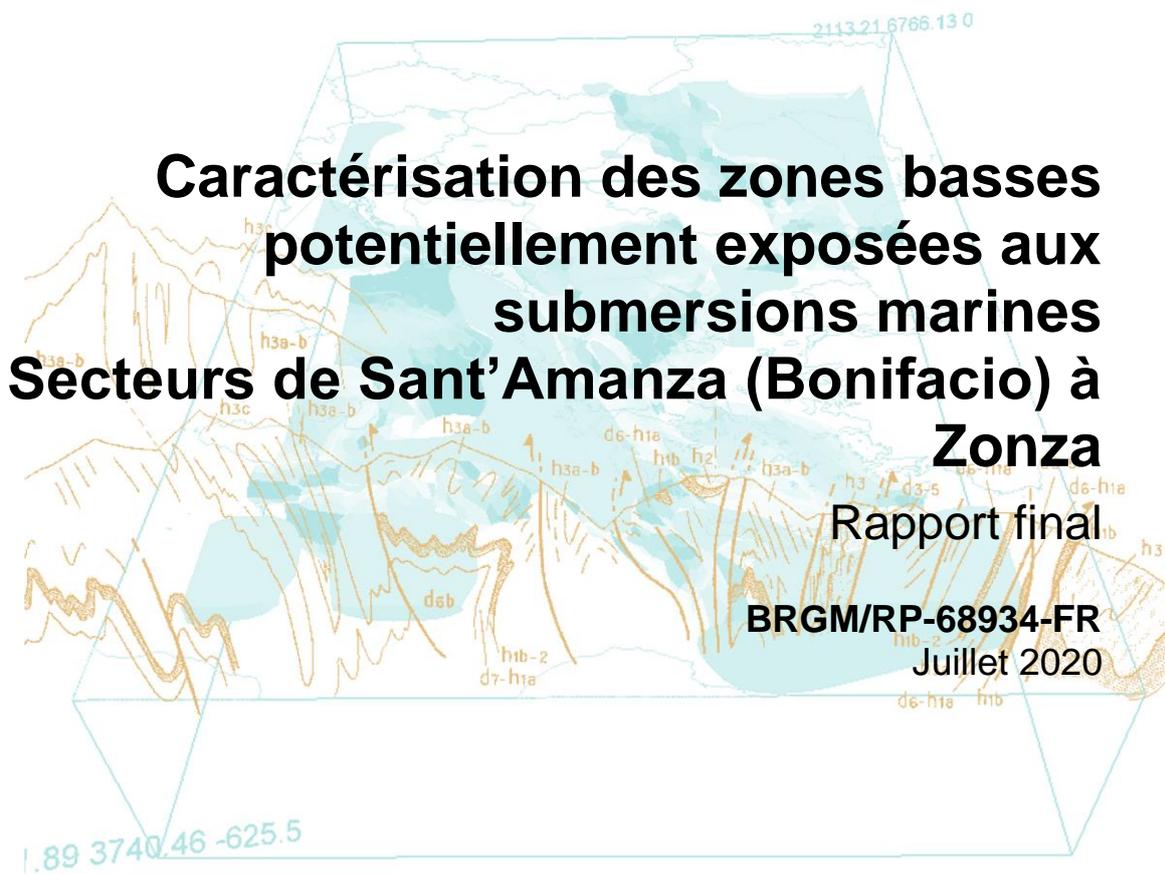


Document public



**Caractérisation des zones basses
potentiellement exposées aux
submersions marines
Secteurs de Sant’Amanza (Bonifacio) à
Zonza**

Rapport final

BRGM/RP-68934-FR
Juillet 2020



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Caractérisation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines Secteurs de Sant'Amanza (Bonifacio) à Zonza

Rapport final

BRGM/RP-68934-FR

Juillet 2020

J. Mugica., R. Pedreros, J. Louisor, J. Rohmer, A. Maspataud, T. Laigre, F. Koechler
Avec la collaboration de
Belon R., Nicolae Lerma A., Paris F.

Vérificateur :

Nom : C. OLIVEROS

Fonction : responsable d'unité
(DRP/R3C)

Date : 08/07/2019



Approbateur :

Nom : A. REY

Fonction : Directeur Régional BRGM
Corse

Date : 15/07/2020

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Submersion marine, Niveaux marins extrêmes, Zones basses, Modélisation numérique, Analyses statistiques, Cartographie

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

Mugica J., Pedreros R., Louisor J., Rohmer J., Maspataud A., Laigre T., Koechler F. avec la collaboration de Nicolae Lerma A., Paris F. (2020) – Caractérisation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines – Secteurs de Sant’Amanza (Bonifacio) à Zonza. Rapport final. BRGM/RP-68934-FR, 126 p., 83 fig., 3 tabl., 3 ann., 1 usb.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l’autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La première évaluation des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines (ZBPESM) réalisée en 2014 au 1/10 000 par la DREAL de Corse et la DDTM de Corse du Sud s’avérant insuffisante et trop schématique, le BRGM a élaboré et mis en œuvre à la demande de l’État une méthode spécifique permettant de prendre en compte les spécificités géomorphologiques et météo-marines locales de la Corse.

Ce premier rapport présente les données, la méthode, les résultats ainsi que les cartes au 1/10 000 pour les secteurs du Golfe de Sant’Amanza (commune de Bonifacio) à Zonza. Il est produit dans le cadre d’une convention de recherche et développement partagés entre le BRGM et la DDTM de Corse du Sud signée le 29 mars 2016¹. Les autres secteurs de Corse sont en cours de traitement dans le cadre de 2 autres conventions de recherche et développement partagés entre le BRGM et la DDTM de Corse-du-Sud pour les secteurs restants de Corse-du-Sud et la DREAL pour le littoral de la Haute-Corse. Ils feront l’objet de 2 rapports séparés supplémentaires.

Afin de prendre en compte de manière plus complète les interactions entre les différents agents météo marins (vagues, vent, marée, surcote atmosphérique) la méthode consiste à :

- déterminer à partir d’analyses statistiques dites de « probabilités conjointes trivariées » des **événements centennaux au large** combinant les conditions de niveaux d’eau (marée et surcote), vagues et vents spécifiques à chaque portion de littoral ;
- calculer à partir de modélisations numériques (SWAN et SWASH-2DH) les **niveaux marins résultants au rivage** afin de prendre en compte les effets notamment liés à la géomorphologie locale ;
- **cartographier les ZBPESM** par une approche dite « statique » en projetant les niveaux marins extrêmes obtenus pour chaque site sur la base de données topographiques précises (LIDAR de l’IGN 2013). Cette approche permet de réactualiser l’AZS (2014).

Une **phase préliminaire conséquente a consisté à préparer les données météo-marines et topo-bathymétriques**. Des simulations rétrospectives ont été spécifiquement générées pour cette étude afin de compléter le peu de données de niveaux d’eau (seulement 2 marégraphes : Ajaccio et Solenzara). Plusieurs sources de données de vagues (mesures et simulations rétrospectives) ont été comparées afin d’utiliser celles présentant les meilleures qualités pour des analyses statistiques d’extrêmes (données NWW3-MED retenues, 1975 - 2010). Enfin, l’ensemble des données topo-bathymétriques disponibles ont été compilées et traitées afin de constituer des Modèles Numériques de Terrain sur la zone d’étude (résolution 10 m) et les grilles des modèles numériques.

L’approche « statique » est complétée par une **identification des secteurs pour lesquels les franchissements de paquets de mer sont susceptibles de générer des submersions marines ou d’y contribuer significativement**. L’exploitation du modèle numérique SWASH en mode « profil » a permis d’identifier les fronts de mer et cordons dunaires dont l’altitude suffisamment élevée ne permet pas une submersion par débordement mais que le jet de rive est susceptible de franchir (niveau maximal atteint par la mer après le déferlement des vagues).

La cartographie finale représente l’**emprise des ZBPESM pour deux événements météo-marins centennaux : « actuel » et « 2100 »**. Ce dernier intègre une marge d’élévation du

¹ projet interne BRGM référencé : AP16CSC008

niveau de la mer (40 cm par rapport à « l’actuel », soit 60 cm au total) liée à l’impact du changement climatique conformément aux recommandations du ministère (Guide méthodologique PPRL du MEDDE de mai 2014). La cartographie des ZBPESM intègre également la distinction entre des **zones exposées à des hauteurs d’eau inférieures et celles supérieures à 50 cm pour l’évènement « actuel »**. Les secteurs pour lesquels les franchissements de paquets de mer sont susceptibles de générer une submersion marine sont localisés sur la carte par une bande de sécurité forfaitaire de 50 m de large prise en compte à partir du trait de côte.

☞ Les **chocs mécaniques et projections liés aux vagues** initialement non prévus dans le cadre de cette étude ont été intégrés à la demande de la DDTM de Corse-du-Sud qui a souhaité une représentation cartographique du phénomène par une bande de sécurité forfaitaire de 25 m conformément aux recommandations ministérielles (guide PPRL du MEDDE de mai 2014). Cette bande est appliquée à partir du trait de côte tel que rappelé dans cette présente étude. L’identification des secteurs qui y sont potentiellement exposés n’est pas exhaustive. Il s’agit de l’ensemble du linéaire concerné par les phénomènes de submersion marine (ZBPESM et franchissement de paquets de mer) ainsi que des secteurs complémentaires identifiés par la DDTM de Corse-du-Sud sur la base de sa connaissance historique.

☞ Les **défaillances de structures de protection côtières**, la concomitance de submersions marines avec des crues fluviales et l’occupation du sol ne sont pas traitées dans cette présente étude.

☞ Cette méthode s’appuie sur les **recommandations du ministère issues du guide pour l’élaboration des Plans de prévention des risques littoraux (guide PPRL du MEDDE de mai 2014)**. Elle permettra d’améliorer la connaissance des phénomènes de submersion marine et d’affiner le diagnostic préliminaire des zones potentiellement submersibles en cas d’évènements extrêmes. Toutefois, elle ne permettra pas de caractériser l’aléa submersion marine qui requiert l’identification de 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 d’en déterminer les caractéristiques (durée de l’évènement, vitesses des écoulements, hauteurs d’eau maximales, etc.).

Sommaire

1. Objectifs et cadre de l’étude	13
1.1. CONTEXTE	13
1.2. RAPPELS THÉORIQUES SUR LES PHÉNOMÈNES DE SUBMERSION MARINE..	14
1.2.1. Processus physiques	14
1.2.2. Types de submersion marine	15
2. Fonctionnement du littoral et principe de la méthode	17
2.1. CADRE GÉOGRAPHIQUE	17
2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET MORPHOSÉDIMENTAIRE.....	18
2.3. CONTEXTE MÉTÉOROLOGIQUE	19
2.3.1. Régime climatique global	19
2.3.2. Caractéristiques générales des tempêtes	20
2.4. CONTEXTE OCÉANOGRAPHIQUE.....	21
2.5. CONNAISSANCES HISTORIQUES.....	22
2.5.1. Tempête du 6 au 10 novembre 1982	24
2.5.2. Tempête du 27 au 28 novembre 2008	25
2.5.3. Tempête du 29 octobre 2018	26
2.6. CONCLUSION SUR LES PHÉNOMÈNES NATURELS ET PRINCIPE DE LA MÉTHODE.....	27
3. Données météo-marines	29
3.1. OBSERVATIONS IN-SITU	29
3.2. DONNÉES ISSUES DE MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES	31
4. Données topographiques et bathymétriques – construction des Modèles Numériques de Terrain (MNT).....	37
4.1. STRATÉGIE ET PROCESSUS GÉNÉRAL DE PRODUCTION DES MNT	37
4.1.1. Principes généraux	37
4.1.2. Caractéristiques et contraintes techniques.....	37
4.1.3. Emprises et résolution des grilles.....	38
4.2. DONNÉES EXPLOITÉES	39
4.2.1. Bathymétrie.....	39
4.2.2. Topographie.....	40
4.2.3. Diagramme des sources	41
4.3. TRAITEMENTS EFFECTUÉS.....	42

4.3.1. Système géodésique	42
4.3.2. Gestion des références verticales, conversions altimétriques	42
4.3.3. Outils de travail	43
4.3.4. Traitement des données IGN	43
4.3.5. Traitement des données bathymétriques	44
4.3.6. Interpolation	44
4.4. CARACTÉRISTIQUES DES MODÈLES NUMÉRIQUES DE TERRAIN	45
5. Evènements de référence météo-marins « actuel » et « 2100 » au large.....	49
5.1. PRINCIPES DE LA MÉTHODOLOGIE DES PROBABILITÉS CONJOINTES	49
5.2. PRÉPARATION DU JEU DE DONNÉES DE VAGUES, NIVEAUX D’EAU ET VENT 50	
5.2.1. Niveaux d’eau <i>SWL</i>	51
5.2.2. Caractéristiques des vagues	51
5.2.3. Caractéristiques des vents	52
5.2.4. Sélection des combinaisons pour l’analyse	53
5.3. AJUSTEMENT DES DISTRIBUTIONS DE PROBABILITÉS MARGINALES (GPD) POUR HS, SWL ET U	53
5.3.1. Niveaux d’eau	54
5.3.2. Hauteur significative de vagues	54
5.3.3. Vitesse des vents	55
5.4. ANALYSE TRI-VARIÉE DES EXTRÊMES	55
5.5. ANALYSE DES CO-VARIABLES	57
5.5.1. Période T_p	57
5.5.2. Directions	58
5.6. SYNTHÈSE DES ÉVÉNEMENTS DE RÉFÉRENCE	59
5.6.1. Combinaisons centennales vagues, niveaux d’eau et vent retenues.....	59
5.6.2. Evènements de référence « actuel » et « 2100 »	60
6. Calcul des niveaux marins au rivage	61
6.1. PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE MODÉLISATION NUMÉRIQUE	61
6.1.1. Rappels théoriques et stratégie de modélisation	61
6.1.2. SWAN	62
6.1.3. SWASH-2D	63
6.2. PRINCIPAUX RÉSULTATS	63
6.2.1. Effet des vagues	63
6.2.2. Effet du vent	67
6.2.3. Niveaux marins au rivage (N_{tot})	68
7. Cartographie des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines.....	71

7.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA MÉTHODE.....	71
7.2. IDENTIFICATION DE SECTEURS HOMOGENES ET NIVEAUX MARINS	72
7.3. MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE.....	74
7.3.1. Identification de la limite côté mer de la submersion	74
7.3.2. Création des polygones des zones basses	76
7.3.3. Modalité de traitement des petites zones basses et hautes	77
7.4. EXEMPLES DE RÉSULTATS.....	80
7.5. VISITES DE TERRAIN.....	82
8. Localisation des secteurs potentiellement exposés aux franchissements de paquets de mer	85
8.1. PRINCIPE DE LA MÉTHODE	85
8.2. SWASH-PROFILS	85
8.3. SECTEURS EXPOSÉS AUX FRANCHISSEMENTS DE PAQUETS DE MER.....	87
8.4. REPRÉSENTATION CARTOGRAPHIQUE DES FRANCHISSEMENTS DE PAQUETS DE MER, DES CHOCS MÉCANIQUES ET PROJECTIONS.....	89
9. Mise en forme du SIG	93
10. Conclusion.....	95
11. Bibliographie	97

Liste des figures

Figure 1 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.....	15
Figure 2 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).....	16
Figure 3 : Cadre géographique de l'étude. L'emprise des communes concernées apparait en rouge.....	17
Figure 4 : Carte géologique de la zone d'étude (source : Carte géologique de la France 1/250 000, 44/45, éditions BRGM).....	18
Figure 5 : À gauche : plage de Porto-Novo (Bonifacio), à droite plage de San-Ciprianu (Zonza/Lecci).....	19
Figure 6 : Carte de répartition des vents dominants en Corse.....	20
Figure 7 : Rose des vents calculée au large de Lecci entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).....	21
Figure 8 : Rose des vagues calculée au large de Lecci entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).....	21
Figure 9 : Représentation des enregistrements des paramètres décrivant les états de mer du 1 ^{er} janvier 1979 au 1 ^{er} janvier 2010 (Hs et période). Les évènements identifiés ayant engendrés des dégâts sont encadrés en rouge (source : NWW3 MED).....	23
Figure 10 : Représentation des enregistrements des paramètres décrivant les états de mer du 1 ^{er} janvier 2014 au 1 ^{er} janvier 2019 au houlographe Alistro. Les évènements identifiés ayant engendré des dégâts sont encadrés en rouge (source : Candhis).....	23
Figure 11 : Pression atmosphérique le 8 novembre 1982 à 12h UTC. (Source : www.wetterzentrale.de).....	24
Figure 12 : Paramètres décrivant les états de mer du 30 octobre 1982 au 13 novembre 1982 (source : NWW3 MED).....	24
Figure 13 : Pression atmosphérique le 27 novembre 2008 à 18 h UTC (gauche) et le 28 novembre 2008 à 12 h UTC (droite). (Source : www.wetterzentrale.de).....	25
Figure 14 : Paramètres décrivant les états de mer du 20 novembre 2008 au 3 décembre 2008 (source : NWW3 MED).....	25
Figure 15 : Plage de San-Cyprianu (Zonza/Lecci) le 29 octobre 2018 pendant la tempête Adrian (source : réseaux sociaux).....	26
Figure 16 : Pression atmosphérique le 29 octobre 2018 à 12h UTC (Source : www.wetterzentrale.de).....	26
Figure 17 : Paramètres météorologiques et météo-marins mesurés du 23 octobre 2018 au 5 novembre 2018.....	27
Figure 18 : Carte des marégraphes du réseau RONIM situés dans les ports de Corse.....	29
Figure 19 : Localisation des houlographes du réseau CANDHIS aux abords des côtes de Corse. Réalisé avec Google Earth Pro.....	30
Figure 20 : Localisation des points d'extraction des niveaux d'eau au repos depuis la base de données MARS_MED_BRGM.....	32
Figure 21: Diagramme quantile-quantile et nuage de points des enregistrements horaires des niveaux d'eau au marégraphe d'Ajaccio (OBS) et des valeurs obtenues par modélisation MARS_MED_BRGM (MOD).....	32
Figure 22 : Emprise et bathymétrie du modèle NWW3 de la NOAA. Source : https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/nopp-phase2.php	33

