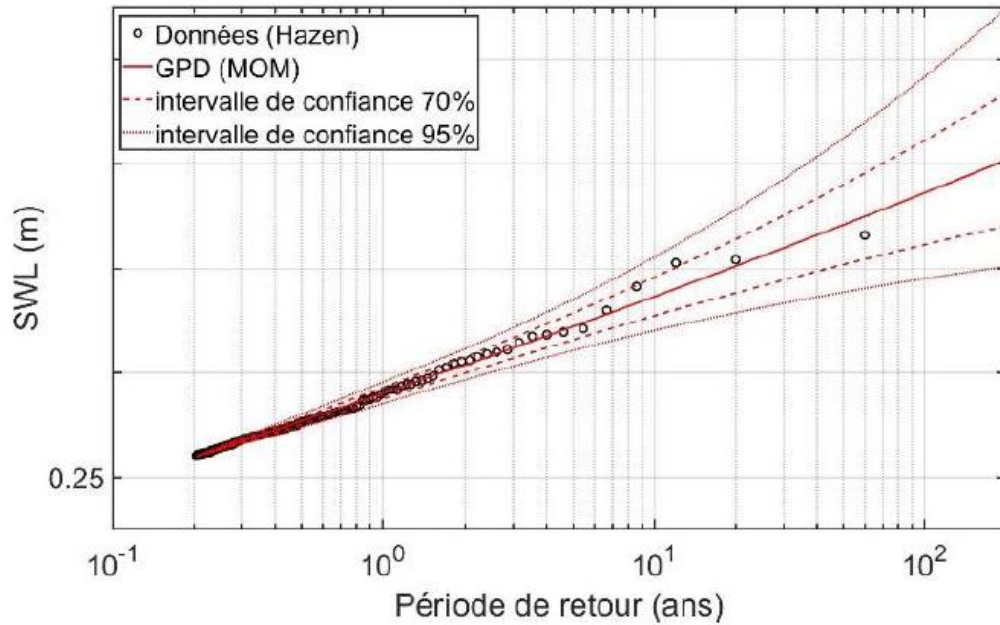


Figure A. 2 : Distribution marginale pour le niveau d'eau (SWL) – point d'extraction CORSE 93. Valeur centennale = 0.27m ; Loi appliquée : MOM ; Seuil $u = 0.52m$.

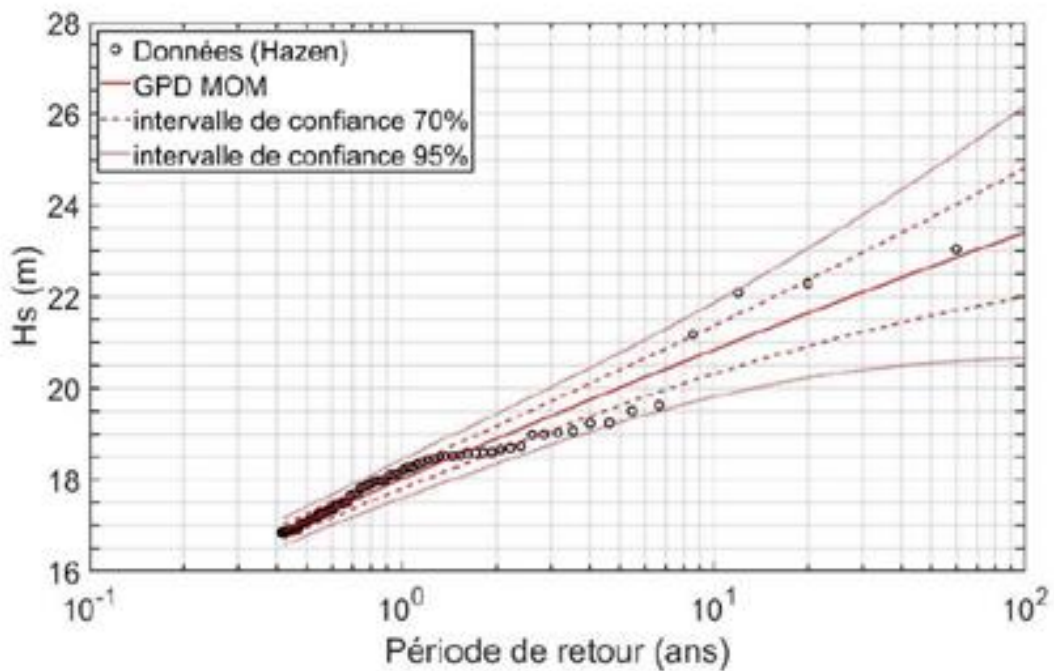


Figure A. 3 : Distribution marginale pour les vitesses de vents (U) au point d'extraction NWW3 593. Valeur centennale = 23.38 m/s ; Loi appliquée : MOM ; Seuil $u = 16.84$ m/s.

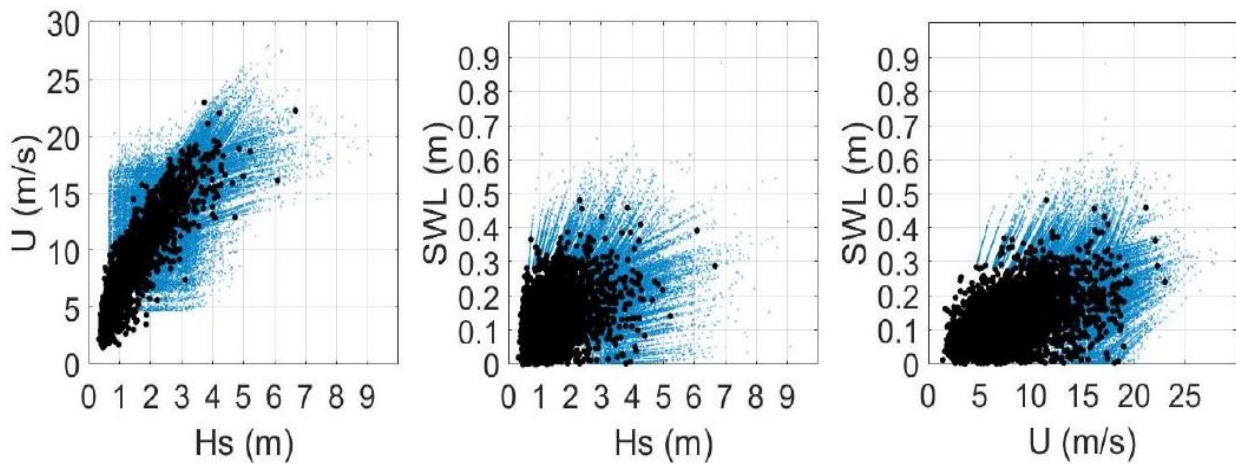


Figure A. 4 : Combinaisons (H_s ; SWL ; U) observées (points noirs) et simulés (points bleus) par méthode Monte-Carlo à l'aide des lois marginales et des lois de dépendances.

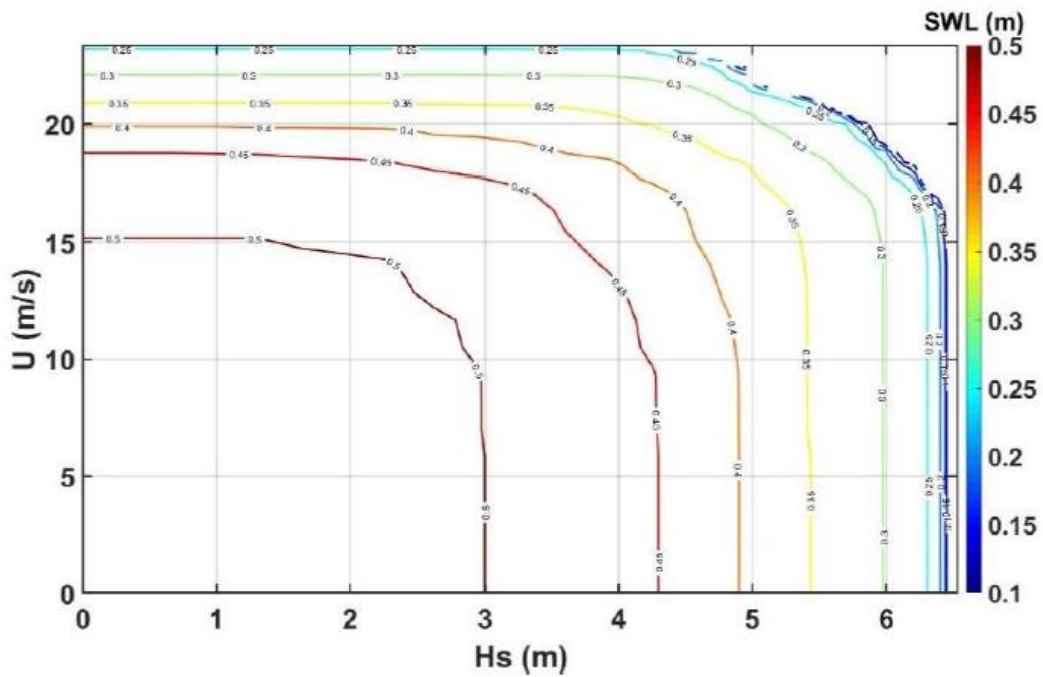


Figure A. 5 : Représentation 2D de l'iso-contour d'iso-période de retour de dépassement conjoint centennale. Les valeurs sur les courbes sont les valeurs de niveau marin SWL m/NM.