Figure 23 : Grille des données de vagues et vents issues de la base NWW3 Med de la NOAA (ronds verts) et localisation des extractions ponctuelles correspondants aux points les plus proches des bouées CANDHIS ainsi qu’au point utilisé pour la zone d’étude au large de Lecci (étoiles oranges).....	34
Figure 24 : Hs observés et Hs simulés de la base NWW3 MED à la bouée Cap Corse, période 1999-2008, en bleu la relation quantile-quantile.....	34
Figure 25 : Hs observés et Hs simulés à la bouée Cap Corse, période 1999-2008.....	35
Figure 26 : Extension finale des grilles MNT sur la zone de travail.....	38
Figure 27 : Exemple de semis de sondes extraits des dalles bathymétriques du Shom aux abords du golfe de Sant’Amanza.....	39
Figure 28 : Produit MNT Bathymétrique de façade de la Corse à 100 m (Shom, 2015). Ici dans le système géodésique légal français RGF93, avec pour système de coordonnées projectées le Lambert-93.....	40
Figure 29 : Extrait du produit RGE ALTI® 1 m Corse (IGN).....	41
Figure 30 : Sources de données topo-bathymétriques disponibles sur l’emprise des MNT.....	42
Figure 31 : Localisation des sources de données topo-bathymétriques exploitées.....	45
Figure 32 : MNT topo-bathymétriques (A) à grande emprise (à la résolution de 50 m), et sur les secteurs de (B) Porto-Vecchio, (C) Santa Giulia et (D) Sant’Amanza (à la résolution de 10 m).....	46
Figure 33 : Localisation des points d’extraction des données vagues NWW3 MED (point bleu) et niveaux d’eau MARS (point 41 en orange).....	50
Figure 34 : Séries temporelles des conditions météo-marines utilisées pour l’analyse.....	51
Figure 35 : Rose des vagues NWW3 MED à gauche ; Diagramme bivarié (Tp,Hs) des vagues NWW3 MED à droite.....	52
Figure 36 : Rose des vents NWW3 MED.....	53
Figure 37 : Distribution marginale pour le niveau d’eau (SWL) - point d’extraction P41.....	54
Figure 38 : Distribution marginale pour la hauteur significative des vagues (Hs). Les couleurs donnent les valeurs des Dp (°).....	55
Figure 39 : Distribution marginale pour la vitesse du vent (U). Les couleurs donnent les valeurs des directions du vent Du (°).	55
Figure 40 : Combinaisons (Hs ; SWL ; U) observées (points noirs) et ceux simulés (points bleus) par méthode Monte-Carlo à l’aide des lois marginales et des lois de dépendances.	56
Figure 41 : Courbe 3D correspondante à la période de retour de dépassement conjoint centennale ; les couleurs correspondent aux valeurs de niveau marin SWL (m/NM).....	56
Figure 42 : Représentation 2D de l’iso-contour d’iso-période de retour de dépassement conjoint centennale (voir représentation en 3D sur l’Figure 41). Les valeurs sur les courbes sont les valeurs de niveau marin SWL. Les points bleus représentent les combinaisons prises en entrée des simulateurs numériques (34).....	57
Figure 43 : Relation entre Tp et Hs : observations (points noirs), résultats de la simulation Monte-Carlo (points cyans), modèle de régression ajusté sur la médiane des simulations.	58
Figure 44 : Recommandations pour la prise en compte de l’élévation du niveau de la mer en lien avec le changement climatique (MEDDE, mai 2014).	60
Figure 45 : Principe de la stratégie de modélisation pour le calcul des niveaux marins statiques au rivage (Ntot).	62
Figure 46 : Caractéristiques de vagues (hauteur significative et direction) et la surcote induite pour la combinaison n° 15 et l’évènement « actuel » sur le secteur de Porto-Vecchio.....	64
Figure 47 : Caractéristiques de vagues (hauteur significative et direction) et la surcote induite pour la combinaison n° 16 et l’évènement « actuel » sur le secteur de Santa Giulia.....	65

Figure 48 : Caractéristiques de vagues (hauteur significative et direction) et la surcote induite pour la combinaison n° 15 et l'évènement « actuel » dans le Golfe de Sant’Amanza.	65
Figure 49 : Période pic des vagues pour la combinaison n° 15 sur les secteurs de Porto-Vecchio (à gauche) et de Sant’Amanza (à droite).	66
Figure 50 : Période pic des vagues pour la combinaison n° 16 sur les secteurs Santa Giulia.....	66
Figure 51 : Effet du vent (surcote) généré par la combinaison n° 15 et l'évènement « actuel » sur l'ensemble de la zone d'étude.	67
Figure 52 : Illustration des niveaux marins au rivage maximaux (Ntot) à gauche, combinaison générant les niveaux marins au rivage maximaux à droite, pour l'évènement « actuel »..	69
Figure 53 : Illustration des niveaux marins au rivage maximaux (Ntot) à gauche, combinaison générant les niveaux marins au rivage maximaux à droite, pour l'évènement « 2100 »....	70
Figure 54 : Illustration schématique de submersion par une approche « statique » (ligne bleue) et par une approche dynamique (ligne verte).	71
Figure 55 : Carte des secteurs géomorphologiquement homogènes (emprise de Porto-Vecchio à gauche, emprise de Sant’Amanza à droite).	73
Figure 56 : Carte des secteurs géomorphologiquement homogènes sur l'emprise de Santa Giulia... ..	73
Figure 57 : Exemple de secteur homogène (San Ciprianu) pour le choix de Ntot _{actu} (1 m/NGF, à gauche) et Ntot ₂₁₀₀ (1,40 m/NGF, à droite).	74
Figure 58 : Profil Type Méditerranéen, descripteurs suivis dans le cadre du ROL (Moulis et Barbel, 1999 et Paskoff, 1985).	76
Figure 59 : Levé de la position du trait de côte haut (limite de la végétation à gauche, pied d'ouvrage à droite) au DGPS lors de la visite de terrain le 24 septembre 2018. En rouge, le trait de cote « haut » considéré dans la présente étude pour la délimitation des ZBPESM côté mer.	76
Figure 60 : Exemple de génération d'un polygone pour la cartographie des ZBPESM.	77
Figure 61 : Exemple de prise en compte de la limite côté mer du polygone.	77
Figure 62 : Exemple de découpage des zones « haut » de surface supérieure à 500 m ²	78
Figure 63 : Exemple de fusion des zones « haut » de surface inférieure à 500 m ² , intégrées dans la zone basse environnante	78
Figure 64 : Exemple 1 de fusion de zone basse de surface supérieure à 500 m ²	79
Figure 65 : Exemple 2 de fusion de zone basse de surface supérieure à 500 m ²	79
Figure 66 : Fusion de deux polygones en cas de connexion hydraulique.	79
Figure 67 : Schéma illustrant le code couleur appliqué aux polygones d'emprises des ZBPESM et de hauteurs d'eau.	80
Figure 68 : ZBPESM en arrière de cordon dunaire (flèches bleues : entrées d'eau préférentielles)....	81
Figure 69 : Profils topographiques de cordons dunaires.	81
Figure 70 : Exemple du front de mer de Porto-Vecchio au fond du golfe potentiellement submersible par débordement (flèches bleu : entrées d'eau).....	82
Figure 71 : Identification et mesure au DGPS de la position du trait de côte (Pinarellu à gauche, San Ciprianu à droite).	83
Figure 72 : Exemple d'observations sur le front de mer (Porto-Vecchio à gauche, Anse de Tramulimacchia à droite).....	83
Figure 73 : Exemple d'ouvrage (muret) ayant potentiellement un rôle sur l'écoulement de l'eau en cas de submersion marine (commune de Lecci, San Ciprianu).	83
Figure 74 : Exemple de connexion hydraulique reliant une zone basse à la mer (commune de Porto-Vecchio, cadre rouge : localisation de la buse sous la route).....	84

Figure 75 : Exemple de localisation de profils sur le secteur de San Ciprianu (commune de Lecci, altitude du trait de côte : traits bleu).....	86
Figure 76 : Exemple d’exploitation des résultats de SWASH-1DV sur le profil de l’Anse de Tramulimacchia (commune de Lecci), secteurs exposés aux franchissements de paquets de mer pour l’évènement « actuel » (points verts : présence d’eau).....	87
Figure 77 : Exemple d’exploitation des résultats de SWASH-1DV sur le profil de la plage de l’Ovu Santu (commune de Zonza), secteurs non exposés aux franchissements de paquets de mer pour l’évènement « actuel » (points verts : présence d’eau).....	87
Figure 78 : Exposition aux franchissements de paquets de mer (secteurs de Porto-Vecchio à gauche, secteurs de Sant’Amanza à droite).....	88
Figure 79 : Exposition aux franchissements de paquets de mer sur le secteur de Santa Giulia.....	89
Figure 80 : Exemple de restitution cartographique des bandes liées aux franchissements de paquets de mer (hachuré marron) et aux chocs mécaniques et projections (hachuré violet) ainsi que de la plage (en jaune).....	90
Figure 81 : Calepinage de l’atlas cartographique des ZBPESM.....	91
Figure 82 : Présentation des champs contenus dans le shape des emprises des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines.....	94
Figure 83 : Arborescence du dossier numérique contenant les résultats intermédiaires et finaux.....	94

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Références altimétriques maritimes pour les sites de la zone considérée. ZH/Ref correspond à la cote du zéro hydrographique dans le système altimétrique légal français (métropolitain pour le NGF), soit l’IGN78 pour la Corse.....	43
Tableau 2 : Valeurs des paramètres de vagues (Hs et Tp), de vent (U) et de niveau d’eau (SWL en m/NM) au large pour 34 combinaisons centennales.....	59
Tableau 3 : Code couleur des cartes des ZBPESM.....	80

Liste des annexes

Annexe 1 Niveaux marins au rivage retenus pour chaque secteur homogène et pour les évènements « actuel » et « 2100 »	99
Annexe 2 Localisation des profils pour l’étude des franchissements de paquets de mer	103
Annexe 3 Cartes des zones basses potentiellement inondables par submersion marine	109

1. Objectifs et cadre de l’étude

1.1. CONTEXTE

Le littoral de Corse est caractérisé par une alternance entre des falaises rocheuses d’altitude plus ou moins importante et des zones relativement basses correspondant généralement à des plages (dites « de poche ») ainsi que le vaste système de plages et dunes sableuses de la plaine orientale. Ces zones basses plus ou moins urbanisées, représentent pour le littoral de la Corse des zones à forts enjeux économiques et environnementaux. De par leur configuration géomorphologique, l’exposition de ces zones basses aux submersions marines est variable et complexe.

Une évaluation de l’exposition de ces secteurs a été réalisée en 2014 par la DDTM de la Corse du Sud (DDTM2A) et la DREAL de Corse dans un Atlas des Zones Submersibles (AZS, 2014). L’approche mise en place a consisté à cartographier l’ensemble des secteurs littoraux dont l’altitude est inférieure à un niveau marin de référence unique (2 m/NGF) déterminé par le CEREMA en 2013 pour l’ensemble du littoral méditerranéen français² (CEREMA et DREAL Corse, 2014).

A partir de données topographiques LIDAR produites par l’IGN en 2013 sur l’ensemble du littoral de la Corse, les zones basses dont l’altitude était inférieure à ce niveau marin de référence ont été délimitées sous la forme d’un Atlas. Elles sont considérées comme susceptibles d’être submergées par la mer en cas d’évènements marins extrêmes.

Cette approche permettait une première évaluation mais s’est avérée insuffisante et trop schématique pour représenter les zones susceptibles d’être submergées lorsque la géomorphologie des littoraux est complexe et que l’exposition aux variations du niveau marin lors des tempêtes (surcote atmosphérique, surélévation due à l’action des vagues) est conditionnée à des effets de site.

Afin de prendre en compte les interactions entre les différents agents météo marins (vagues, vent, marée, surcote atmosphérique), il a été convenu avec la DDTM de Corse-du-Sud de caractériser les **zones basses potentiellement exposées aux submersions marines (ZBPESM)** lors d’évènements extrêmes à une échelle locale et avec une méthode consistant à :

- déterminer à partir d’analyses statistiques dites de « probabilité conjointe » des **évènements centennaux au large** combinant les conditions de niveaux d’eau (marée et surcote), vagues et vents spécifiques à chaque portion de littoral ;
- calculer à partir de modélisations numériques les **niveaux marins résultants au rivage** afin de prendre en compte les effets notamment liés à la géomorphologie locale ;
- **cartographier les ZBPESM** en projetant les niveaux marins extrêmes obtenus pour chaque portion de littoral sur la base de données topographiques précises (LIDAR de l’IGN 2013, approche dite « statique »). Cette cartographie permet de réactualiser l’AZS (2014).

Avertissements :

☞ Les zones basses sont dites « potentiellement exposées aux submersions marines » car elles sont situées en dessous de la cote atteinte par la mer au rivage.

☞ Ne sont pas traités dans cette présente étude :

- Les défaillances de structures de protection côtières contre la submersion marine et les brèches dans les cordons dunaires ;

² Pour un évènement centennal, le CEREMA a calculé les niveaux marins suivants : niveau marin actuel dit « de référence » de 2m/NGF et niveau marin dit « à l’horizon 2100 » de 2,4m/NGF (CEREMA, 2013).

- l’impact de l’occupation du sol et la concomitance de submersions marines avec des crues des cours d’eau.
- ☛ L’approche proposée s’appuie sur les consignes méthodologiques du ministère en matière d’élaboration des plans de prévention des risques littoraux (PPRL, guide du MEDDE de mai 2014). Elle permettra d’améliorer la connaissance des processus impliqués dans les phénomènes de submersion marine et d’affiner le diagnostic préliminaire des ZBPESM en cas d’évènements extrêmes. Toutefois, elle ne permet pas de caractériser l’aléa submersion marine, au sens PPRL, qui requiert l’identification de 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 d’en déterminer les caractéristiques (durée de l’évènement, vitesses des écoulements, hauteurs d’eau maximales, etc.).
- ☛ Les résultats de cette étude ne peuvent donc être exploités en l’état pour caractériser et cartographier l’aléa submersion marine au sens PPRL.

Ce présent rapport traite uniquement le littoral de la **zone du golfe Sant’Amanza (commune de Bonifacio) au sud à la commune de Zonza au nord** qui a été étudié en priorité à la demande de la DDTM de Corse-du-Sud. L’étude concernant les autres communes de Corse-du-Sud étant en cours, les résultats seront présentés dans un rapport séparé.

Afin d’assurer une cohérence sur l’ensemble du littoral de la Corse, les communes de Haute-Corse seront traitées, à la demande de la DREAL, avec la même méthode que celle mise en œuvre en Corse-du-Sud.

1.2. RAPPELS THÉORIQUES SUR LES PHÉNOMÈNES DE SUBMERSION MARINE

1.2.1. Processus physiques

« 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 » (Guide méthodologique PPRL, MEDDE, mai 2014). Elles sont le plus souvent associées à des surélévations temporaires du niveau de la mer lors de tempêtes ou de cyclones, voire de tsunamis.

En dehors des tsunamis, les surcotes marines sont contrôlées par deux processus principaux (Figure 1) :

- **la surcote atmosphérique** : le passage d’un important système dépressionnaire (cyclone, tempête) est caractérisé par des variations du niveau marin selon deux mécanismes :
 - la chute de pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d’eau. C’est le phénomène de *baromètre inverse* : une diminution d’1 hPa équivaut à une élévation d’1 cm du plan d’eau (valeurs pour une situation théorique d’un plan d’eau infini et d’une pression atmosphérique uniforme),
 - à cela s’ajoute l’effet du vent, qui en fonction de son intensité et de sa direction est susceptible de provoquer des accumulations d’eau sur la bande littorale.

La surélévation du plan d’eau provoquée par la chute de pression et l’action du vent correspond à la surcote atmosphérique (ou météorologique). La combinaison de la marée et de cette surcote atmosphérique génère le niveau de la mer « au repos » (Figure 1). Par commodité, ce niveau est désigné par la suite par *SWL* (« *still water level* ») ;

- **la surcote liée aux vagues (wave Setup)** : à l’approche de la côte, les vagues générées au large déferlent en transférant leur énergie sur la colonne d’eau, dont une partie provoque une surélévation du niveau moyen du plan d’eau (le « *wave Setup* » ou surcote liée aux vagues) qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres.

Le **niveau moyen du plan d’eau** (ou niveau statique) lors d’une tempête ou d’un cyclone résulte de la contribution de la surcote atmosphérique, de la surcote des vagues et de la marée (Figure 1).

Enfin, le niveau instantané du plan d’eau dépendra du jet-de-rive (swash), c’est-à-dire le flux et le reflux des vagues sur l’estran. On appelle runup la cote maximale atteinte par la mer au-dessus d’un niveau de référence (ex. le zéro hydrographique).

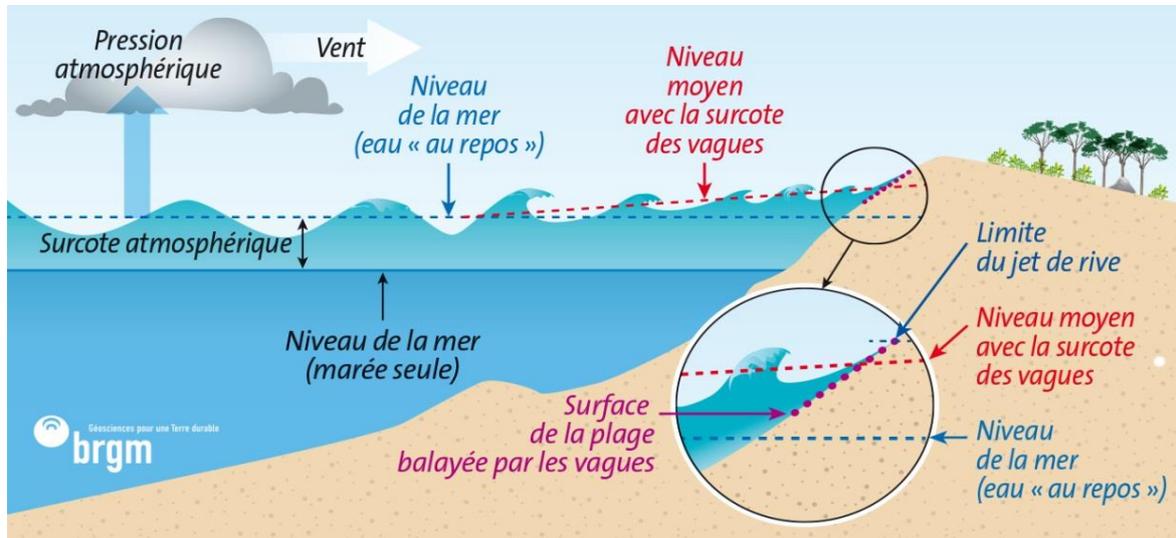


Figure 1 : Schéma des différentes contributions au niveau du plan d’eau lors d’une tempête (surcotes) jusqu’au rivage.

1.2.2. Types de submersion marine

La submersion peut se manifester sous trois formes différentes (Figure 2) :

- le **franchissement** par paquets de mer, qui correspond au passage des vagues par-dessus les défenses côtières (naturelles ou artificielles), l’accumulation d’eau résultante peut s’avérer importante selon l’ampleur des franchissements, sa durée et le linéaire concerné ; le franchissement est conditionné essentiellement par la position du plan d’eau (niveau statique) par rapport à la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, et par les caractéristiques locales des vagues (hauteurs et périodes) ;
- le **débordement**, qui correspond à une élévation du niveau d’eau statique au-dessus de la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection ; il entraîne un déversement direct d’importantes quantités d’eau à terre ; les volumes d’eau mis en jeu dépendent de l’écart entre le niveau d’eau et celui de la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, la durée du débordement et de la vitesse de l’écoulement ;
- la **rupture** de structures de protection qui peut être causée par l’action répétée des vagues et/ou la surverse. Les structures de protection peuvent être alors endommagées progressivement ou brutalement, et des brèches ou une défaillance généralisée peuvent se produire, provoquant le passage à un régime de débordement. Le déversement de l’eau en arrière des ouvrages est également de nature à les dégrader davantage.