Annexe 3 Evolution historique de l'estuaire du Golo et du Grau de Biguglia

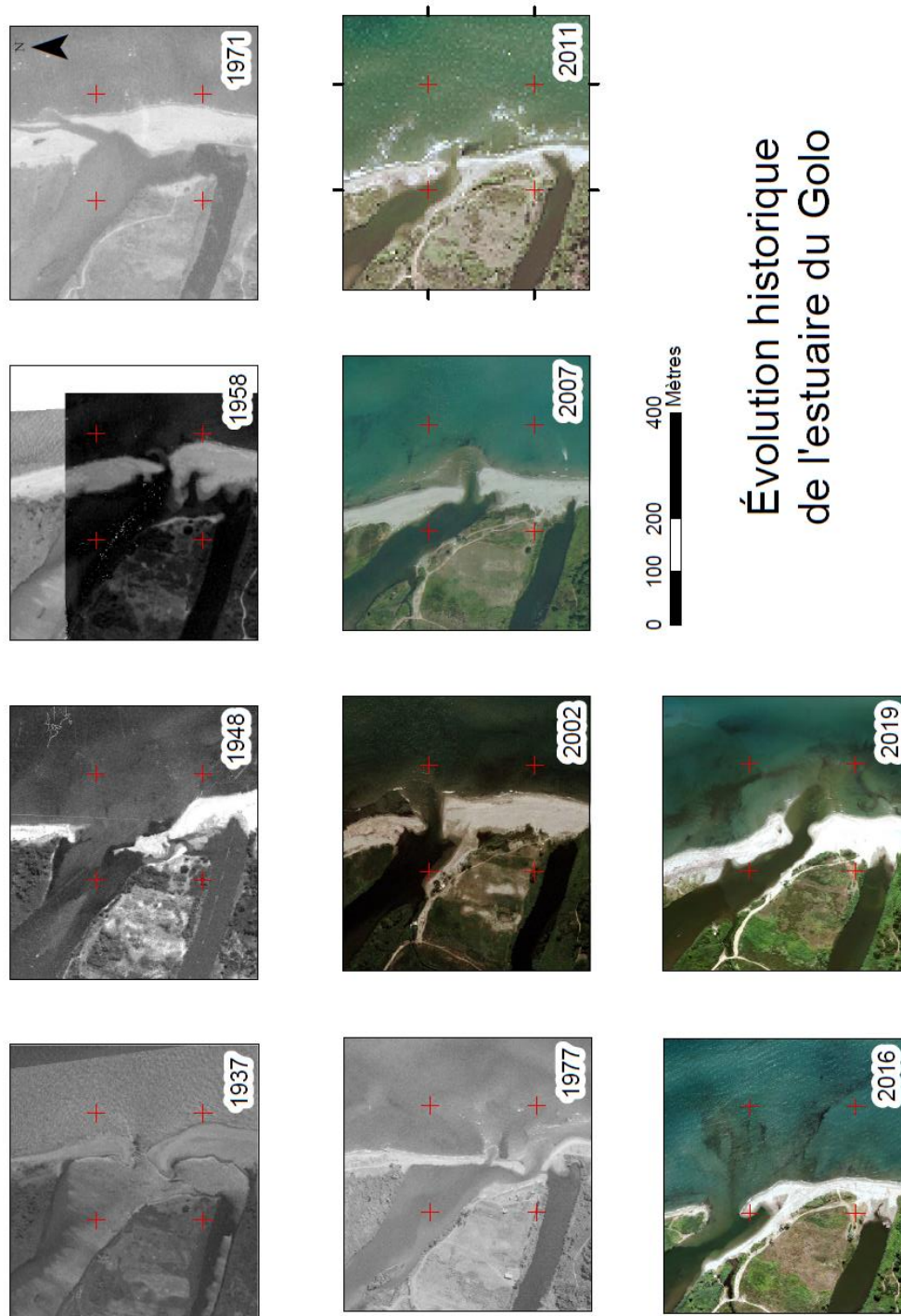


Figure A. 6 : Evolution historique de l'estuaire du Golo entre 1937 et 2019. Source des orthophotographies : IGN.

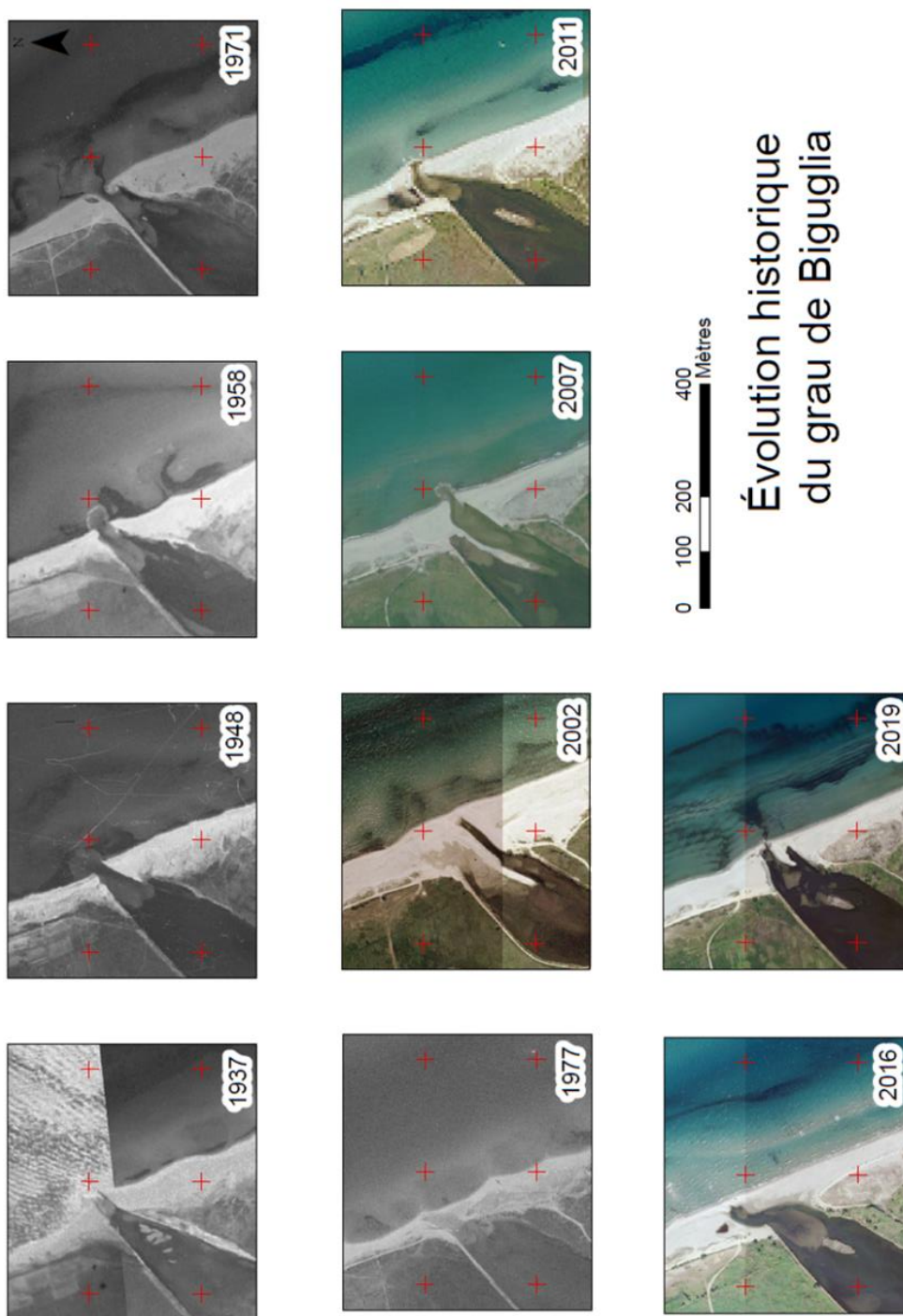


Figure A. 7 : Evolution historique du Grau de Biguglia entre 1937 et 2019. Source des orthophotographies : IGN.