Un épisode de submersion peut résulter de la succession de ces différents processus (Figure 2), voire de leur occurrence simultanée, en des endroits différents. 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 des défenses côtières, la submersion passe alors en régime de débordement (temps 3A). 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 (temps 3B). 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 (temps 3C).

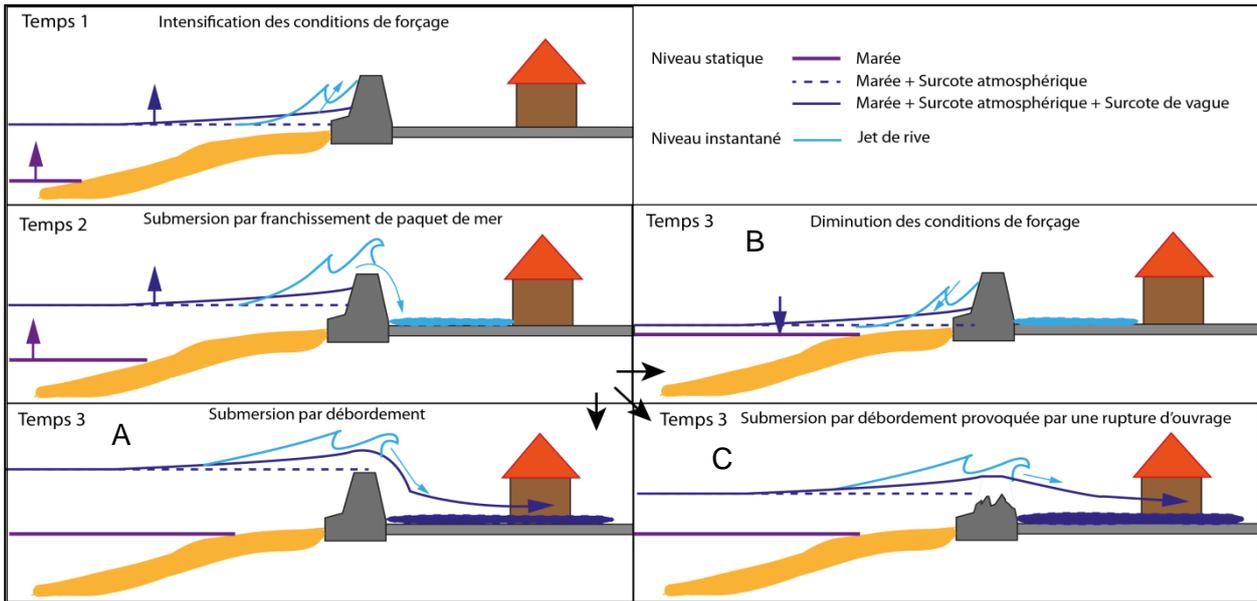


Figure 2 : Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).

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, morfo-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 GÉOGRAPHIQUE

Le littoral étudié se situe dans le quart Sud-Est de la Corse dans le département de Corse-du-Sud. Il s’étend de l’extrémité nord de la commune de Zonza jusqu’au sud de la façade est de la commune de Bonifacio (Golfe de Sant’Amanza). Il donc englobe les communes de Zonza, Lecci, Porto-Vecchio et Bonifacio (Figure 3).

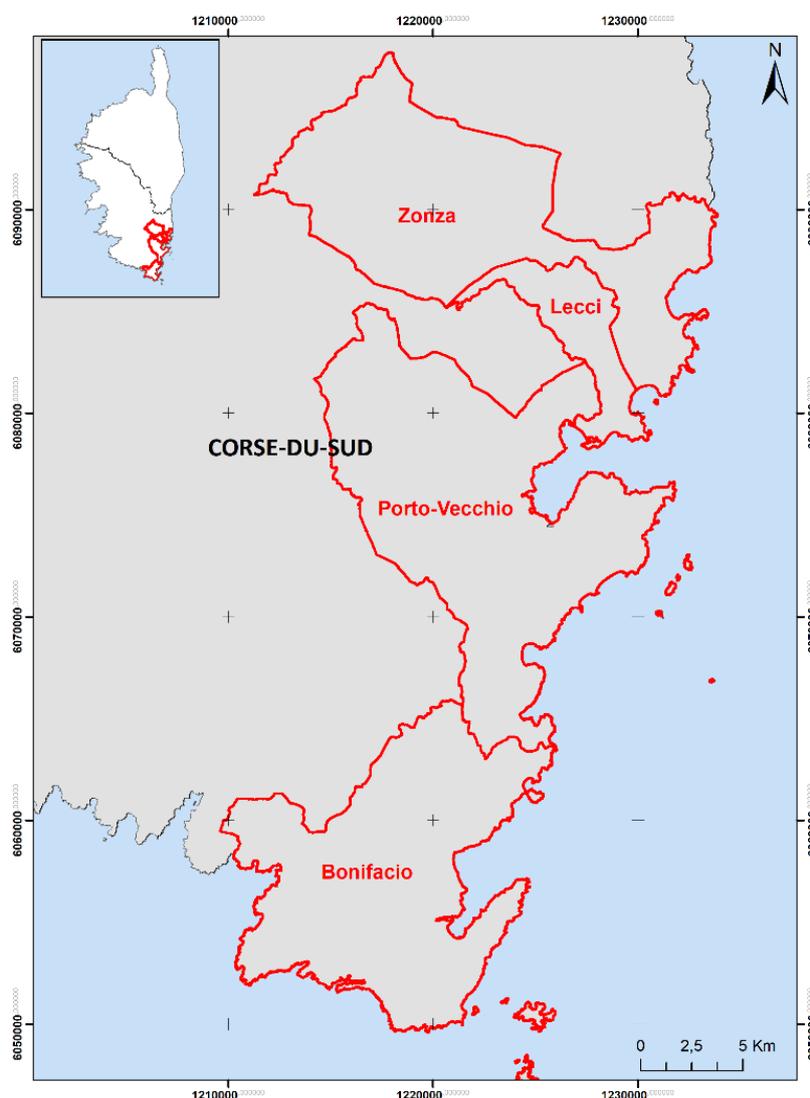


Figure 3 : Cadre géographique de l'étude. L'emprise des communes concernées apparaît en rouge.

2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET MORPHOSÉDIMENTAIRE

Le littoral du Sud-Est de la Corse constitue la jonction entre la plaine Orientale avec un linéaire sableux d’environ 100 km et la côte rocheuse de 700 km. Le secteur est principalement constitué de granits hercyniens. Des calcaires Miocène constituent notamment le cap « Rocchi Bianchi » et le fond du golfe de Sant’Amanza (c’est le même calcaire qui forme les falaises de Bonifacio) (Figure 4).

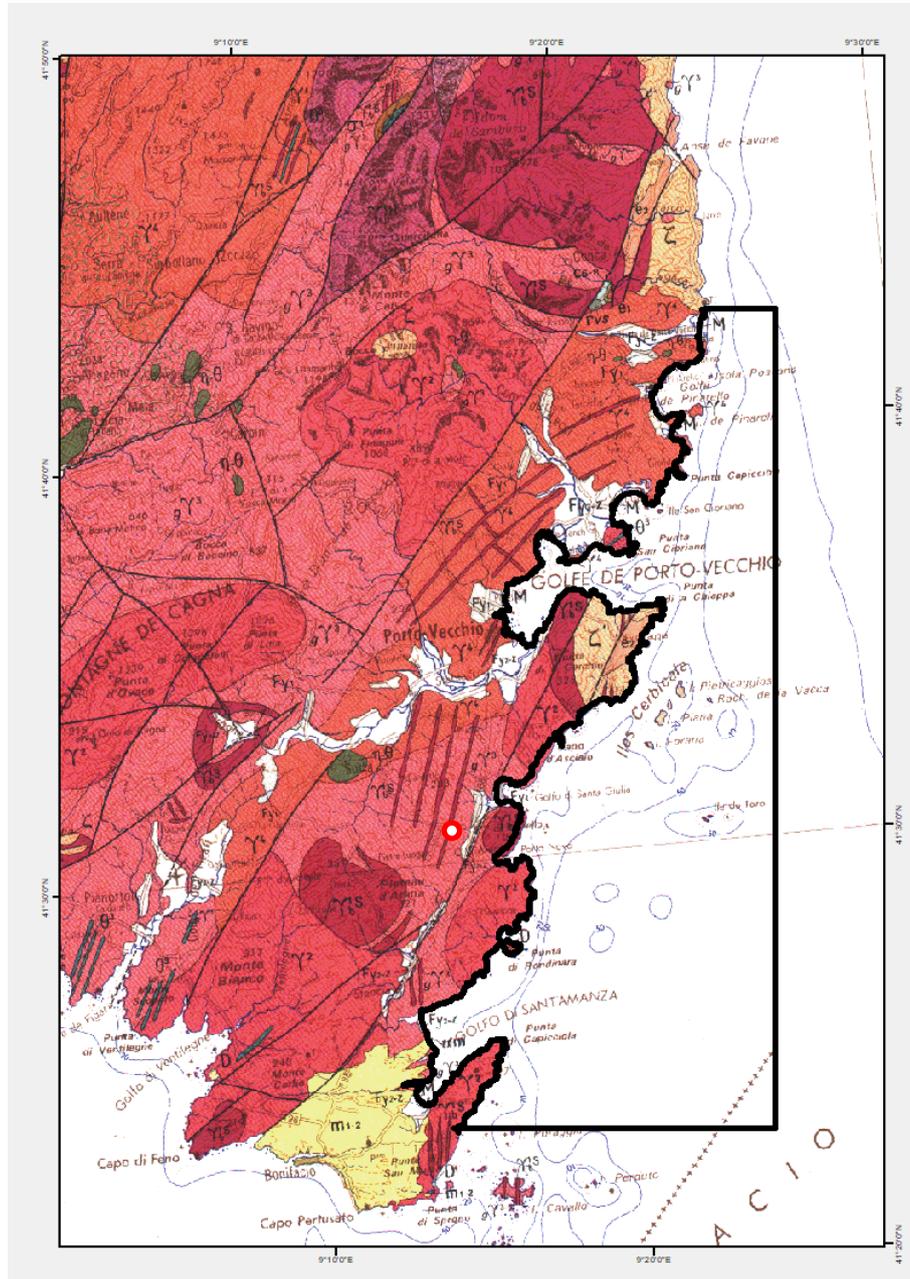


Figure 4 : Carte géologique de la zone d’étude

(source : Carte géologique de la France 1/250 000, 44/45, éditions BRGM).

Les terrains aux teintes rougeâtres sont les granits d’âge hercynien et les terrains en beige clair sont les calcaires du miocène, ces derniers sont cantonnés au Sud-Ouest de la carte. Le cercle rouge indique la position de la falaise calcaire « Rocchi Bianchi ». Le contour noir correspond au secteur d’étude.

La nature granitique de cette portion du littoral Corse a engendré la formation d’un littoral dentelé majoritairement rocheux en alternance avec des plages situées entre deux caps, dites « plages de poches » (*pocket beaches*) (Belon et Bodéré, 2016). Leur largeur va de quelques dizaines de mètres à plusieurs kilomètres jusqu’à former des larges baies (Figure 5).

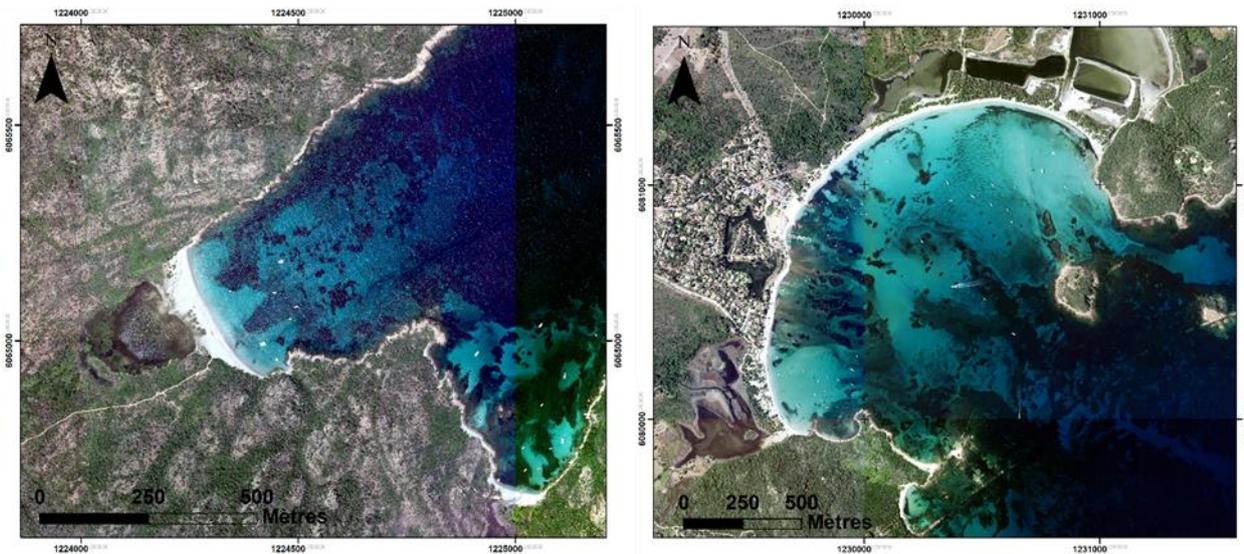


Figure 5 : À gauche : plage de Porto-Novo (Bonifacio), à droite plage de San-Ciprianu (Zonza/Lecci).

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

En Corse, ces anses sableuses sont souvent situées au droit de vallées incisées par une rivière dont l'embouchure marine interrompt le cordon littoral sableux. En arrière de celui-ci se développe généralement une zone humide, siège d'intérêts écologiques importants et/ou d'aménagements touristiques.

L'évolution géomorphologique du trait de côte a été étudiée par le BRGM (Delpont *et al.*, 1998) sur les principales plages de la zone d'étude sur la période 1946 à 1996 à partir d'images aériennes de l'IGN, de cartes topographiques de l'IGN (1/25 000), de cartes bathymétriques du SHOM (1/50 000) et de la carte géologique du BRGM. Un suivi spécifique de l'évolution géomorphologique des plages de Balistra et de Santa Giulia (acquisitions topo-bathymétriques annuelles) a ensuite été mis en place par le BRGM dans le cadre du Réseau d'Observation du Littoral de Corse depuis 2001 (<http://www.littoral-corse.fr/>).

2.3. CONTEXTE MÉTÉOROLOGIQUE

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 de par sa position géographique est sujette à un régime de vent réputé violent 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 6).

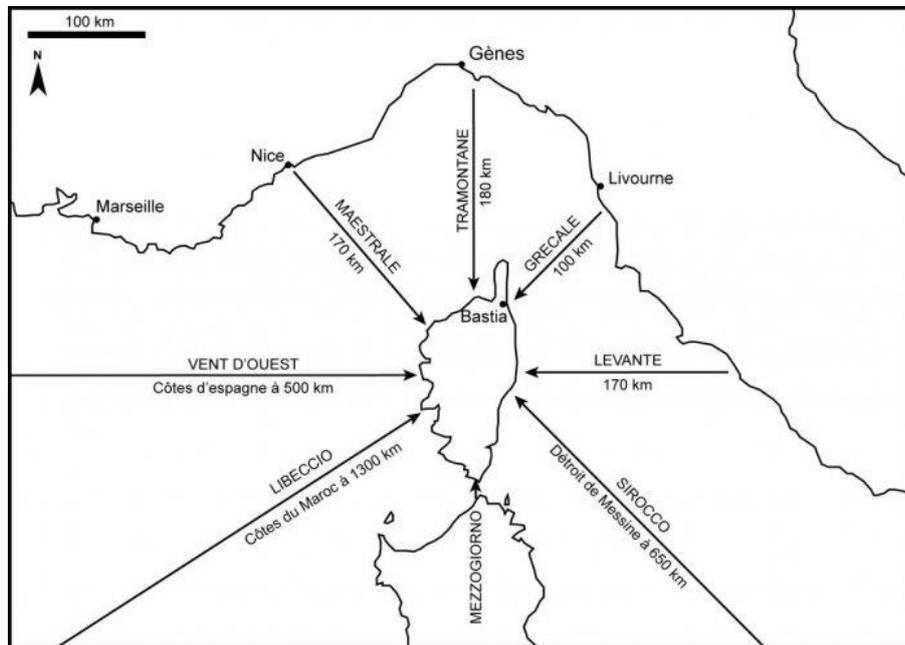


Figure 6 : Carte de répartition des vents dominants en Corse.

D’autre part, le secteur des bouches de Bonifacio est réputé particulièrement venteux en raison de l’effet venturi³ généré par l’espace restreint entre le Corse et la Sardaigne. Ainsi, le vent y souffle 300 jours par an et des records sont régulièrement enregistrés au Cap-Pertusato (par exemple 187 km/h le 29 octobre 2018 pendant la tempête Adrian).

Concernant le secteur de l’étude en particulier, les vents sont assez irréguliers. Le vent dominant reste le Libeccio (sud-ouest) toute l’année mais avec une influence très limitée sur le littoral qui est protégé des houles en provenance de cette direction. En revanche, les vents de secteur est sont moins fréquents.

2.3.2. Caractéristiques générales des tempêtes

Sur la côte Est de la Corse, les principales tempêtes génératrices de dommages sur le littoral (associées à des surcotes du niveau moyen de la mer) proviennent du sud-est. Schématiquement, 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 Venturi⁴. 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 Foehn⁵ sur la façade ouest (Stéphanian et Balouin, 2011).

Des tempêtes en provenance du sud-ouest peuvent également toucher l’est de la Corse. Ce sont les tempêtes les plus violentes atteignant l’île, généralement très creuses en terme barométrique

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

⁴ Effet Venturi : Processus en dynamique des fluides d’accélération des particules dans un espace restreint.

⁵ Effet de föhn : 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 .

(inférieures à 990 hPa) elles se forment ou se régénèrent sur la Méditerranée occidentale en provenance de l’Atlantique et se déplacent d’ouest en est (Stepanian and Balouin 2011).

La Figure 7 présente la rose des vents provenant de la base de données NWW3 Méditerranée (NWW3 MED, <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/nopp-phase2.php>) pour un point d’extraction au large de Lecci de 1979 à 2010.

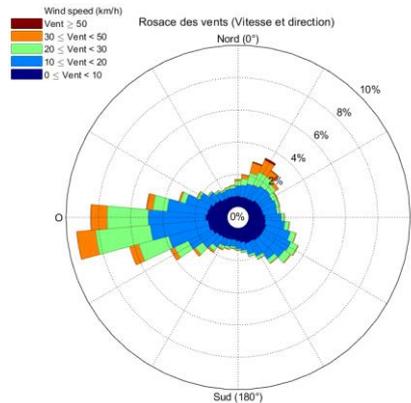


Figure 7 : Rose des vents calculée au large de Lecci entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).

2.4. CONTEXTE OCÉANOGRAPHIQUE

En Méditerranée, la marée est de type microtidale⁶. D’après le SHOM⁷ avec un marnage de 0,2 m en mortes-eaux⁸ à 0,4 m en vives-eaux⁹. Dans le quart sud-est de la Corse, les conditions de vagues sont en moyenne relativement peu énergétiques : Hs¹⁰ : 0,5 m et Tp¹¹ : 4 s (moyennes issues de la base NWW3 MED en un point au large de Lecci sur la période 1^{er} janvier 1979 au 1^{er} janvier 2010), mais soumises à une forte saisonnalité avec des tempêtes violentes en hiver et des valeurs de Hs dépassant presque chaque hiver les 3 m. La direction principale des vagues est sud-est, suivie par la direction nord-est avec des vagues généralement moins puissantes (Figure 8).

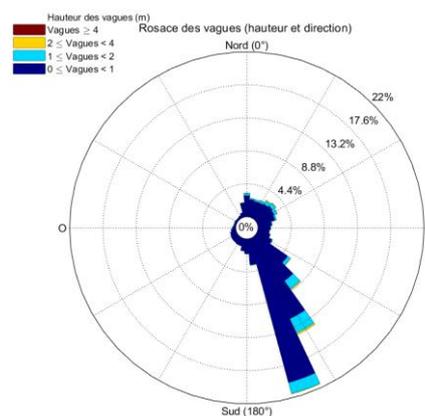


Figure 8 : Rose des vagues calculée au large de Lecci entre 1979 et 2010 (source : NWW3 MED de la NOAA).

⁶ Milieu microtidal : milieu où le marnage est inférieur à 2 mètres, caractéristique des mers fermées.

⁷ Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.

⁸ Morte-eau : marée où le coefficient est inférieur à 70.

⁹ Vive-eau : marée où le coefficient dépasse 70.

¹⁰ Hs : hauteur significative des vagues en mètre, elle représente la moyenne du tiers supérieur des vagues.

¹¹ Tp : période de la houle en seconde.

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 appelé dérive littoral. Sur le secteur de la zone d’étude essentiellement constituée de cellules sédimentaires quasi-closes (plages de poche), la dérive littoral est matérialisée par une rotation de plage qui est soumise à la direction principale de la houle. Par exemple, sur une plage de poche orientée Nord-Sud, des vagues provenant du secteur Nord engendreront un déplacement sédimentaire vers la portion Sud de la plage alors que des vagues provenant du Sud entraîneront un déplacement vers le Nord de la plage.

2.5. CONNAISSANCES HISTORIQUES

Un inventaire des tempêtes ayant affecté le quart Sud-Est de la Corse a été effectué. Les informations recueillies proviennent des bases de données CatNat¹² et GASPAR¹³ ainsi que des archives de presse sur les communes de la zone d’étude (Bonifacio, Porto-Vecchio, Lecci et Zonza).

Bien que beaucoup de tempêtes soient recensées en Corse par Météo-France et visibles sur les jeux de données de vagues (Figure 9 et Figure 10), peu d’articles médiatiques ou sur les bases de données de catastrophes naturelles témoignent de leurs impacts sur le secteur de la zone d’étude (sud-est de la Corse). Ainsi, seulement 3 événements majeurs ont pu être identifiés pour les 40 dernières années dont l’impact sur le quart Sud-Est a pu être réellement identifié.

La Figure 9 présente les données de hauteurs significatives (Hs) et de période des vagues pour la période de 1979 à 2010, les données sont issues de la base de données NWW3 MED de la NOAA pour une extraction au large de Lecci. La Figure 10 présente les mêmes paramètres pour la période de 2014 à 2019 avec des données issues du houlographe d’Alistro (CANDHIS, CEREMA). Alors que la base NWW3-MED est une simulation rétrospective et offre une série temporelle continue, la série temporelle du houlographe n’est pas continue et présente des lacunes ponctuelles de données (plateaux sur la Figure 10).

Sur ces deux figures, les événements marquants ayant généré des impacts sur le quart sud-est de la Corse sont indiqués par des rectangles rouges. Ces événements sont détaillés séparément dans les paragraphes ci-dessous. Pour la grande majorité des pics de hauteur significative supérieure à 2 m, il n’y a pas de témoignage dans les médias d’impact sur la zone d’étude. D’autres secteurs de Corse sont plus documentés (Ajaccio et Bastia par exemple).

¹² CatNat : Observatoire permanent des catastrophes naturelles et des risques naturels.

¹³ GASPAR : Base national de gestion assistée procédures administratives relatives aux risques.

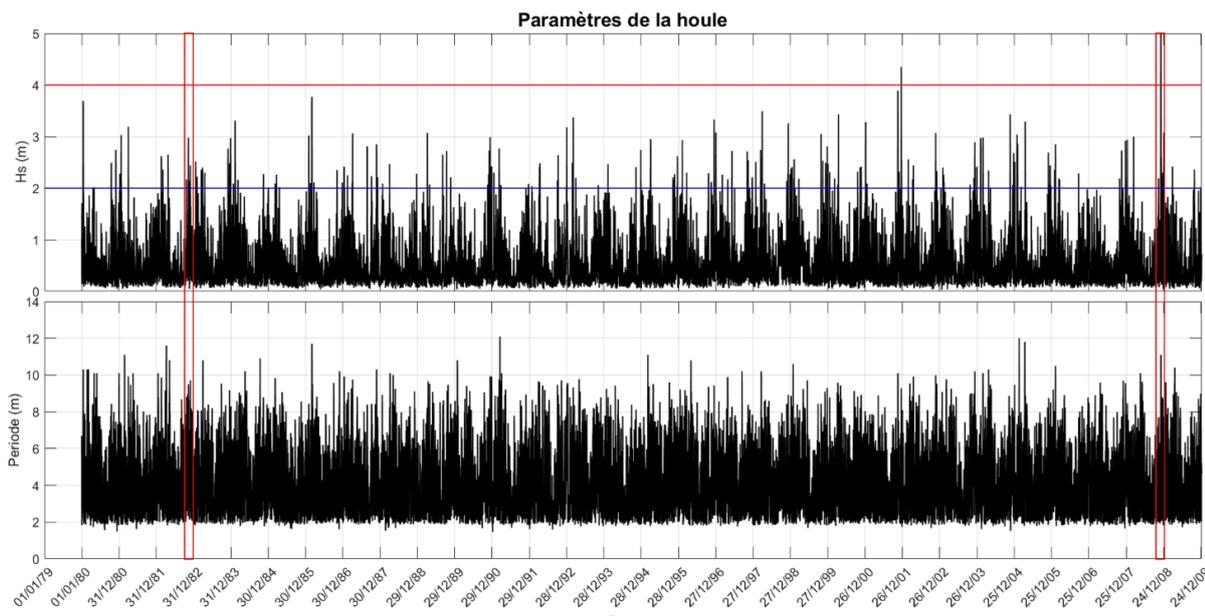


Figure 9 : Représentation des enregistrements des paramètres décrivant les états de mer du 1er janvier 1979 au 1er janvier 2010 (Hs et période). Les évènements identifiés ayant engendrés des dégâts sont encadrés en rouge (source : NWW3 MED).

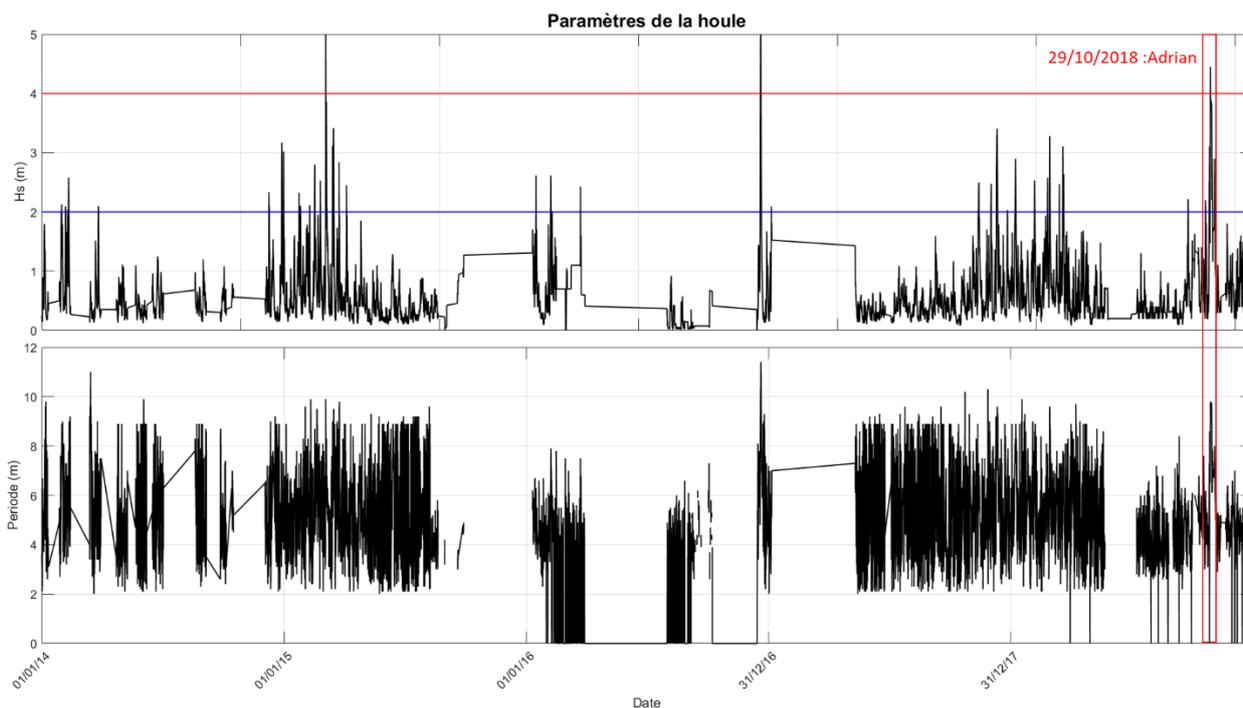


Figure 10 : Représentation des enregistrements des paramètres décrivant les états de mer du 1er janvier 2014 au 1er janvier 2019 au houlographe Alistro. Les évènements identifiés ayant engendré des dégâts sont encadrés en rouge (source : Candhis).

2.5.1. Tempête du 6 au 10 novembre 1982

Contexte

Cette tempête a entraîné une combinaison de pluies intenses et de vagues violentes sur le Sud-Est de la Corse pour la période du 6 au 10 novembre 1982. Elle a fait l’objet d’un arrêté de catastrophe naturelle sur les communes de Zonza, Conca et Solenzara.

Situation météorologique

Les conditions météorologiques se dégradent à partir du 6 novembre où l’on constate des précipitations importantes entraînant le débordement des cours d’eau tels que la Solenzara. Le vent s’intensifie le 8 novembre en provenance du Sud-Sud-Est. Les données de pressions atmosphériques n’attestent pas d’une situation exceptionnelle sur le secteur Ligurie (Figure 11).

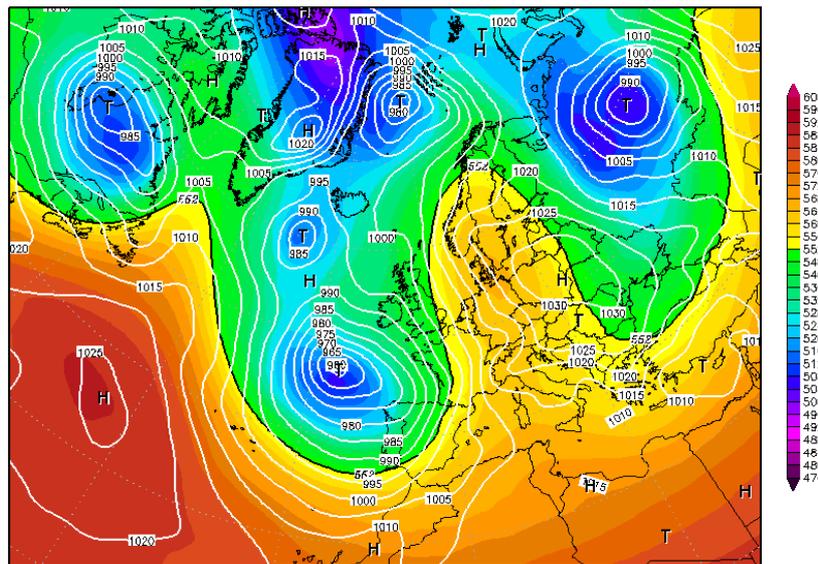


Figure 11 : Pression atmosphérique le 8 novembre 1982 à 12h UTC.
(Source : www.wetterzentrale.de).

Les données décrivant les états de mer (Hs, Tp, Direction) confirment également une intensification à partir du 7 novembre. Les vagues atteignent une hauteur de 2,5 m et une période de 9 secondes entre le 8 et le 9 novembre (Figure 12).

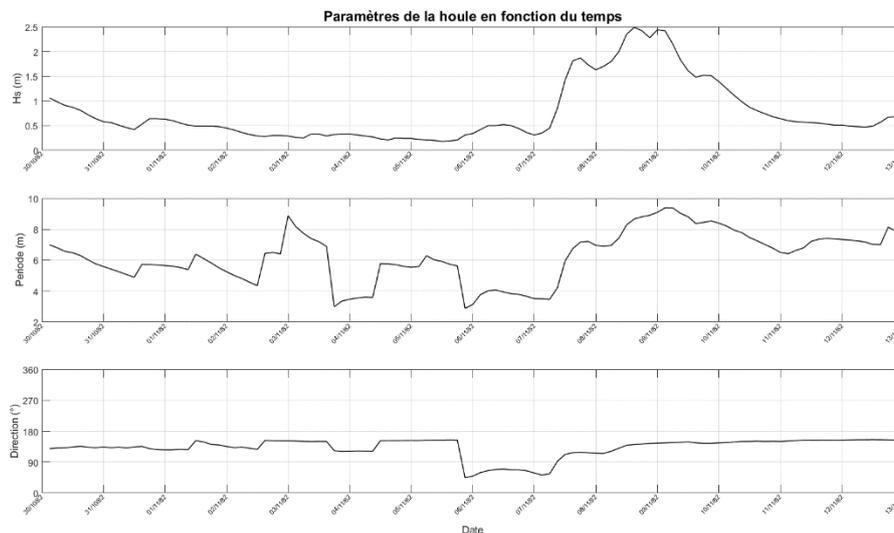


Figure 12 : Paramètres décrivant les états de mer du 30 octobre 1982 au 13 novembre 1982
(source : NWW3 MED).

2.5.2. Tempête du 27 au 28 novembre 2008

Contexte

Cette tempête a particulièrement affecté le littoral de la plaine orientale. Elle a été reconnue catastrophe naturelle pour « inondation et choc mécaniques liés à l’action des vagues » notamment sur les communes de Solenzara Conca et Zonza.

Situation météorologique

Une dépression originaire de l’Algérie est remontée vers le nord en longeant la côte ouest de la Sardaigne puis de la Corse. Elle a ensuite traversé la France le 1^{er} décembre (Figure 13). Cette dépression a engendré des vents d’une rare violence de secteur sud-est.

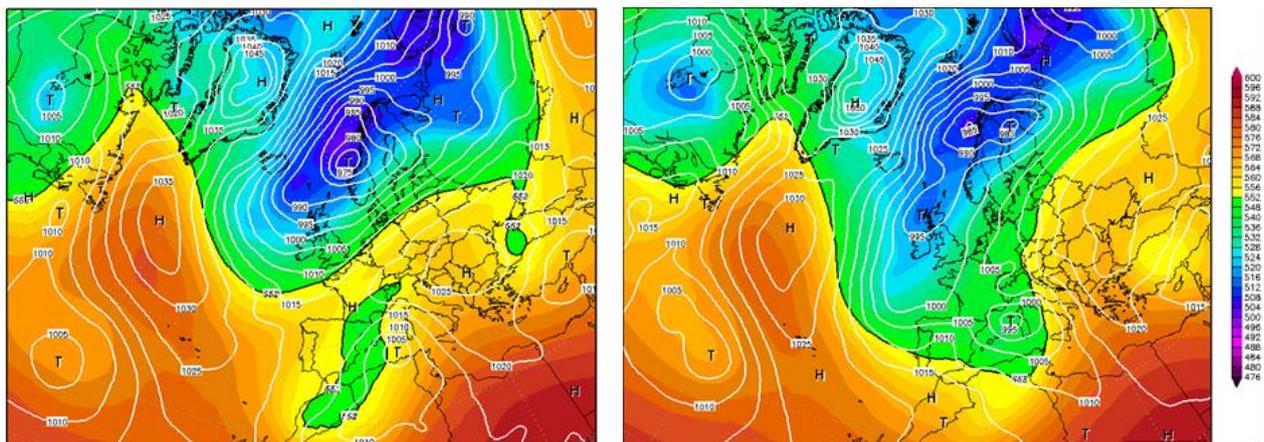


Figure 13 : Pression atmosphérique le 27 novembre 2008 à 18 h UTC (gauche) et le 28 novembre 2008 à 12 h UTC (droite). (Source : www.wetterzentrale.de).

Les vents ont entraîné une mer « très forte » à « grosse » sur la façade est de la Corse pendant toute la journée du 28 novembre. Les données décrivant les états de mer montrent en effet un pic avec des vagues dépassant les 3 m pour 11 secondes de période au large de Lecci dans la journée du 28 novembre (Figure 14). La surcote atmosphérique a atteint 25 cm (Météo France, 2008).

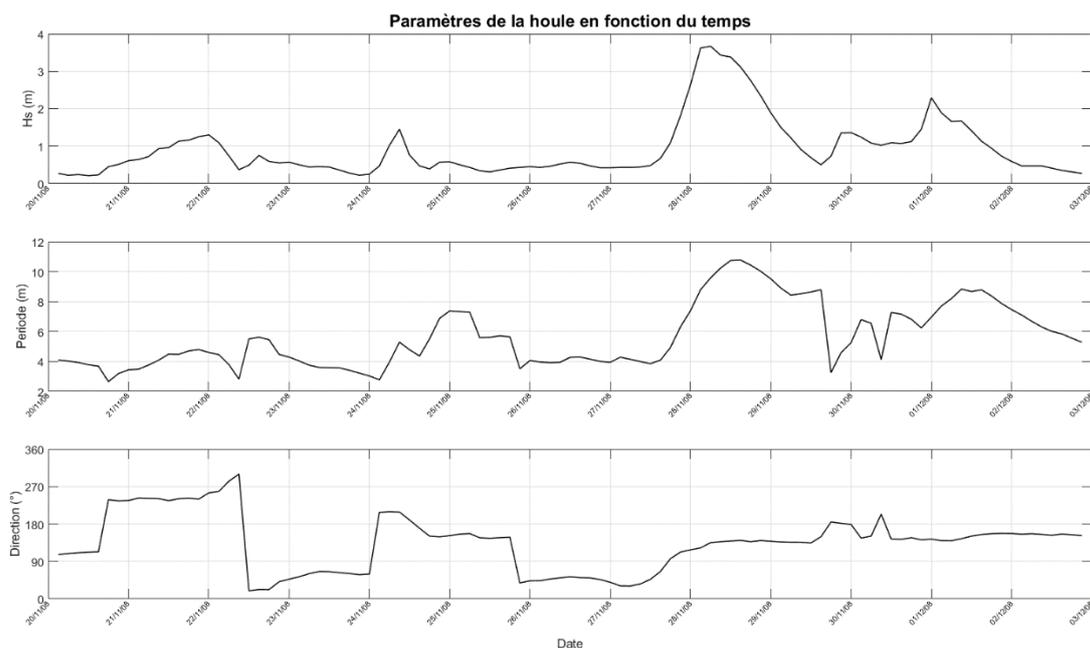


Figure 14 : Paramètres décrivant les états de mer du 20 novembre 2008 au 3 décembre 2008 (source : NWW3 MED).