Annexe 4 Exemple de résultats des simulations

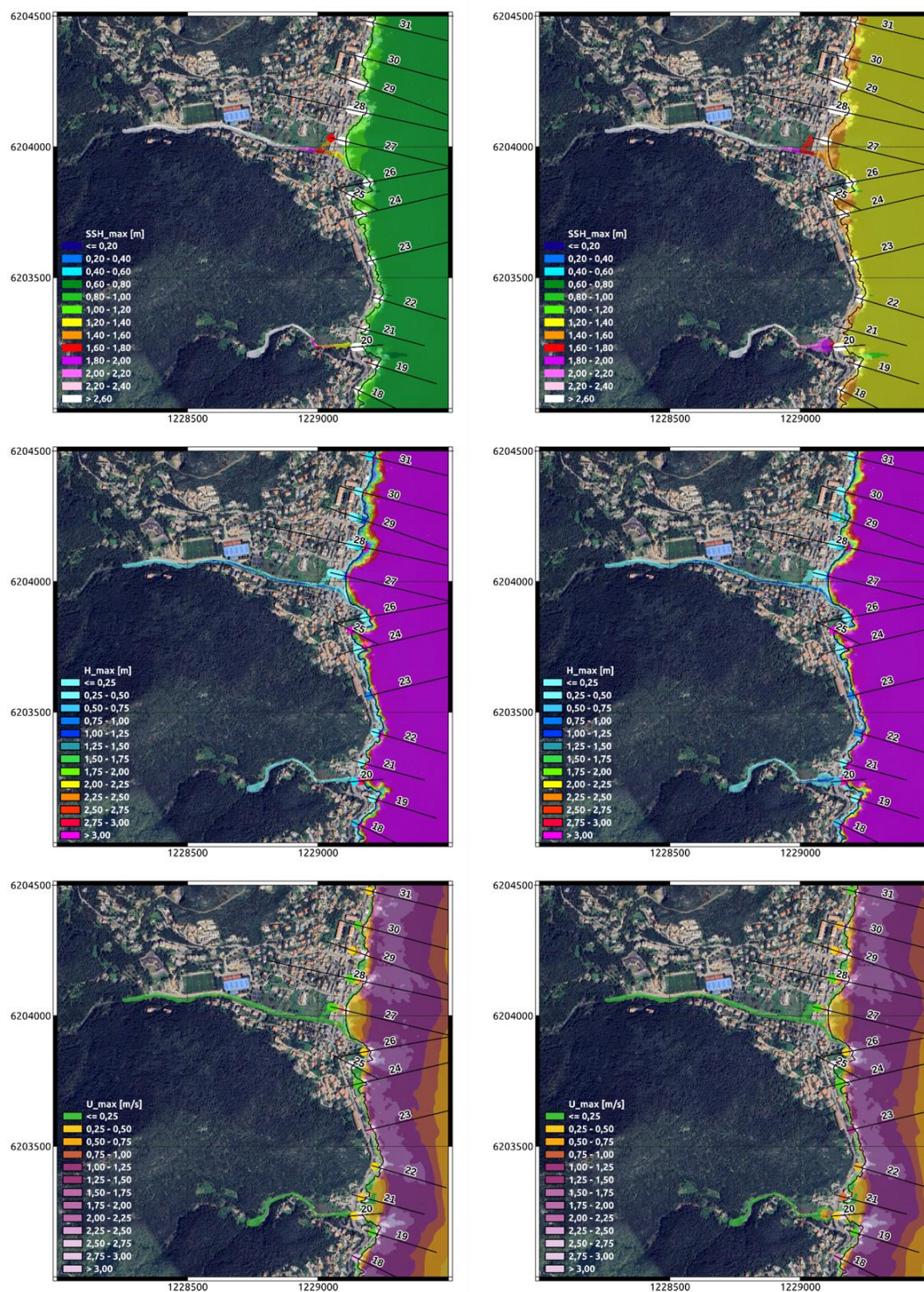


Figure A. 8 : Zoom sur le secteur de Miomo (Santa-Maria-di-Lota) et de Grigione (San-Martino-di-Lota), pour l'évènement « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Elévation du plan d'eau (SSH, en haut, Hauteur d'eau (H max, au milieu) et Vitesse d'écoulement (U max, en bas).

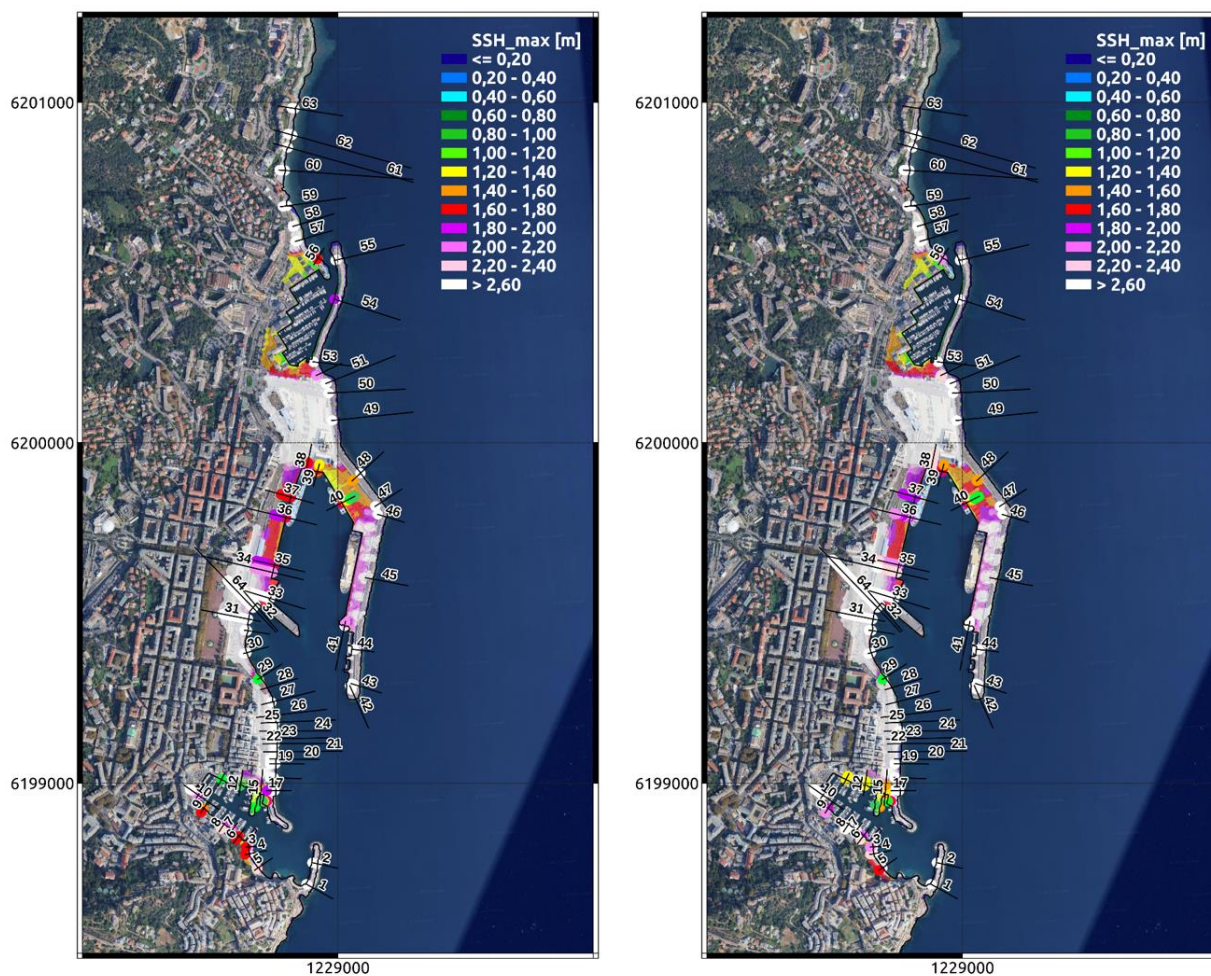


Figure A. 9 Carte d'élévation maximale de la surface libre (SSH_max) sur le front de mer de Bastia pour le scénario 14, pour les événements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite).