2.5.3. Tempête du 29 octobre 2018

Contexte

Cette tempête a été baptisée « Adrian » par MétéoFrance. Elle a nécessité 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 Corse (Figure 15).



Figure 15 : Plage de San-Cyprianu (Zonza/Lecci) le 29 octobre 2018 pendant la tempête Adrian (source : réseaux sociaux).

Situation météorologique

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 16). Des rafales dépassant 110 km/h sont enregistrées dans l’après-midi, une pointe de 180 km/h est observée au Cap-Pertusato proche de Bonifacio.

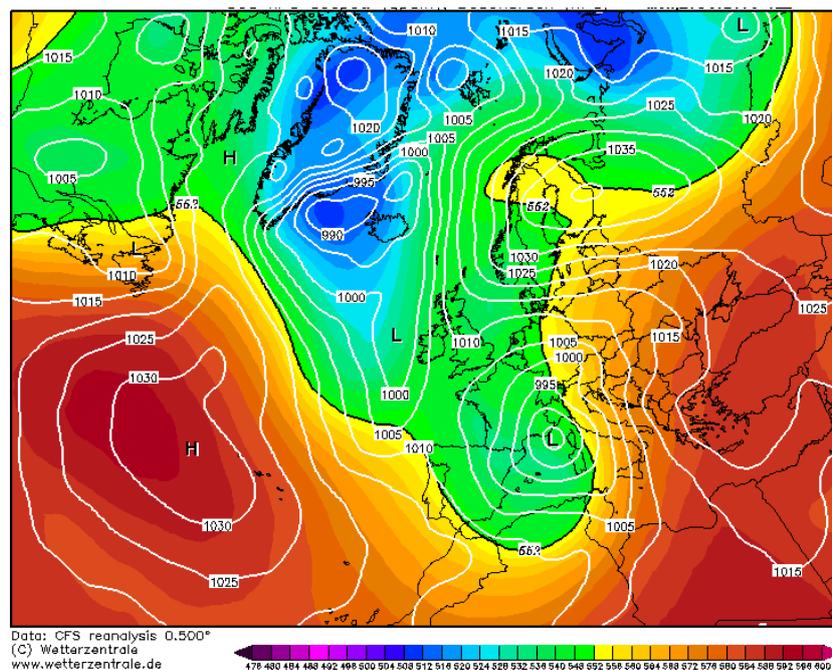


Figure 16 : Pression atmosphérique le 29 octobre 2018 à 12h UTC (Source : www.wetterzentrale.de).

L’impact considérable de cette tempête provient de la conjonction de plusieurs facteurs environnementaux simultanés. La Figure 17 présente en parallèle la hauteur des vagues (données CANDHIS du houlographe d’Alistro), la vitesse du vent (données Synop MétéoFrance), la pression atmosphérique, (données Synop MétéoFrance) et le niveau d’eau (données marégraphiques REFMAR). Il est constaté en simultané des hauteurs de vagues dépassant les 4 m, un vent moyen atteignant un pic de 60 km/h, associé à une pression atmosphérique très faible (au minimum : 980 hPa). Un niveau d’eau particulièrement haut a été mesuré au marégraphe de Solenzara à 0,65 m/NGF (soit 1,129 m/ZH, le 29 octobre 2018 à 12 h).

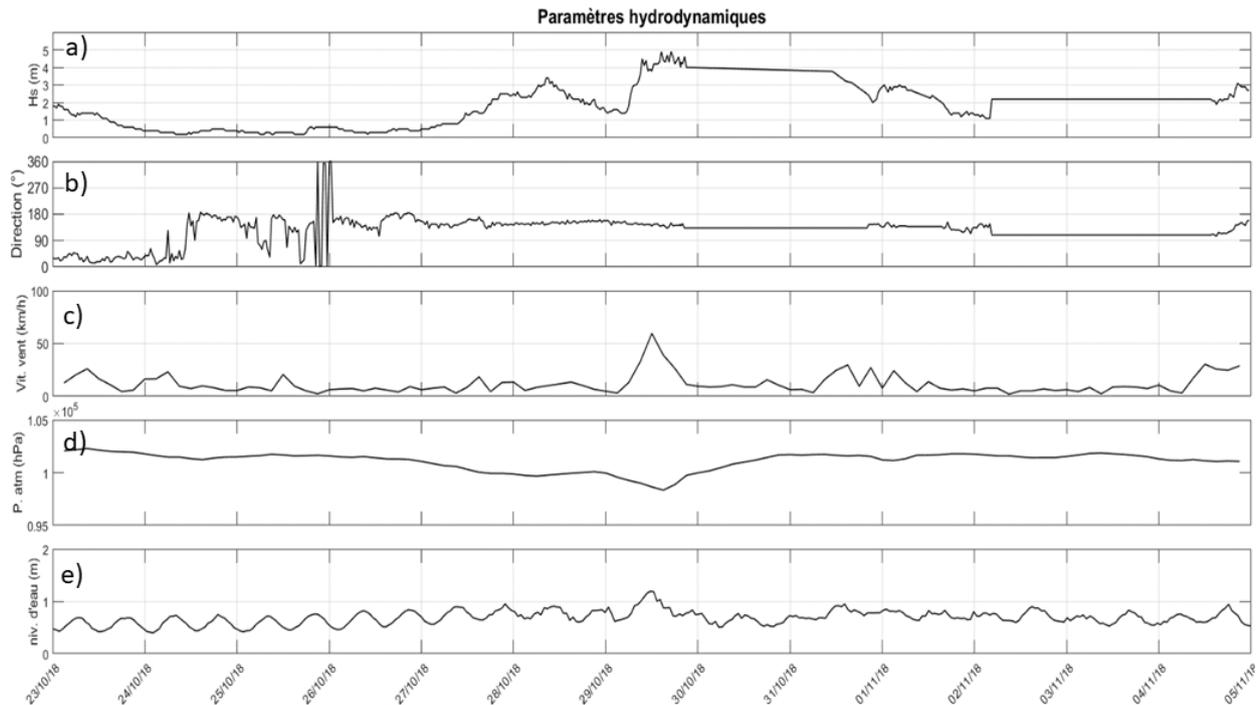


Figure 17 : Paramètres météorologiques et météomarins mesurés du 23 octobre 2018 au 5 novembre 2018. a) Hauteur significative des vagues et b) Direction pic des vagues (source : Houlographe Alistro, CANDHIS), c) vitesse du vent, d) pression atmosphérique (source : Synop MétéoFrance, station Bastia) et e) niveau d’eau ramené au zéro hydrographique (source : Marégraphe du SHOM à Solenzara).

2.6. 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 météomarines soulignent l’association de surcote atmosphérique aux événements de tempête majeurs. La résolution des données disponibles ne permet pas de distinguer la part de la surcote liée au vent de la part de la surcote due à l’effet de baromètre inverse¹⁴. 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. 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 les premiers mètres du littoral sud-est de Corse-du-Sud.

¹⁴ Effet de baromètre inverse : une chute de pression de 1hPa génère une élévation du plan d’eau de 1 cm.

La méthode repose sur une modélisation numérique intégrant les contributions de la surcote atmosphérique liée au vent et à la pression, de la surcote liée au déferlement des vagues et du niveau d’eau au large. Les niveaux marins au rivage ainsi calculés seront exploités pour la cartographie des **zones d’altitude inférieures considérées potentiellement exposées aux submersions marines**.

Les secteurs potentiellement affectés par les **franchissements de paquets de mer**, considérés comme les phénomènes les plus fréquents, seront localisés à partir d’une modélisation numérique sur un ou deux profils selon les plages. Ils seront représentés sur les cartes (SIG) par une bande de sécurité forfaitaire de 50 m (recommandations ministérielles, guide PPRL du MEDDE, mai 2014) sur les portions du littoral pour lesquelles ils sont susceptibles de contribuer au phénomène de submersion marine.

L’identification des secteurs potentiellement exposés aux **chocs mécaniques et projections liés aux vagues** qui représentent un aléa distinct de la submersion marine, n’était initialement pas prévue dans cette présente étude. Cependant, à la demande de la DDTM2A une bande de sécurité forfaitaire de 25 m (recommandations ministérielles, guide PPRL du MEDDE, mai 2014) sera intégrée à la cartographie au niveau des secteurs considérés potentiellement exposés.

3. Données météo-marines

Les données météo-marines ont d’une part vocation à permettre une approche historique afin de caractériser, lorsqu’elles sont disponibles, les événements de tempêtes marquants. D’autre part, elles font l’objet d’analyses statistiques afin de déterminer les caractéristiques de niveau d’eau, des états de mer (hauteur significative, période de pic et direction) et de vent (vitesse et direction) composant les événements centennaux au large. Elles permettent également de calibrer et de valider les modèles numériques mis en œuvre.

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.

3.1. OBSERVATIONS IN-SITU

3.1.1. Marégraphes du réseau RONIM du SHOM

Des marégraphes appartenant au Réseau d’Observation du Niveau de la Mer (RONIM) permettent l’observation et le suivi des niveaux d’eau dans certains ports de Corse. Leur emplacement est indiqué sur la . Il s’agit d’observatoires secondaires, le port de référence le plus proche étant celui de Toulon (Shom, 2017).

Les données en ces ports sont disponibles sur le portail <https://data.shom.fr/>. La série temporelle la plus longue gérée par ce réseau est celle d’Ajaccio avec une vingtaine d’années d’acquisition entre 1981 et nos jours.

Le port le plus proche de notre zone d’étude et abritant un marégraphe est celui de Solenzara. Les mesures n’y sont toutefois régulières que depuis 2010. Cela représente une durée trop faible pour :

- 1) l’analyse tri-variée des extrêmes (cf. § 5.4) ;
- 2) la validation des données issues de modélisations numériques. En effet, la base MARS_MED_BRGM s’étend du 1^{er} janvier 1979 au 1^{er} janvier 2010. Le recouvrement est donc insuffisant pour comparer données *in-situ* et simulées.



Figure 18 : Carte des marégraphes du réseau RONIM situés dans les ports de Corse.

Les points verts indiquent les marégraphes pour lesquelles les données sont disponibles en temps réel (en violet en différé au moment de l’étude). Source : data.shom.fr

Houlographes CANDHIS

Le Centre d’Archivage National de Données de Houle In Situ (CANDHIS) est en charge de la gestion, maintenance et mise à disposition des données de vagues *in-situ* en France.

Les bouées en mer proches des côtes Corses sont au nombre de 4 (cf. Figure 19). L’information spectrale condensée des états de mer est estimée à partir d’une mesure hautes-fréquences. Une vingtaine de paramètres sont mesurés et calculés par analyse spectrale. Parmi eux, la hauteur significative **Hm0**, la période moyenne **Tm02**, et la période de pic **Tp**, avec une résolution temporelle initiale de 3 h, puis une résolution horaire, et enfin une acquisition toutes les demi-heures pour les données les plus récentes.

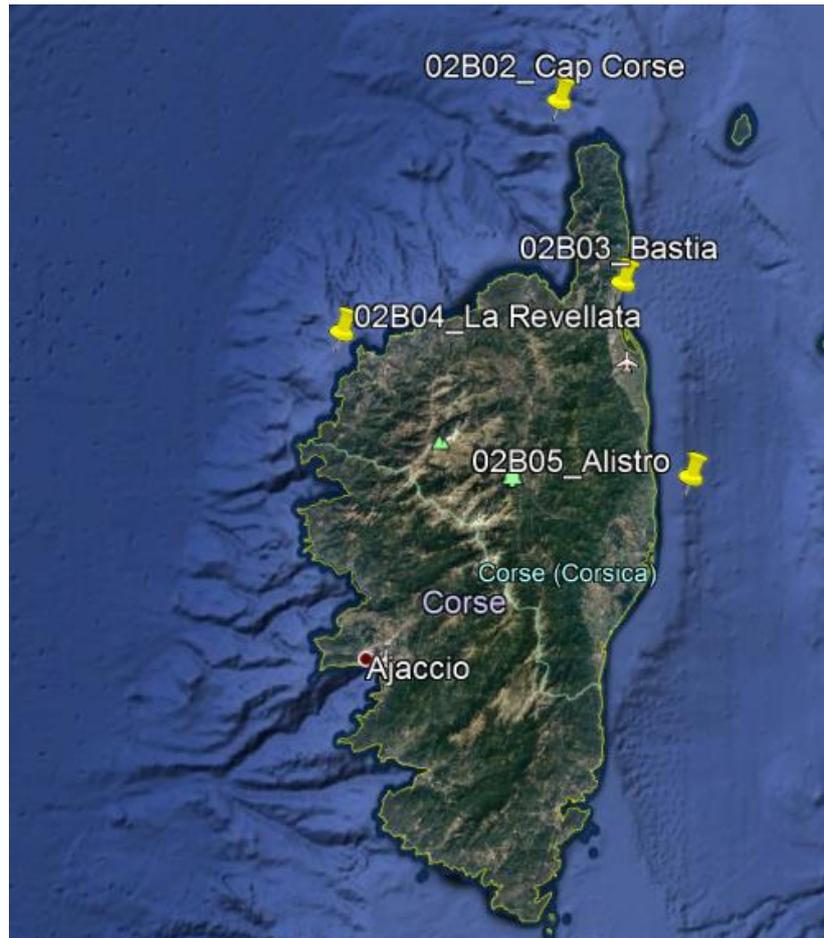


Figure 19 : Localisation des houlographes du réseau CANDHIS aux abords des côtes de Corse.
Réalisé avec Google Earth Pro.

Le Tableau 1 présente les renseignements généraux des 4 bouées présentes le long des côtes de la Corse. Le code et la localisation permettent d’identifier le jeu de données. La position géographique est indiquée en latitude, longitude dans le système WGS84 avec en plus une information de profondeur de mouillage *h* et de distance à la côte exprimée en miles nautiques (1 mile = 1 852 m). La couverture temporelle est donnée par la différence entre la date de fin de campagne et la date de début de campagne.

Code bouée	Localisation	Latitude	Longitude	Profondeur (m)	Distance à la côte (miles)	Fréquence d'acquisition	Nombre total de données	Début de l'acquisition	Fin de l'acquisition
02B02	Cap Corse	43°03,66'N	9°16,510'E	140	4.8	1 acquisition/3h, horaire, 2 acquisitions/h	26337	16/03/1999	01/03/2011
02B03	Bastia	42°40,44'N	9°27,270'E	17	0.35	2 acquisitions/h	25450	13/09/2006	19/11/2008
02B04	La Revellata	42°34,150'N	8°39,000'E	130	2.54	2 acquisitions/h	69333	02/05/2013	Acquisition en cours
02B05	Alistro	42°15,700'N	9°38,600'E	120	3.9	2 acquisitions/h	51338	15/10/2013	Acquisition en cours

Tableau 1 : Caractéristiques des bouées CANDHIS ancrées aux abords de la Corse.

3.2. DONNÉES ISSUES DE MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES

3.2.1. Niveaux d'eau « MARS_MED_BRGM »

Afin de disposer d'un jeu de données de niveaux d'eau au large (intégrant marée et surcote atmosphérique) avec une couverture spatiale et temporelle suffisamment longue et de pallier l'absence de données marégraphiques, des simulations rétrospectives ont été **générées par le BRGM spécifiquement pour cette étude**.

Le modèle numérique MARS-2DH (développé à IFREMER, Lazure et Dumas, 2008) a été employé car il permet de calculer l'hydrodynamique au niveau régional à partir des composantes harmoniques de marée (base de données FES2004 - LEGOS, Lyard, 2006) et de données météorologiques (CFSR, Saha *et al.*, 2010).

La base de données « MARS_MED_BRGM » ainsi créée couvre la période 1979 – 2009 (31 ans) avec une résolution spatiale de 2km et une résolution temporelle toutes les 10 min pour les sorties ponctuelles.

Les simulations des niveaux d'eau (en m) et des courants U et V (en m/s) ont été réalisées sur une grille de calcul de résolution 2 km (~0.02°).

Les composantes harmoniques de la base de données FES2004 sont utilisées afin de générer et d'imposer les conditions de marées sur les limites géographiques du modèle. Les effets météorologiques induits par le vent et la pression sont pris en compte en utilisant les champs de vent et de pression ré-analysés CFSR (Saha *et al.*, 2010).

Les sorties du modèle sont conservées à la fois sur une grille et comme des séries temporelles ponctuelles sur tout le pourtour Corse (cf. Figure 20).

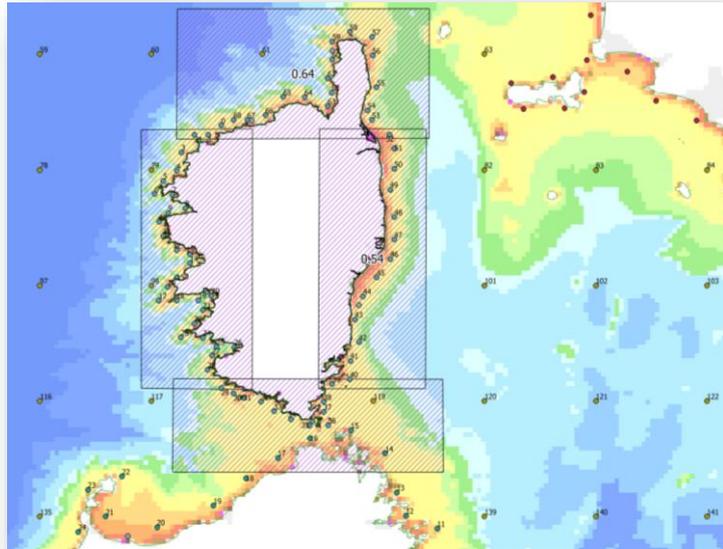


Figure 20 : Localisation des points d'extraction des niveaux d'eau au repos depuis la base de données MARS_MED_BRGM.

Afin de comparer les niveaux simulés avec les observations, les mesures des hauteurs d'eau du marégraphe d'Ajaccio ont été récupérées sur le portail du Shom (data.shom.fr). Elles sont disponibles au pas de temps horaire sur la période 1981-2017 (24 % lacunes).

La performance du modèle peut dès lors être évaluée en terme de niveau d'eau total. La Figure 21 présente les graphes quantiles-quantiles pour les niveaux totaux simulés et observés à Ajaccio. Pour les valeurs les plus fortes (au-delà de 60 cm), les données du modèle MARS_MED_BRGM sont inférieures d'une dizaine de cm aux observations au marégraphe. Cet écart s'explique probablement par l'enregistrement au marégraphe du port d'Ajaccio d'un niveau total qui intègre la contribution des surcotes liées au déferlement des vagues (*wave setup*), alors que celles-ci ne sont pas calculées par le modèle MARS-2DH.