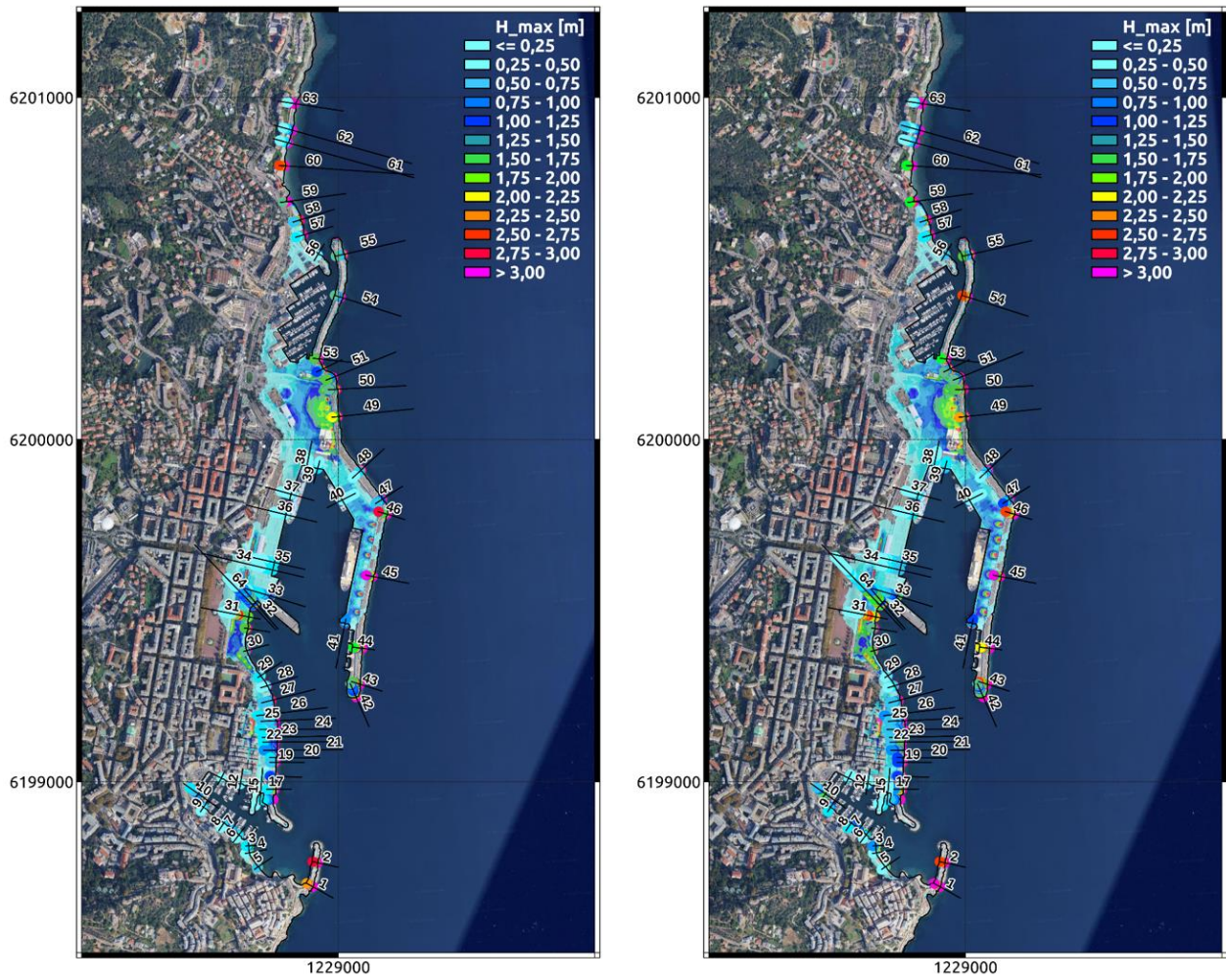


Figure A. 10 Carte de la hauteur d'eau maximale (H_{max}) sur le front de mer de Bastia pour le scenario 14, pour les évènements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite).

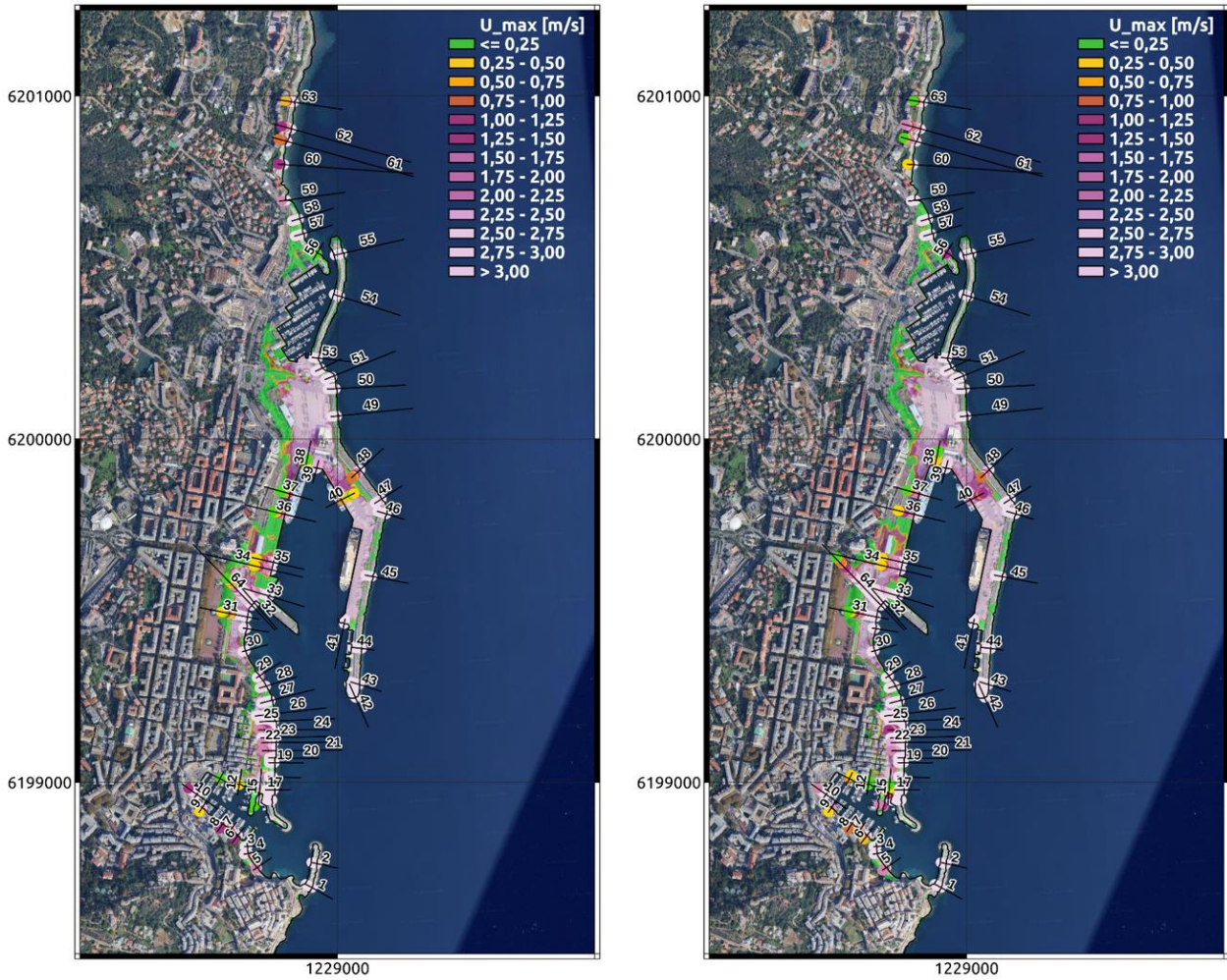


Figure A. 11 : Carte des courants maximaux (U_{max}) sur le front de mer de Bastia pour le scenario 14, pour les évènements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite).

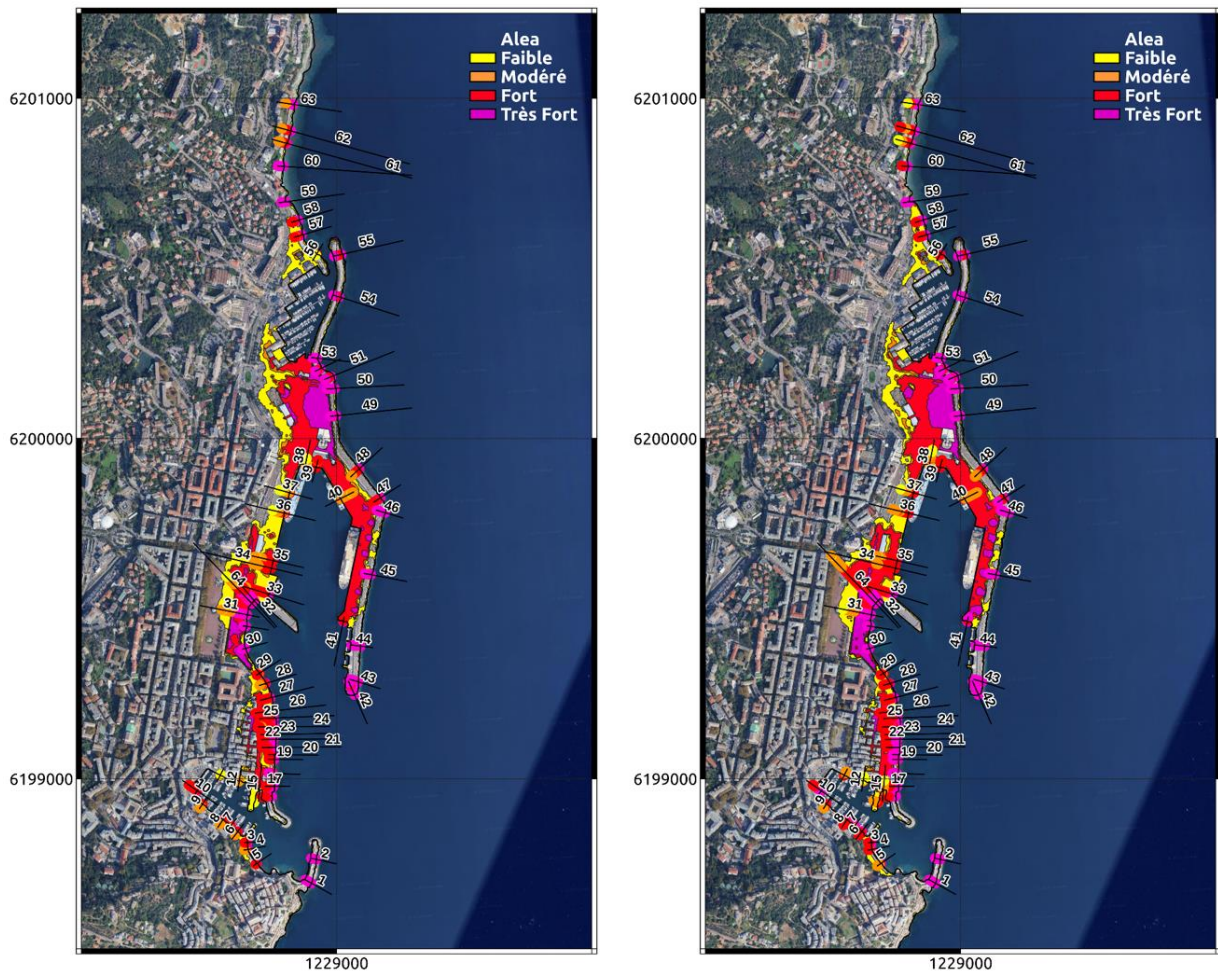


Figure A. 12 : Carte d'alea sur le front de mer de Bastia pour le scenario 14, pour les évènements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite). Zoom sur le Vieux Port en bas de figure.

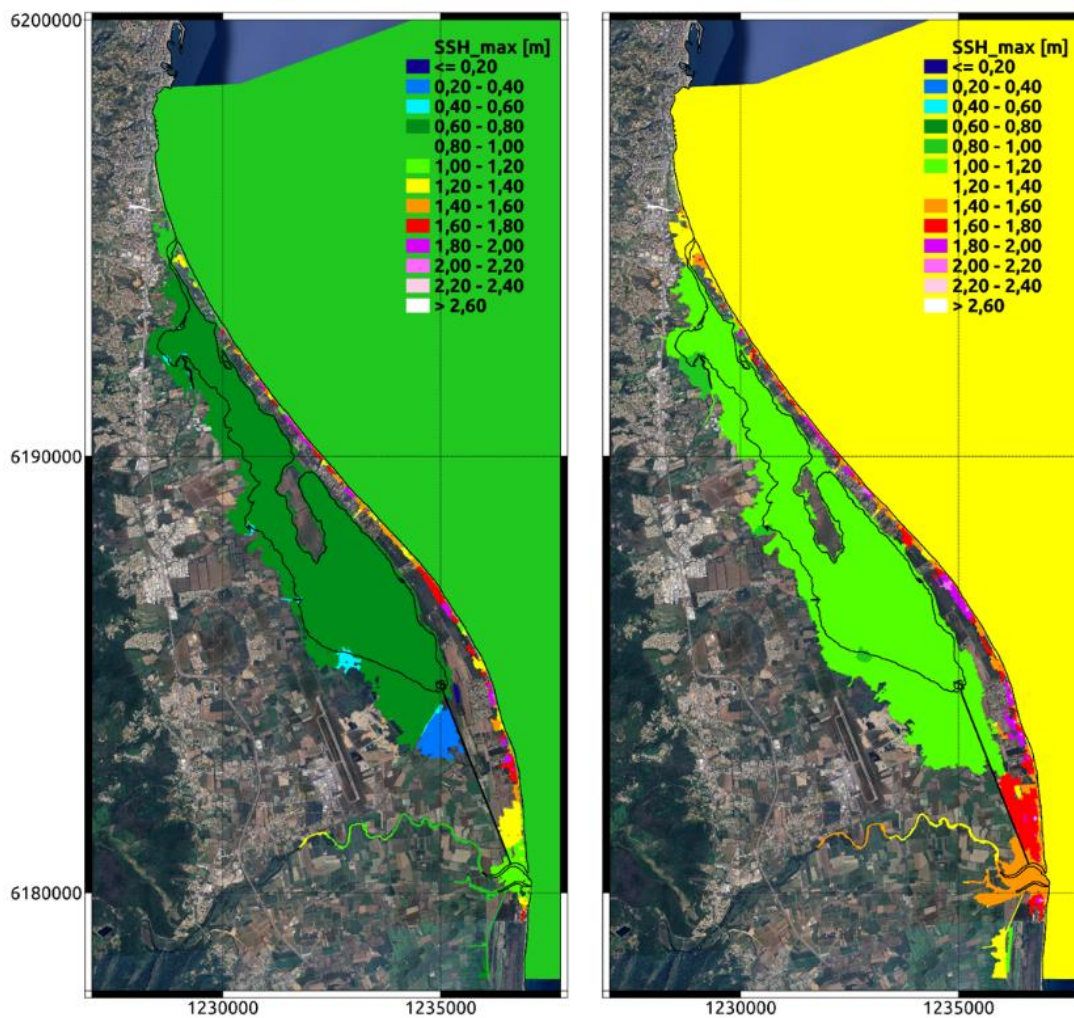


Figure A. 13 : Carte d'élévation maximale de la surface libre (SSH_max) sur le secteur de Bastia sud pour le scénario 14, pour les événements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite).