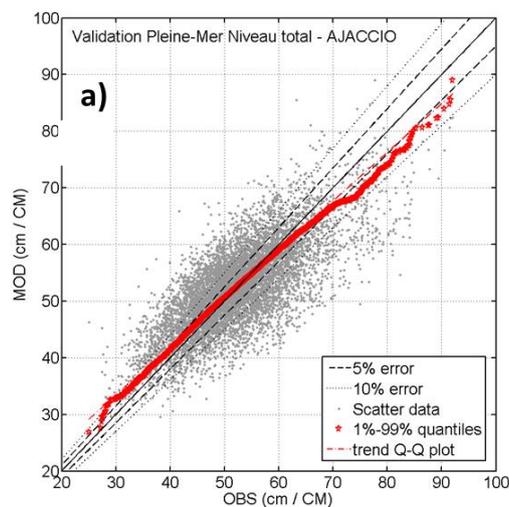


Figure 21: Diagramme quantile-quantile et nuage de points des enregistrements horaires des niveaux d'eau au marégraphe d'Ajaccio (OBS) et des valeurs obtenues par modélisation MARS_MED_BRGM (MOD).

3.2.2. Base de données NWW3 MED de la NOAA

La NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Agency) a généré une base de données d'états de mer sur 31 ans (1979-2009) à l'aide du modèle spectral de 3^{ème} génération WAVEWATCH III® incluant la paramétrisation d'Arduin *et al* (2010). Cette base est composée de 15 grilles régulières forcées par les vents haute résolution CFSR (Saha *et al.*, 2010). L'une de ces grilles couvre la Méditerranée (cf. Figure 22) et propose des sorties à résolution spatiale 10 minutes (i.e 1/6°) et temporelle toutes les 3 h.

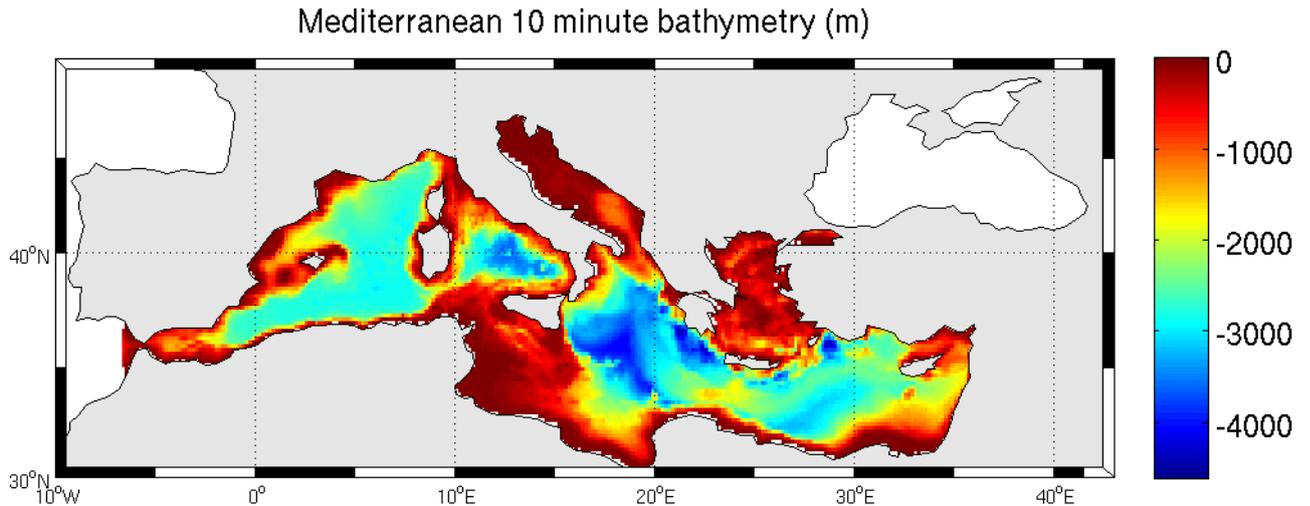


Figure 22 : Emprise et bathymétrie du modèle NWW3 de la NOAA.
Source : <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/nopp-phase2.php>

Une fois la grille récupérée sur le site de la NOAA, il est possible d'en extraire des séries temporelles aux points désirés : dans notre cas proche de la Corse (cf. Figure 23). Les données ainsi disponibles sont :

- les hauteurs significatives de vagues **Hs** exprimées en mètres (m) ;
- la période de pic **Tp** en secondes (s) ;
- la direction de pic des vagues **Dp** en degrés (°) ;
- la composante zonale **U** du vent utilisée pour forcer le modèle (m/s) ;
- la composante méridionale **V** du vent utilisée pour forcer le modèle (m/s).



Figure 23 : Grille des données de vagues et vents issues de la base NWW3 Med de la NOAA (ronds verts) et localisation des extractions ponctuelles correspondants aux points les plus proches des bouées CANDHIS ainsi qu’au point utilisé pour la zone d’étude au large de Lecci (étoiles oranges).

Seule la bouée Cap-Corse du réseau CANDHIS présente une période commune assez longue (1999 – 2008) avec la base de données NWW3 Méditerranée de la NOAA (BD NWW3 MED), une qualification de cette dernière a pu être effectuée uniquement dans ce secteur au nord de la Corse. Le point de la BD NWW3_MED disponible et traité pour l’analyse est relativement éloigné de la localisation de la bouée Cap-Corse mais il demeure le plus proche au sein du maillage du modèle de la BD NWW3 Med. Ce point est également considéré comme ayant une exposition équivalente aux vagues à celle de la bouée (y compris en régime de tempête).

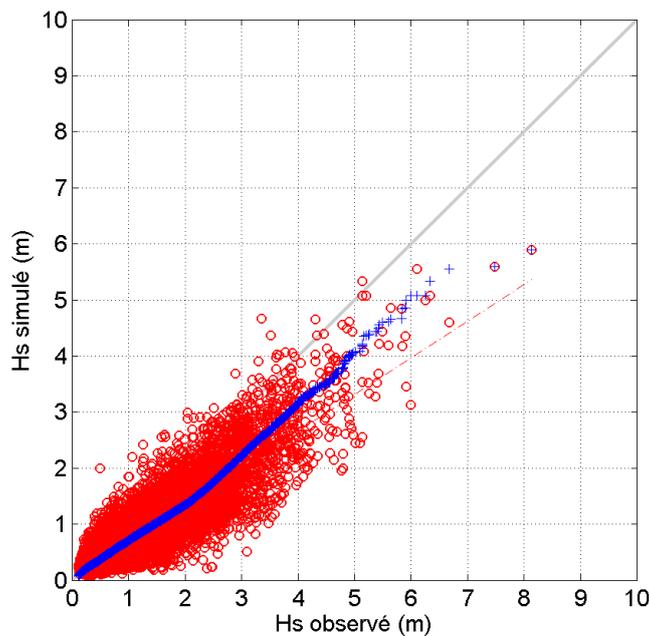


Figure 24 : Hs observés et Hs simulés de la base NWW3 MED à la bouée Cap Corse, période 1999-2008, en bleu la relation quantile-quantile.

	R ²	RMSE (m)	NRMSE	Biais (m)
Bouée Cap Corse, période 1999-2008				
Performance NWW3 MED 3h	0,79	0,53	0,48	-0,31

Tableau 2 : Performance des données NWW3 MED comparées aux observations à la bouée Cap Corse.

Les données NWW3 MED présentent de bonnes performances statistiques (Figure 25 et Tableau 2) lorsqu’elles sont confrontées aux observations (Cap Corse) mais elles sont caractérisées par un biais négatif. Une correction linéaire a donc été apportée aux données NWW3 MED. Cette correction est issue de la régression linéaire entre les observations et les données originales du modèle et s’exprime telle que :

$$NWW3\ MED\ corrigé = 1.21 * NWW3\ MED + 0.14 \quad (Eq. 1)$$

Cette correction réduit le biais et s’avère pertinente aussi bien pour les régimes de vagues moyens (Figure 25) que lors des tempêtes (Figure 25, Hs > 4 m). En effet, pour les valeurs les plus élevées, la réduction de l’erreur est de l’ordre du mètre.

Il existe d’autres atlas numériques de vagues disponibles en Méditerranée (de résolutions spatiale et temporelle différentes), tel l’Atlas Numérique d’États de Mer Océaniques et Côtier (ANEMOC). Une étude préliminaire de cet atlas montre une surestimation des fortes valeurs.

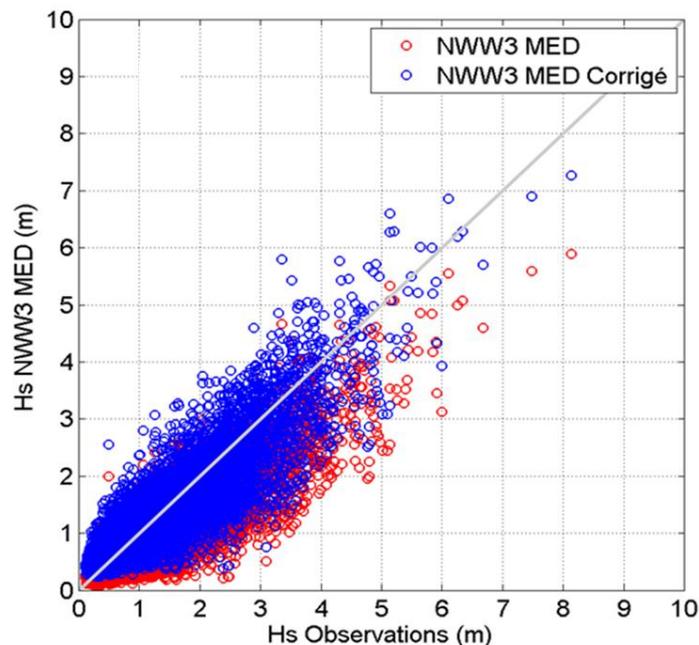


Figure 25 : Hs observés et Hs simulés à la bouée Cap Corse, période 1999-2008.

4. Données topographiques et bathymétriques – construction des Modèles Numériques de Terrain (MNT)

4.1. STRATÉGIE ET PROCESSUS GÉNÉRAL DE PRODUCTION DES MNT

4.1.1. Principes généraux

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.

Pour un usage destiné à la modélisation hydrodynamique, 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 mise en œuvre ici 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.

4.1.2. Caractéristiques et contraintes techniques

Dans cette étude, les spécifications des MNT nécessaires aux tâches de modélisation ont été définies à partir d'une fiche de 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 MNT produits ici correspondent à des grilles continues terre-mer, soit des MNT topo-bathymétriques. Leurs emprises englobent la bande littorale et s'étend de part et d'autre du trait de côte, sur terre comme en mer, couvrant tout ou partie du plateau continental. L'emprise spatiale de chaque MNT est définie de façon à répondre au mieux aux besoins de la modélisation.

Les principales contraintes techniques concernent :

- la construction de grilles 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 grilles produites, pour que les profondeurs soient cohérentes d'un niveau à l'autre.

4.1.3. Emprises et résolution des grilles

Les MNT se déclinent ici suivant deux gammes (Figure 26) :

- **une grille MNT à grande emprise « SWAN » à la résolution de 50 m**, de Solenzara au sud du Golfe de Sant’Amanza ;
- **trois grilles MNT locales à la résolution de 10 m**, sur les secteurs des golfes de **Porto-Vecchio**, **Santa Giulia** et **Sant’Amanza**.

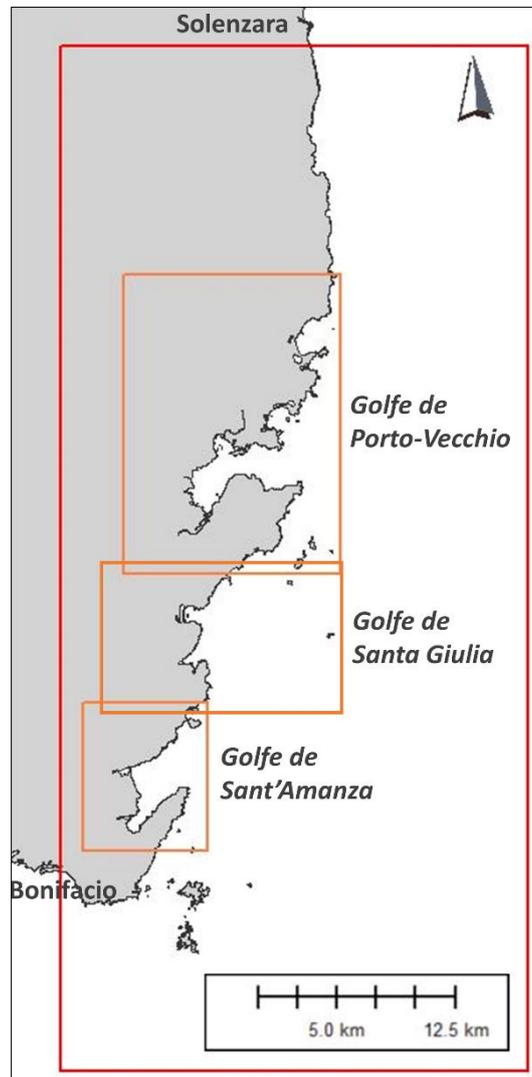


Figure 26 : Extension finale des grilles MNT sur la zone de travail.

L'extraction des données nécessaires à la production des grilles a été réalisée sur une emprise plus étendue que la grille à grande emprise (SWAN). L'interpolation de chaque grille 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).

4.2. DONNEES EXPLOITÉES

4.2.1. Bathymétrie

- **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 27). 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 terme de technique d’acquisition.

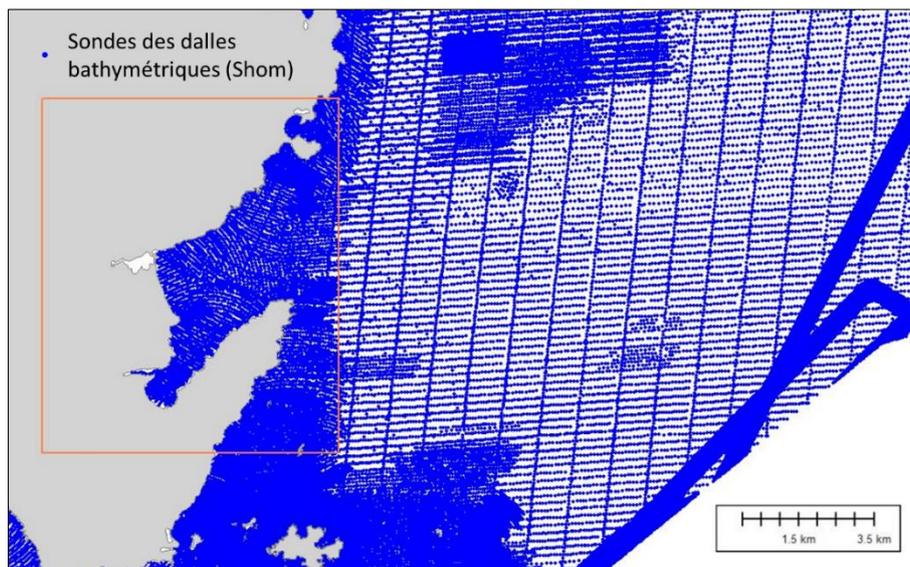


Figure 27 : Exemple de semis de sondes extraits des dalles bathymétriques du Shom aux abords du golfe de Sant’Amanza.

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 WGS84¹⁵. Chaque sonde fournie dans les dalles est également identifiée par le numéro de levé et de lot hydrographique auquel elle appartient (par exemple S198802700-27.ascii ; soit un format SAAAA****-lot.ascii, où S signifie Shom, et AAAA correspond à l’année du levé), une information utile lors de la déconfliction des données à interpoler.

¹⁵ Spécifications techniques externes des dalles bathymétriques du Shom : https://diffusion.shom.fr/media/wysiwyg/pdf/specs_externes_dalles_bathymetriques_2015_1.pdf

- **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 3 000 m de profondeur (Figure 28). 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.

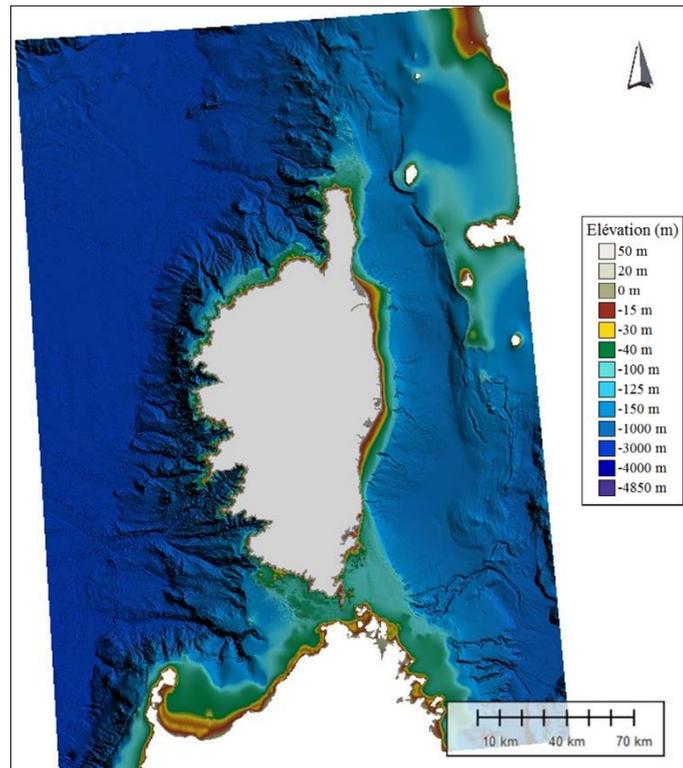


Figure 28 : Produit MNT Bathymétrique de façade de la Corse à 100 m (Shom, 2015). Ici dans le système géodésique légal français RGF93, avec pour système de coordonnées projetées le Lambert-93.

Les sources des données exploitées dans ce MNT sont indiquées dans le fichier de métadonnées associé. Ce produit est rendu disponible selon deux références verticales : niveau moyen (NM) et niveau des plus basses mers astronomiques (PBMA). Quatre formats sont proposés : asc, glz, bag, grd. Les positions des nœuds de la grille bathymétrique sont fournies en positions géographiques, rapportées au système WGS84¹⁶.

4.2.2. Topographie

La 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 29). Les dalles de la version V1 du RGE ALTI® 1 m pour la Corse, acquises par le BRGM, ont été ici exploitées.

¹⁶ 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

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.

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.

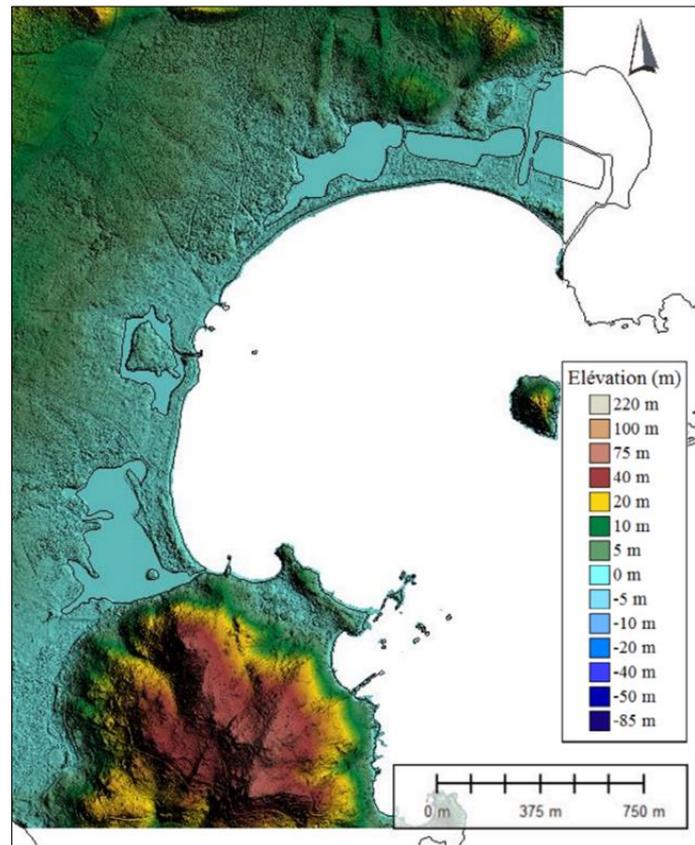


Figure 29 : Extrait du produit RGE ALTI® 1 m Corse (IGN).

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.

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 30).

4.2.3. Diagramme des sources

La couverture des différences sources de données disponibles au sud-est de la Corse, du Sud de Solenzara à Bonifacio, est représentée dans la Figure 30.

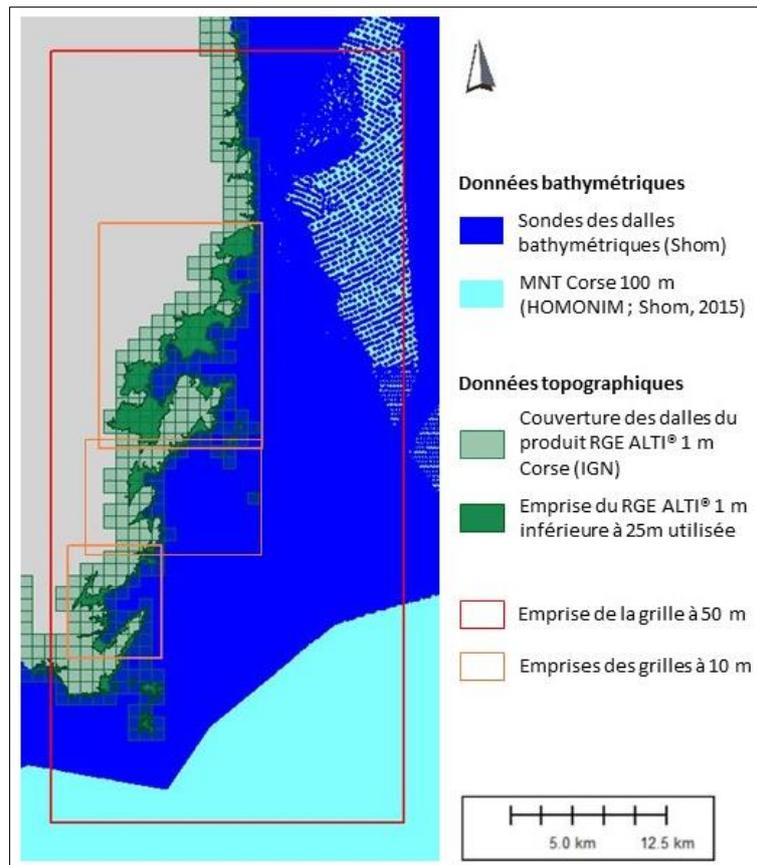


Figure 30 : Sources de données topo-bathymétriques disponibles sur l’emprise des MNT.

4.3. TRAITEMENTS EFFECTUÉS

4.3.1. 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).

4.3.2. Gestion des références verticales, conversions altimétriques

Les différents lots de données sources sont calés, suivant leur origine, par rapport aux références verticales en vigueur en terme 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 (Tableau 1). 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, Bathyelli) et l’IGN (grille RAC09 disponible à partir de Circé_France_Batch_4.2).

Nom	PHMA (m /ZH)	NM (m /ZH)	PBMA (m /ZH)	ZH/Elli	ZH/Ref	Ref
Solenzara	0.80	0.53	0.24	47.02	-0.479	IGN78
Porto-Vecchio	0.74	0.47	0.18	47.55	-0.385	IGN78
Bonifacio	0.54	0.35	0.16	47.09	-0.362	IGN78

Tableau 1 : Références altimétriques maritimes pour les sites de la zone considérée.
ZH/Ref correspond à la cote du zéro hydrographique dans le système altimétrique légal français (métropolitain pour le NGF), soit l’IGN78 pour la Corse.

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 GNSS¹⁷, par exemple. Ainsi, l’ensemble des sondes issues des dalles bathymétriques a été recalé à l’ellipsoïde à partir de surfaces de conversion adaptées. Les données bathymétriques initialement référencées par rapport au ZH ont été recalées à l’ellipsoïde (Eli) à l’aide du modèle surfacique Bathyelli 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 GMT¹⁸. 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.

4.3.3. 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).

4.3.4. 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

¹⁷ *Global Navigation Satellite System* : système de positionnement et de datation par satellites.

¹⁸ *Generic Mapping Tools* : logiciel de création de cartes géologiques et géographiques.

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), les valeurs de plan d’eau du RGE ALTI® sont exclues. En revanche, en l’absence de données bathymétriques, ces données sont conservées.

4.3.5. 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 (cf. section suivante).

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, une portion du MNT bathymétrique de la Corse à 100 m (Shom, 2015) a été découpée, convertie en points, et insérée dans le nuage de points destiné à l’interpolation (Figure 31). Une zone tampon a été 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.

4.3.6. 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 31). 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.

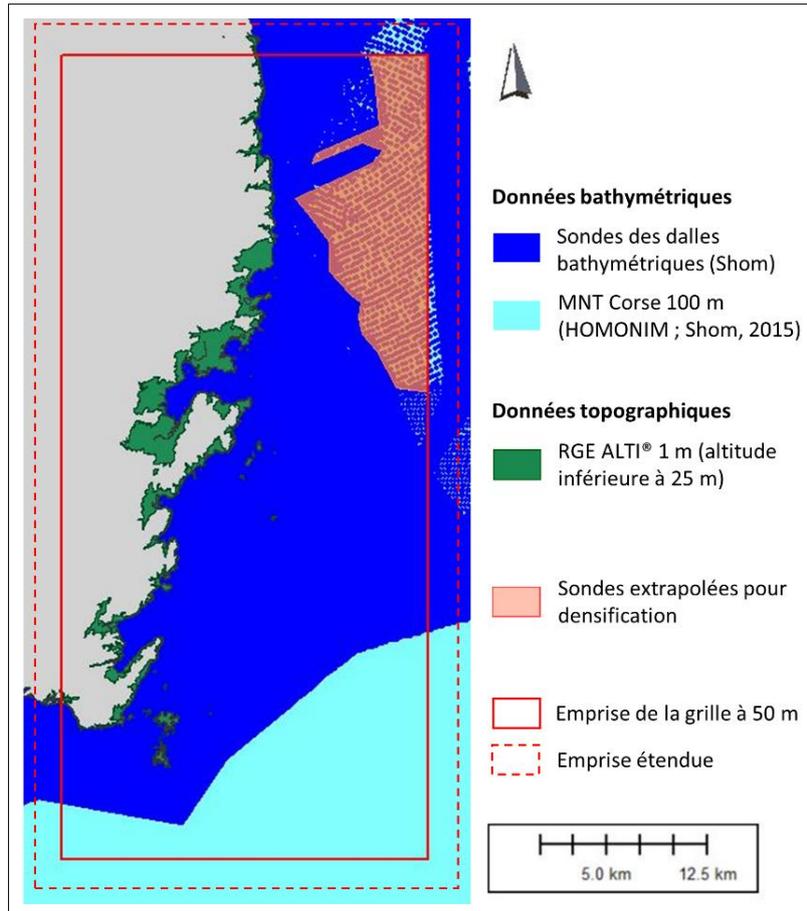


Figure 31 : Localisation des sources de données topo-bathymétriques exploitées.

L'interpolation a été réalisée en prenant en compte les limites étendues (Figure 31), afin d'assurer une représentation correcte et cohérente de la bathymétrie aux bordures du domaine. De plus, afin de permettre une bonne cohérence à la jonction entre les grilles réalisées à 10 m de résolution et la grille de grande emprise à 50 m, les travaux réalisés à plus haute résolution (déconfliction notamment) ont été conservés et intégrés dans la grille 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 la faible densité de sondes bathymétriques (densité hétérogène du nuage de points considéré, mais parfois inférieure à la résolution d'interpolation souhaitée) a nécessité une densification des sondes. Les sondes ont alors été 1) interpolées à une faible résolution (avec un paramètre de tension significatif), puis 2) ré-échantillonnées à la résolution souhaitée, avant d'être 3) réinjectées dans le nuage de points final pour contraindre l'interpolation (Figure 31).

4.4. CARACTERISTIQUES DES MODÈLES NUMERIQUES DE TERRAIN

Les grilles finales correspondent à des MNT topo-bathymétriques, continus terre-mer, dont l'emprise s'étend sur la bande littorale (de part et d'autre du trait de côte) jusqu'au large, et couvre partiellement le plateau continental (Figure 32).

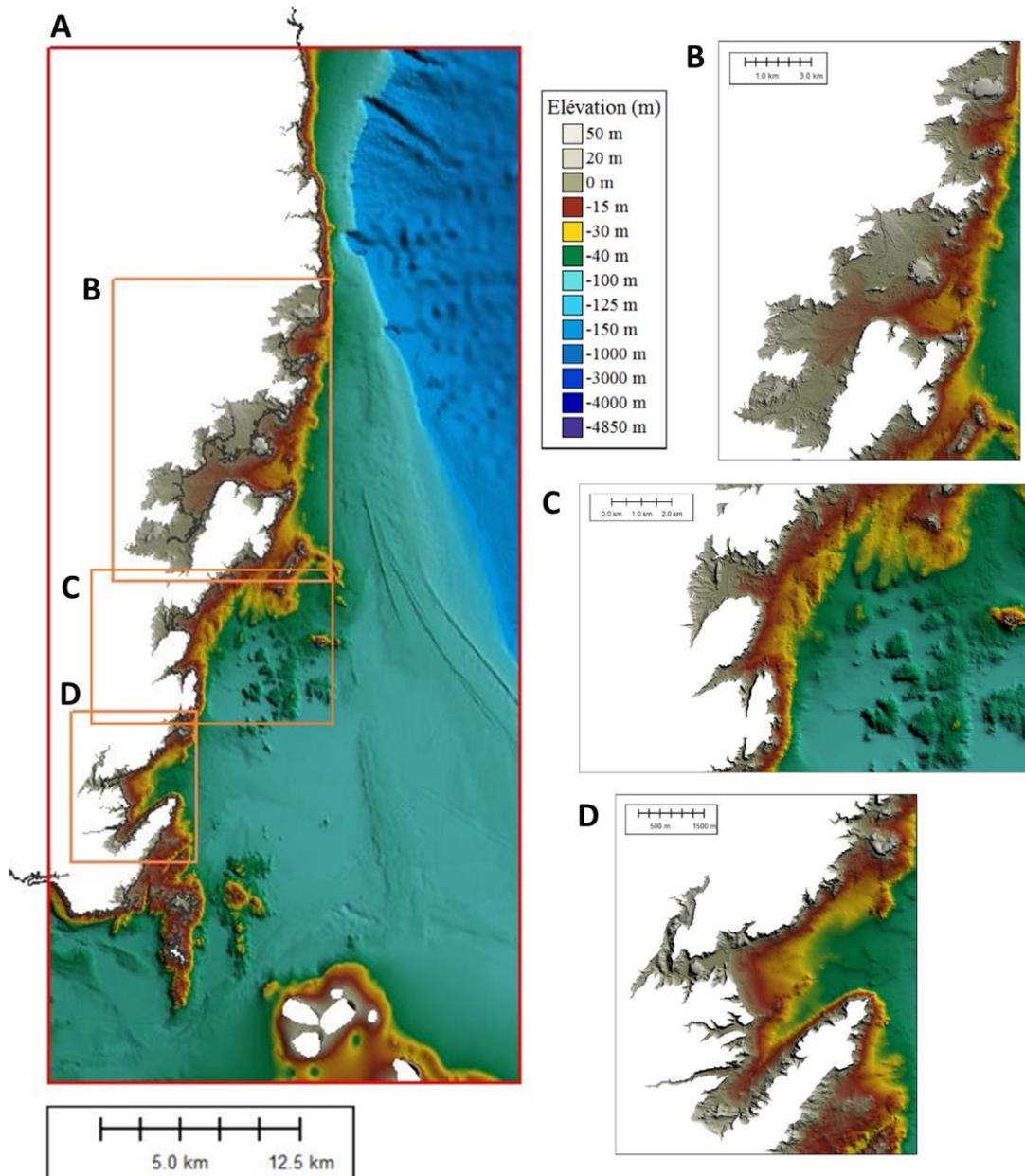


Figure 32 : MNT topo-bathymétriques (A) à grande emprise (à la résolution de 50 m), et sur les secteurs de (B) Porto-Vecchio, (C) Santa Giulia et (D) Sant’Amanza (à la résolution de 10 m).

La grille grande emprise à 50 m de résolution s’étend, en mer, jusqu’à 695 m de profondeur. Les deux grilles côtières à 10 m s’étendent jusqu’à près de 70 m de profondeur, pour les secteurs de Porto-Vecchio, Santa Giulia et Sant’Amanza.

Chaque 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, les produits sont fournis dans un format d’encodage «.grd » *Golden Software Surfer* (float format 6 ou 7), lisible par la plupart des logiciels SIG ou de modélisation.

Les caractéristiques des grilles produites sont les suivantes :

<p>Grande emprise (SWAN) / 50 m</p> <p>x_min: 1216595 x_max: 1246095 x_inc: 50 name: x nx: 591 y_min: 6039020 y_max: 6104320 y_inc: 50 name: y ny: 1307</p>
<p>Port-Vecchio (10 m)</p> <p>x_min: 1220600 x_max: 1234280 x_inc: 10 name: x nx: 1369 y_min: 6070700 y_max: 6089800 y_inc: 10 name: y ny: 1911</p>
<p>Santa Giulia (10 m)</p> <p>x_min: 1222720 x_max: 1234320 x_inc: 10 name: x nx: 1161 y_min: 6061800 y_max: 6071380 y_inc: 10 name: y ny: 959</p>
<p>Sant'Amanza (10 m)</p> <p>x_min: 1218000 x_max: 1225860 x_inc: 10 name: x nx: 787 y_min: 6053000 y_max: 6062500 y_inc: 10 name: y ny: 951</p>

5. Évènements de référence météo-marins « actuel » et « 2100 » au large

5.1. PRINCIPES DE LA MÉTHODOLOGIE DES PROBABILITÉS CONJOINTES

Conformément à l’Atlas des Zones Submersibles de Corse (AZS, 2014), la DDTM de Corse-du-Sud a souhaité réactualiser cette cartographie des ZBPESM pour un évènement de référence météo-marin dont la période de retour est centennale (ou pour un évènement historique s’il est supérieur). C’est pourquoi, la méthode mise en œuvre pour déterminer l’évènement de référence s’appuie sur les consignes ministérielles (guide méthodologique du MEDDE de mai 2014).

Une submersion 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. Par ailleurs, l’étude plus poussée des phénomènes (chapitre 2) nous amène non seulement à considérer les vagues et les niveaux d’eau, mais également le vent comme un agent participant à la génération des niveaux marins extrêmes. Dans ce but, l’analyse repose sur une approche statistique multivariée des extrêmes (Heffernan et Tawn 2004) que le BRGM a appliqué sur plusieurs sites, notamment en Méditerranée (Nicolae Lerma *et al.*, 2018).

Cette approche est utilisée pour déterminer la probabilité que les trois conditions H_s (hauteur significative des vagues), SWL (niveau d’eau au repos au large incluant la marée et la surcote atmosphérique, cf. paragraphe 1.2.1) et U (vitesse du vent) dépassent conjointement des valeurs spécifiées. Nous déterminons ainsi un ensemble de triplets de valeurs (H_s ; SWL ; U) associées à une période de retour (ici 100 ans). A chacune de ces combinaisons, une valeur de période de pic T_p est calculée à partir de la relation entre H_s avec la cambrure des vagues S_i . Le choix a été fait de prendre la médiane des valeurs simulées de T_p avec JOIN-SEA pour chacune des hauteurs H_s . Concernant la direction pic D_p des vagues ainsi que la direction du vent D_u , une valeur unique a été évaluée pour chaque combinaison (H_s ; SWL ; U) : ces deux aspects sont discutés plus en détails dans la suite.

Les paragraphes donnent les détails des étapes de l’analyse :

- i. **préparation du jeu de données** : il s’agit de constituer un échantillon avec un grand nombre de triplets (H_s ; SWL ; U) indépendants ;
- ii. **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*) ;
- iii. **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 ;
- iv. **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 ;
- v. **analyse des extrêmes qui permet de déterminer des triplets (H_s ; SWL ; U)** d’iso-période de retour de dépassement conjoint de 100 ans.

Sur cette base, plusieurs combinaisons centennales (H_s , SWL , T_p , D_p , U , D_u) représentatives seront définies comme conditions au large des modèles hydrodynamiques et seront propagées vers le rivage permettant ainsi de calculer les niveaux marins totaux en intégrant les processus locaux liés à l’effet des vagues et à la géomorphologie. Cette approche est détaillée dans le chapitre 6.

5.2. PRÉPARATION DU JEU DE DONNÉES DE VAGUES, NIVEAUX D’EAU ET VENT

Les points d’extraction des données météo-marines sont localisés sur la Figure 33. Les séries temporelles de ces données sont présentées Figure 34 et décrites dans les paragraphes ci-dessous.

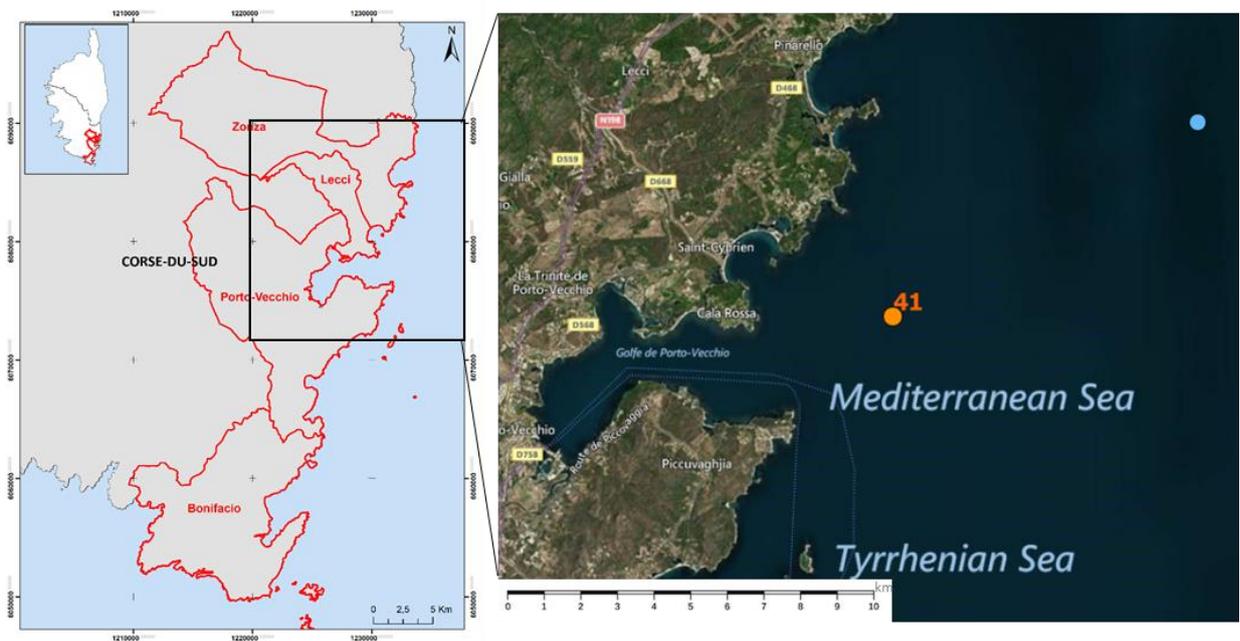


Figure 33 : Localisation des points d’extraction des données vagues NWW3 MED (point bleu) et niveaux d’eau MARS (point 41 en orange).