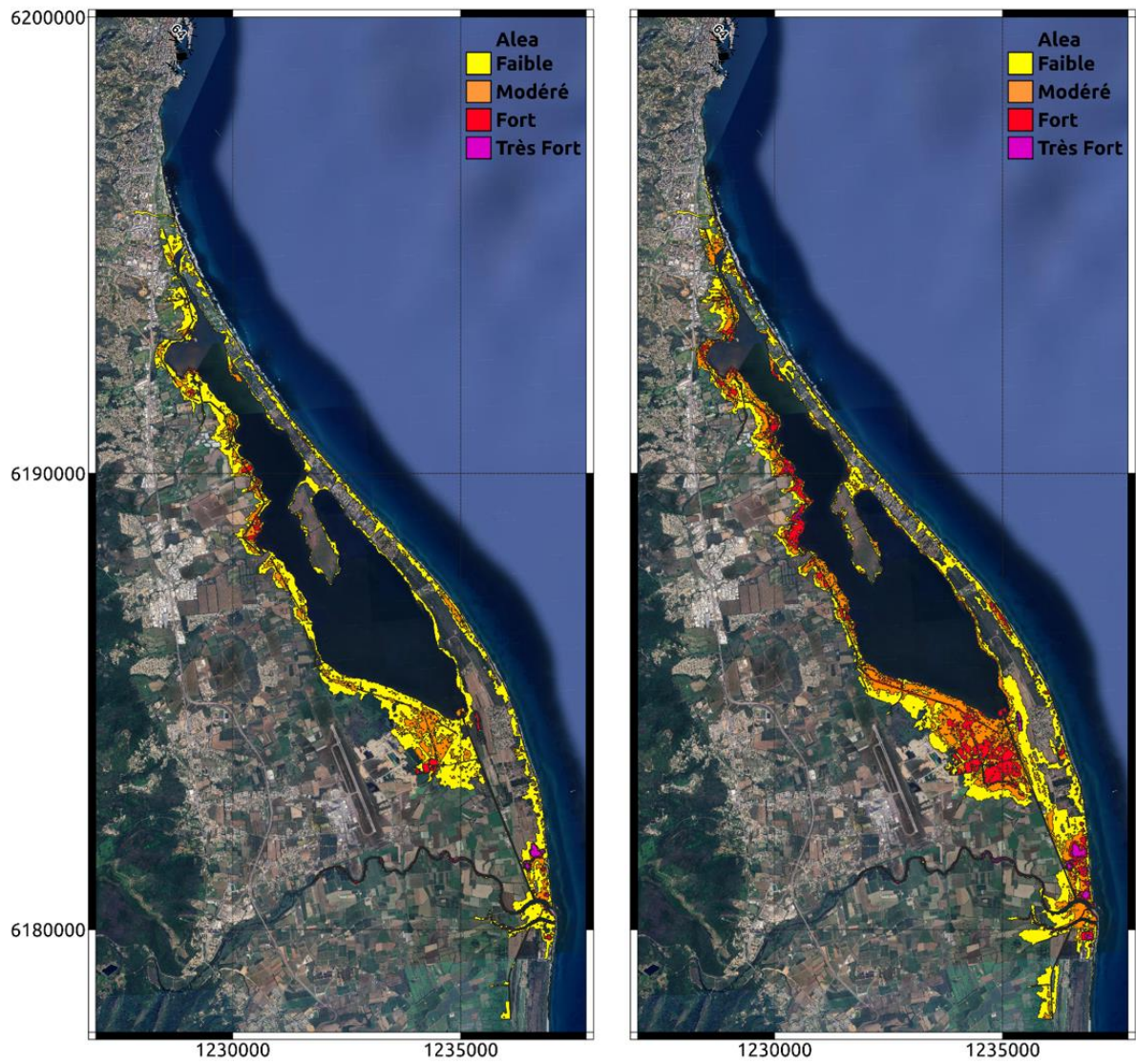


Figure A. 14 : Carte d'aléa sur le secteur de Bastia sud pour le scénario 14, dans la condition de climat actuel (gauche) et celle à horizon 2100 (droite).

Caractérisation de la dynamique de la submersion sur les secteurs de la CAB et de la CCMG

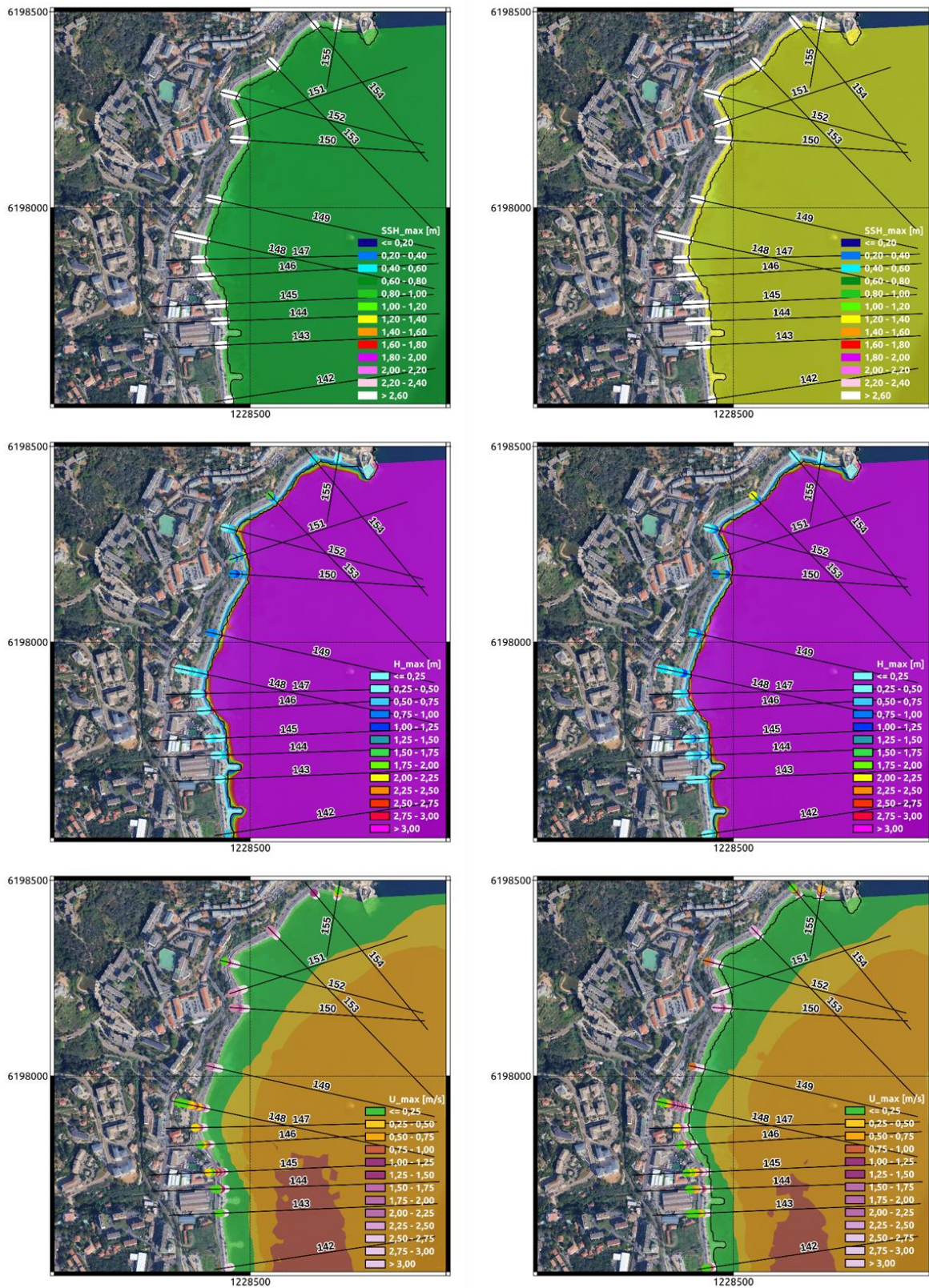


Figure A. 15 : Focus sur la Rte de Front de Mer et la station des pompiers, pour les évènements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Elévation du plan d'eau (SSH, en haut, Hauteur d'eau (H max, au milieu) et Vitesse d'écoulement (U max, en bas).

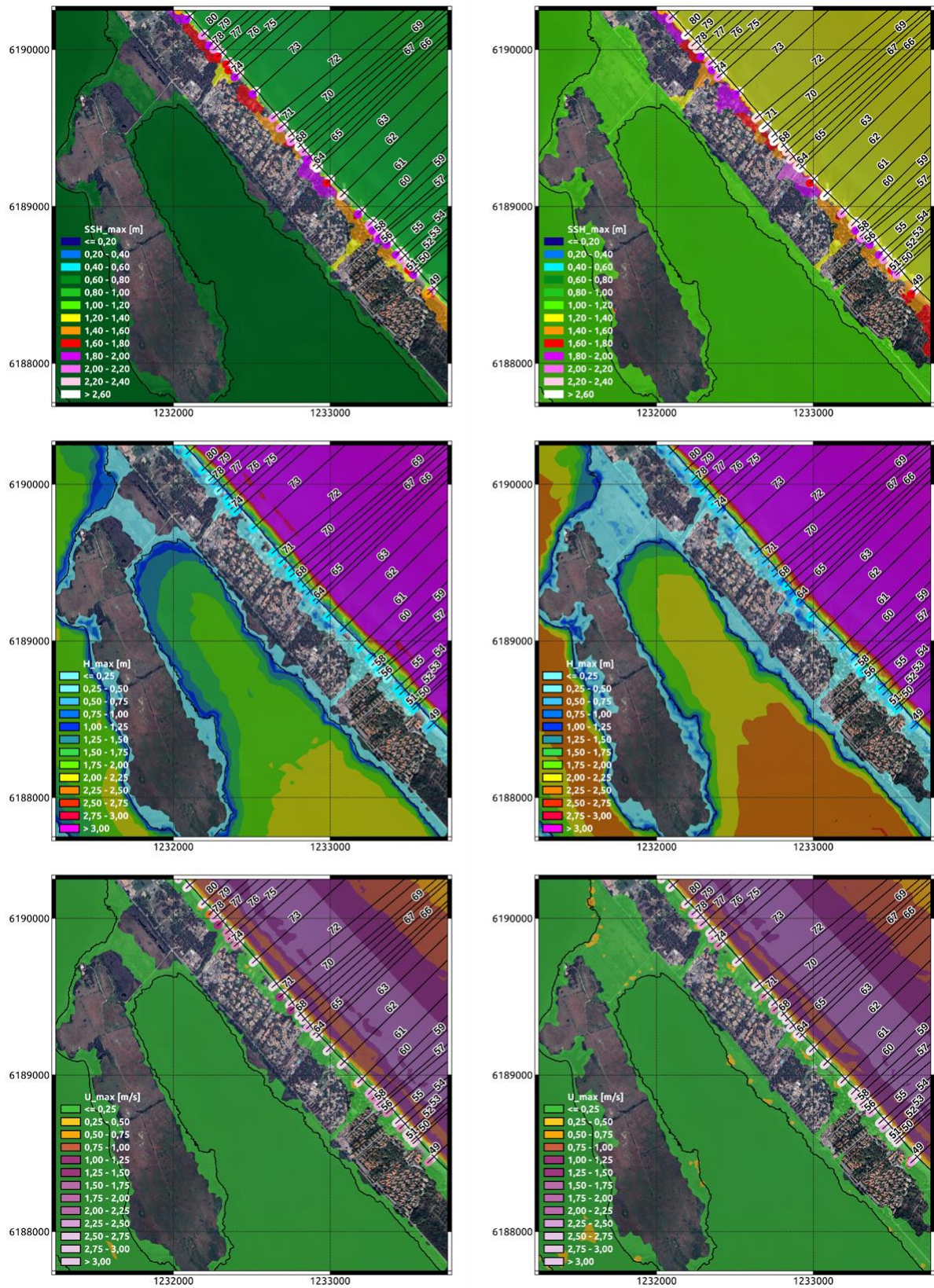


Figure A. 16 : Zoom sur le secteur de Pineto (Biguglia) pour les événements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Elévation du plan d'eau (SSH, en haut, Hauteur d'eau (H max, au milieu) et Vitesse d'écoulement (U max, en bas).

Caractérisation de la dynamique de la submersion sur les secteurs de la CAB et de la CCMG

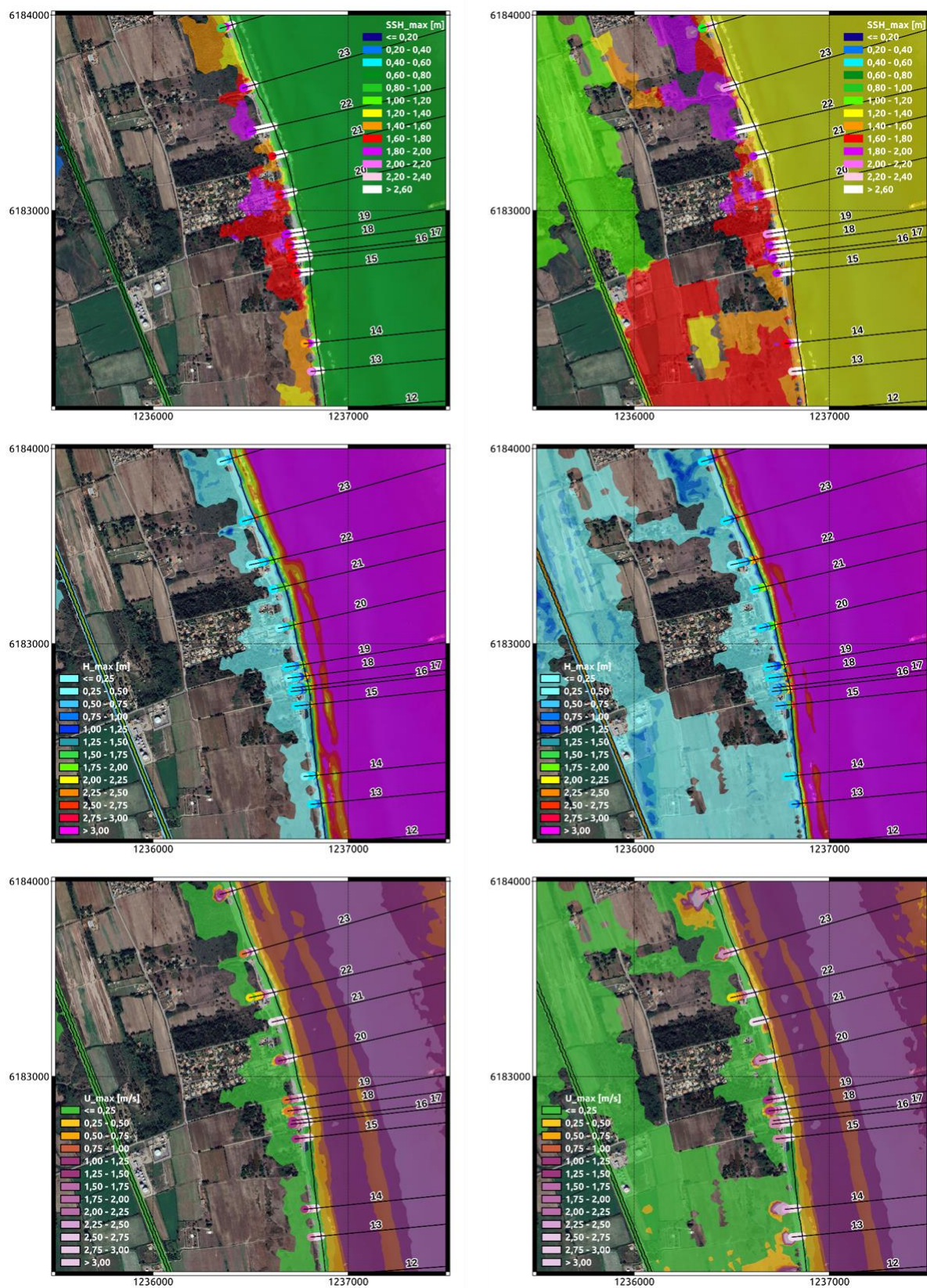


Figure A. 17 : Zoom sur le secteur de la plage de Lucciana, pour les évènements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite).

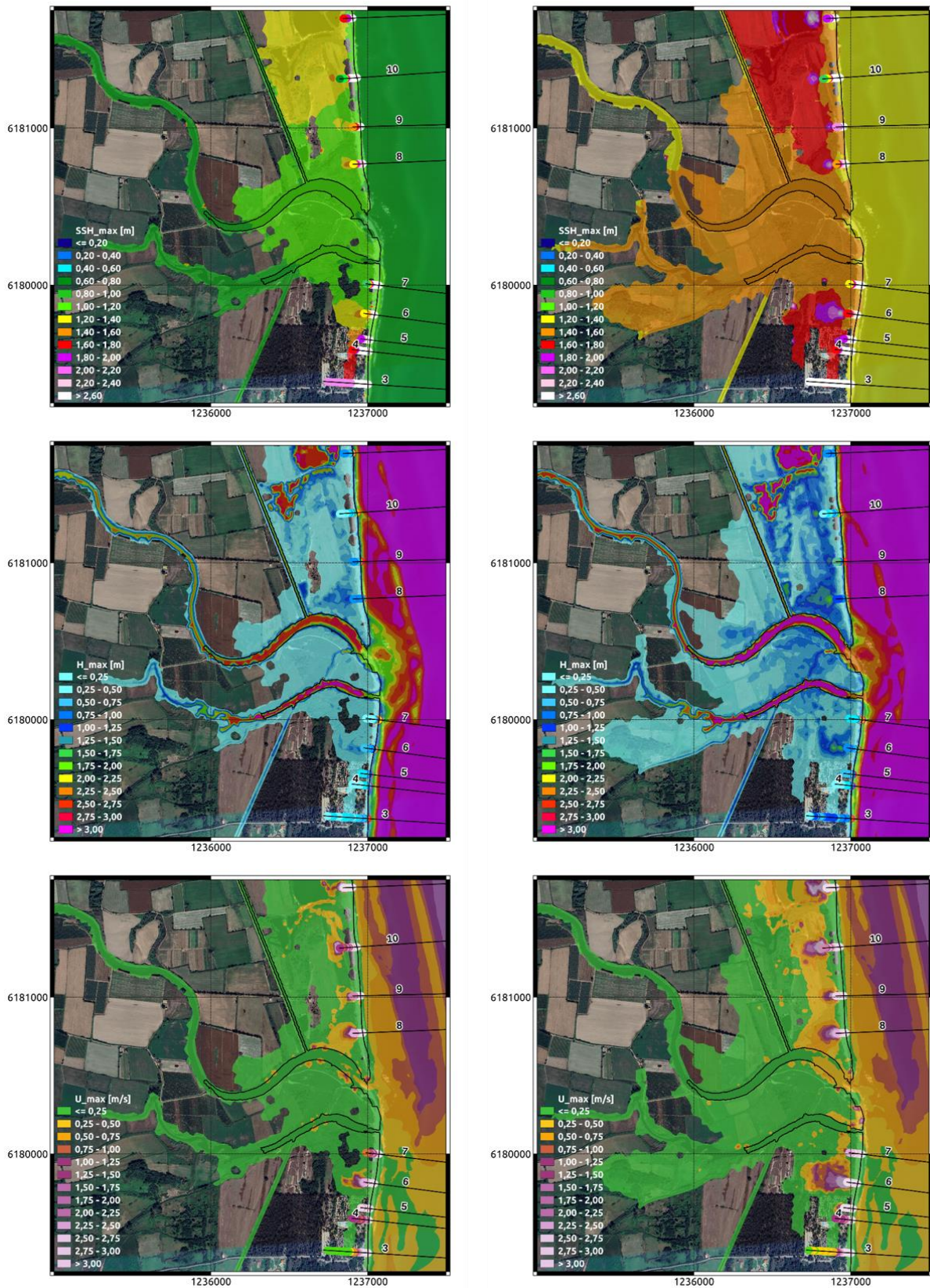


Figure A. 18 : Zoom sur le secteur de l'estuaire du Golo (Lucciana), pour les événements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite) : Elévation du plan d'eau (SSH, en haut, Hauteur d'eau (H max, au milieu) et Vitesse d'écoulement (U max, en bas).