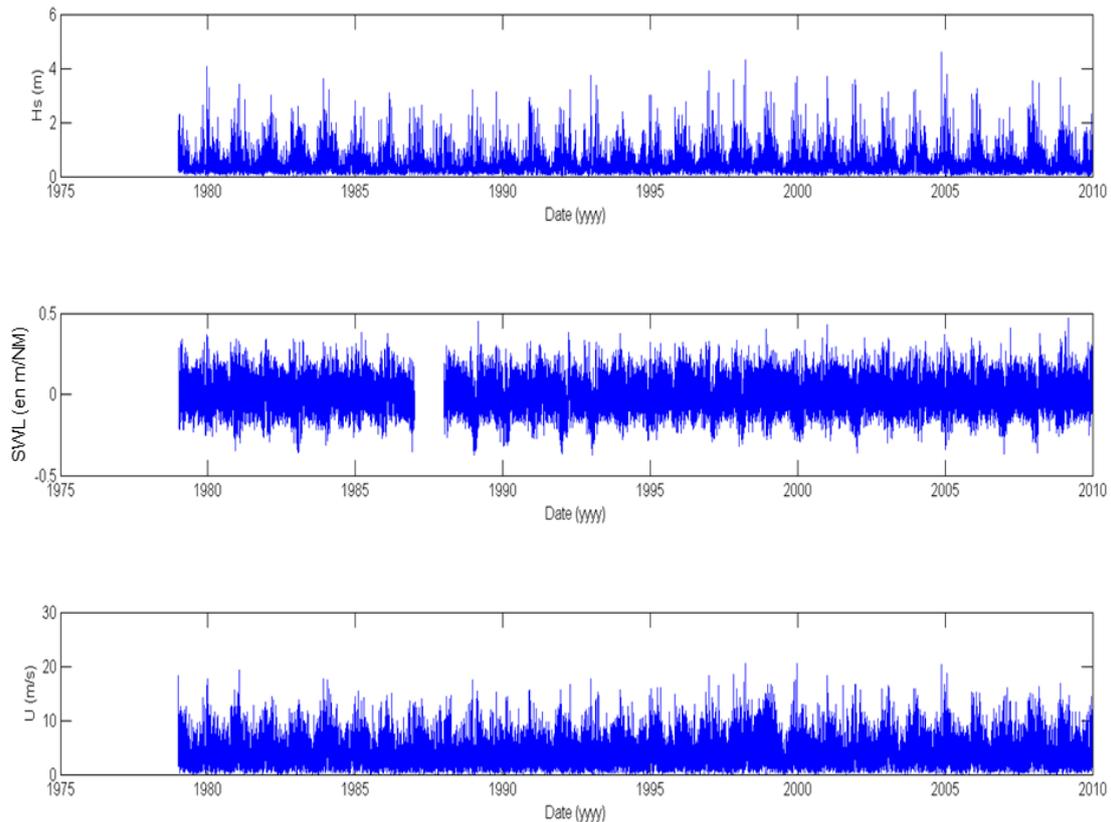


Figure 34 : Séries temporelles des conditions météo-marines utilisées pour l’analyse.

Haut : Hauteur significative des vagues (H_s en m, non corrigée) au point 9.5_41.667 de la base données NWW3 MED ;

Milieu : Niveaux d’eau (SWL en m/NM) au point d’extraction P41 de la base de données MARS_MED_BRGM ;

Bas : Vitesse des vents (U en m/s), au point 9.5_41.667 de la base de données NWW3 MED.

5.2.1. Niveaux d’eau *SWL*

La série temporelle de niveaux d’eau utilisée est issue des simulations rétrospectives MARS_MED_BRGM (simulation « hindcast », cf. paragraphe 3.2.1) 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 ne seront pas exploitées.

La période couverte est donc de ~30 ans (Figure 34).

5.2.2. Caractéristiques des vagues

Les données de vague sont issues de la base de données NWW3 MED (cf. paragraphe 3.2.2). Le point d’extraction a été choisi de telle sorte qu’il soit à la fois proche du point d’analyse des niveaux d’eau (point P41 : 41.6000°N- 9.5000°E, Figure 33) et de la zone d’intérêt. La série temporelle couvre 31 ans (période 1979-2009) au pas de temps tri-horaire (Figure 34, haut).

Une analyse préliminaire de comparaison aux données des bouées existantes montre de bonnes performances statistiques lorsque les données simulées sont confrontées aux

observations (Cap Corse) mais elles sont caractérisées par un biais négatif (cf. § 3.2.2), corrigé en appliquant une correction linéaire aux données NWW3 MED. Pour rappel, cette correction est issue de la régression linéaire entre les observations et les données originales du modèle et s’exprime telle que:

$$NWW3\ MED\ corrigé = 1.21 * NWW3\ MED + 0.14 \quad (Eq.1)$$

L’analyse des données brutes indique trois directions privilégiées de provenance des vagues : le nord-est, le sud/sud-est et sud-ouest (Rose des vagues de la Figure 35). Les secteurs nord-nord-est et sud-est sont ceux générant les hauteurs de vague significatives les plus élevées, i.e. >3m (cf. pointillés noirs). Ces deux secteurs sont les plus critiques au regard de la situation du site d’étude, i.e. à l’ouest du point d’analyse des vagues. Seules les vagues en provenance de ces secteurs nord-nord-est et sud-est sont susceptibles de générer de fortes houles sur le secteur.

Seules les données omnidirectionnelles sont exploitées car seules les directions des deux secteurs susmentionnés participent à la génération de valeurs extrêmes (pour un seuil supérieur à celui du troisième secteur ouest/sud-ouest).

Le diagramme bivarié de la Figure 35 illustre la relation très dispersée et hétérogène (hétéroscedastique) entre Hs et Tp : plus les Hs sont élevées, moins la dispersion des périodes pics est grande.

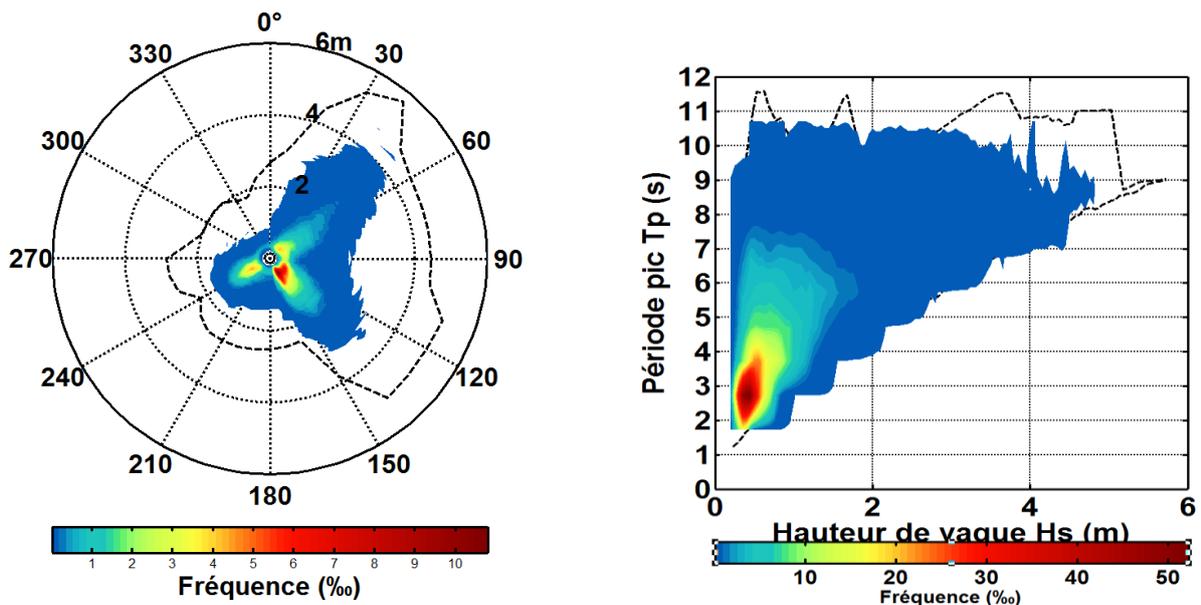


Figure 35 : Rose des vagues NWW3 MED à gauche ;
Diagramme bivarié (Tp,Hs) des vagues NWW3 MED à droite.

À gauche sur la rose des vagues, la valeur de Hs se lit sur l’axe radial. L’enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d’occurrence des couples (Hs, Dp) est représentée par l’échelle de couleur (min = 0,02 ‰) avec une discrétisation de 10° pour Dp et 5 cm pour Hs. Dp est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vagues).

5.2.3. Caractéristiques des vents

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 34 bas). L’analyse des données brutes indique trois directions privilégiées nord – nord-est, sud-est et ouest (Figure 36). Les secteurs nord – nord-est (30°N) et ouest portent les valeurs les plus fortes de vent (trait pointillé).

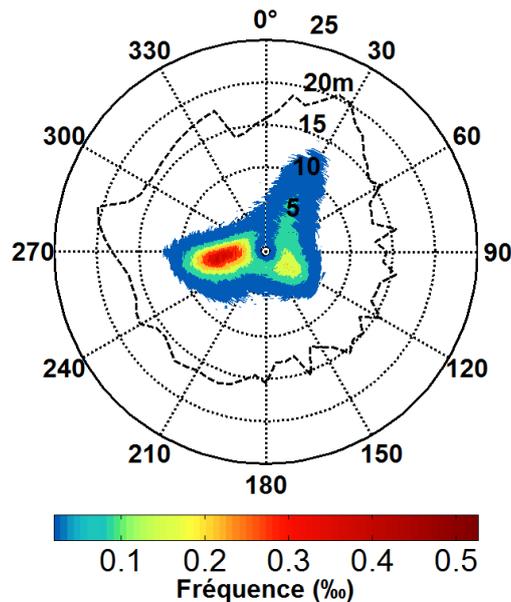


Figure 36 : Rose des vents NWW3 MED.

La valeur de la vitesse des vents U se lit sur l'axe radial. L'enveloppe des points de la série temporelle est représentée par la ligne noire en pointillés. La fréquence d'occurrence des couples (U, Du) est représentée par l'échelle de couleur (min = 0,02 ‰) avec une discrétisation de 5° pour Du et 5 cm pour Hs . Du est en convention nautique (i.e. indique la provenance des vents).

5.2.4. Sélection des combinaisons pour l'analyse

La préparation du jeu de données est finalisée par la sélection des événements (Hs ; SWL ; U) indépendants.

Le choix a été fait de sélectionner les valeurs maximales de Hs par bloc de 3 jours avec une durée de séparation minimale de 1,5 jours entre chaque pic pour assurer leur indépendance (Nicolae-Lerma *et al.*, 2018).

Puis, pour chaque valeur de pic de Hs , le maximum de SWL et de U est recherché dans une fenêtre de 12 heures centrée sur le pic de Hs . A chaque valeur de Hs sont associées la période pic Tp et la direction pic Dp correspondantes. A chaque valeur de U est associée une direction Du .

Un nombre de combinaisons (Hs ; Tp ; Dp ; SWL ; U ; Du) correspondant à 30 ans environ de données communes avec en moyenne ~ 106 événements/an est ainsi sélectionné.

5.3. AJUSTEMENT DES DISTRIBUTIONS DE PROBABILITÉS MARGINALES (GPD) POUR Hs , SWL ET U

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 des 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 MLE. L’incertitude associée à l’ajustement est prise en compte et est traduite sous la forme d’un intervalle de confiance (à 95 %) estimée par méthode bootstrap (Efron, 1992).

5.3.1. Niveaux d’eau

L’analyse des extrêmes est directement réalisée sur le signal de niveaux d’eau total (incluant marée et surcote). La distribution marginale de probabilité associée à SWL a été ajustée avec la méthode des moments MLE au-dessus d’un seuil de 0,28 m, ce qui correspond à ~2 évènements extrêmes par an (Figure 37).

La valeur centennale de SWL est 0,41m [0,39 ; 0,42 m – intervalle de confiance à 70 %].

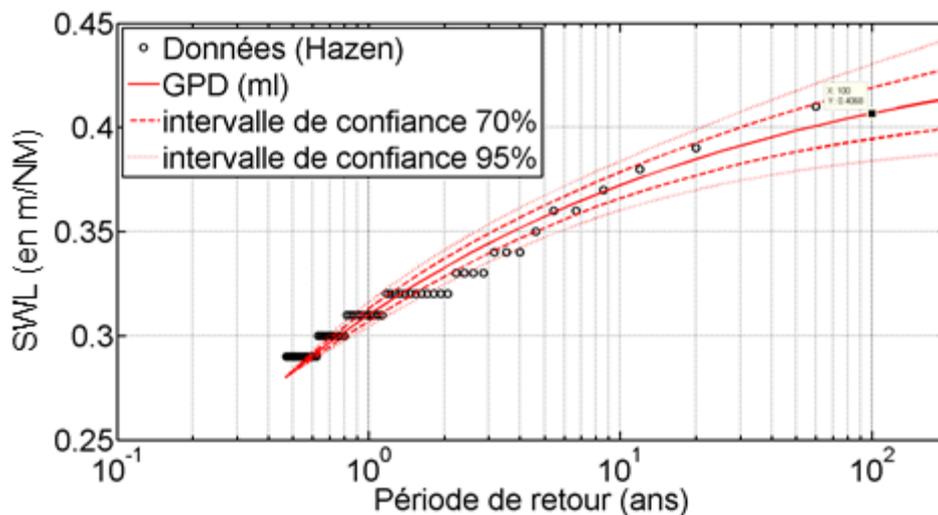


Figure 37 : Distribution marginale pour le niveau d’eau (SWL) - point d’extraction P41.

5.3.2. Hauteur significative de vagues

La distribution marginale de probabilité associée à H_s est ajustée avec la méthode MLE au-dessus d’un seuil de 3,32 m, ce qui correspond à ~2 évènements extrêmes par an (Figure 38). Nous donnons sur ce graphique les observations ainsi que l’ajustement le meilleur de la GPD (trait rouge plein) et les intervalles de confiance correspondants (pour le degré de confiance 70 et 95 %).

La valeur de la direction pic est issue des observations dont celles supérieures au seuil de 3,32 m (i.e. les extrêmes) sont toutes associées aux deux secteurs identifiés nord-nord-est et sud-est (Figure 35).

La valeur centennale de H_s est 5,64 m [5,46 ; 5,83 m – intervalle de confiance à 70 %].

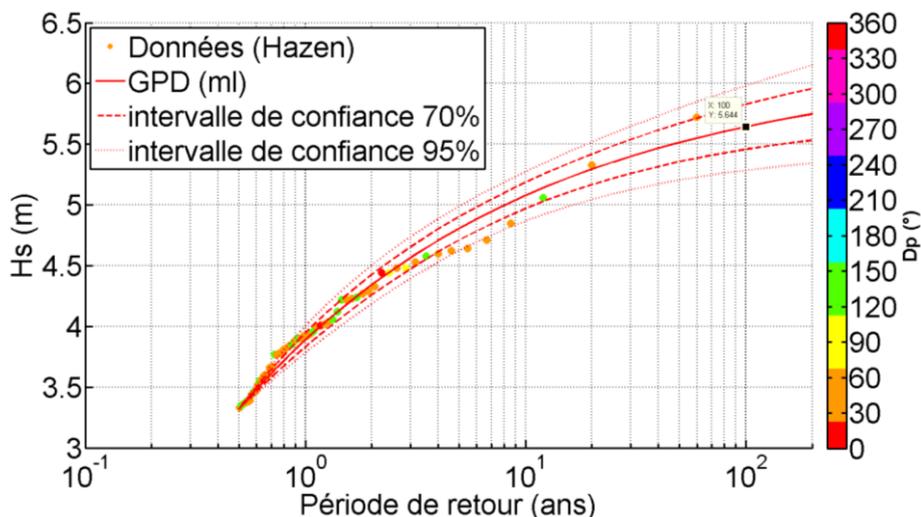


Figure 38 : Distribution marginale pour la hauteur significative des vagues (H_s).
Les couleurs donnent les valeurs des D_p (°).

5.3.3. Vitesse des vents

La distribution marginale de probabilité associée à U est ajustée avec la méthode MOM au-dessus d’un seuil de 14,84 m/s, ce qui correspond à ~2 évènements extrêmes par an (Figure 39). Nous donnons sur ce graphique les observations ainsi que l’ajustement le meilleur de la GPD (trait rouge plein) et les intervalles de confiance correspondants (pour le degré de confiance 70 et 95 %).

La valeur centennale de U est 21,3 m/s [20,5 - 22,1 m/s - intervalle de confiance à 70 %].

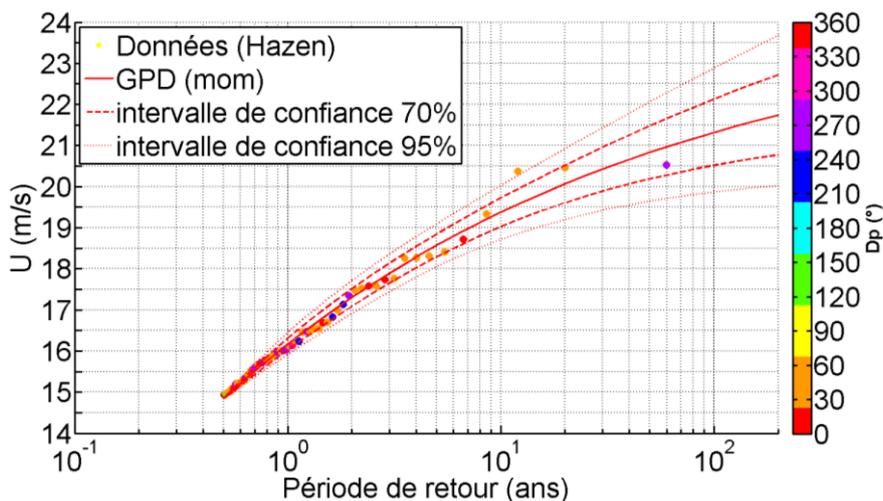