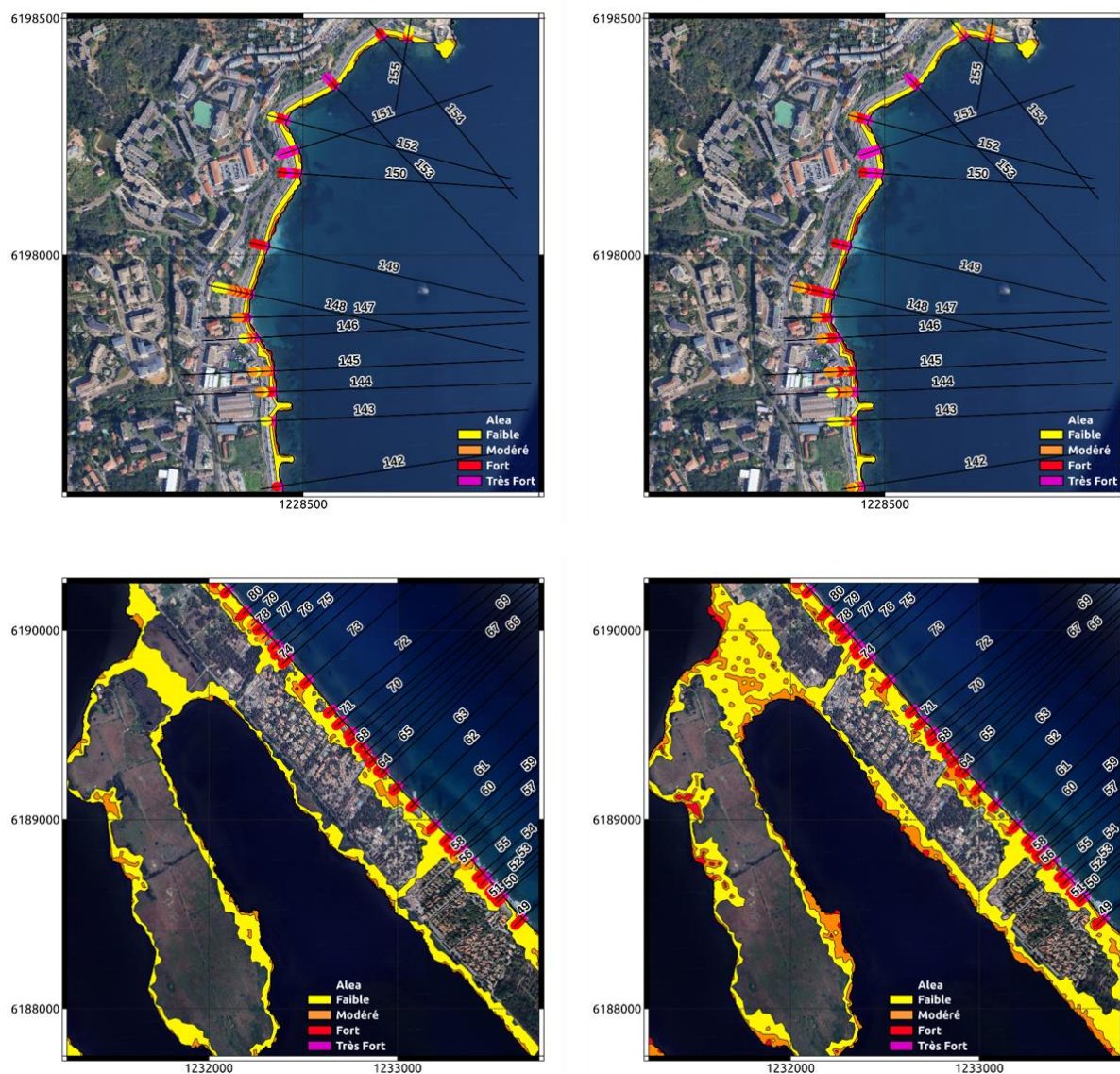


Figure A. 19 : Cartes d'aléa pour le scénario pour les événements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite). Zoom sur la route de Front de Mer (Bastia, haut) et de Pineto (Biguglia, bas).

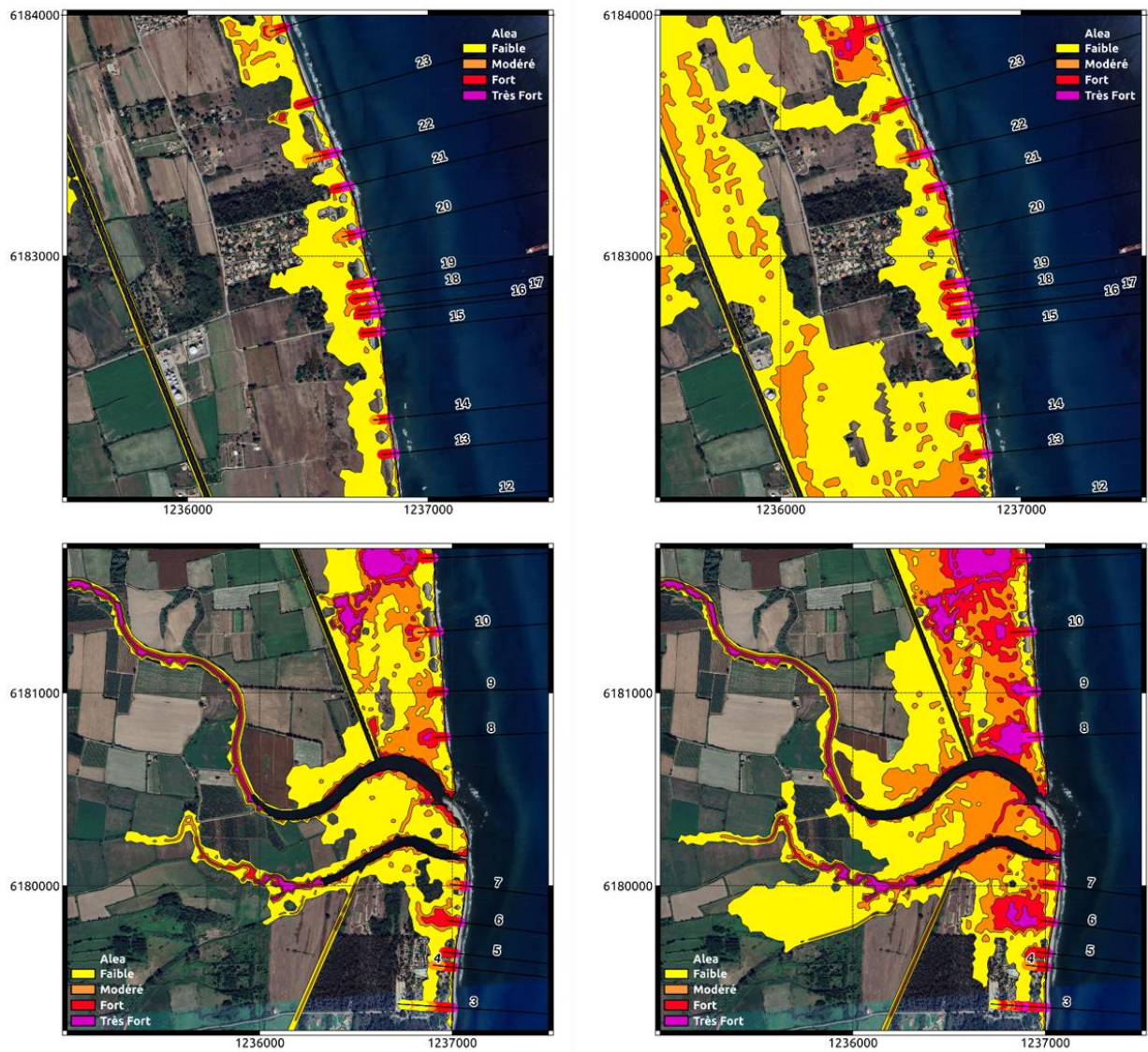


Figure A. 20 : Cartes d'aléa pour le scénario 14 pour les événements « actuel » (à gauche) et « 2100 » (à droite). Zoom sur la plage de Lucciana (haut) et de l'estuaire du Golo (bas).



**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 Corse
Immeuble Agostini
Zone industrielle de Furiani
20600 – Bastia – France
Tél. : 04 95 58 04 33

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm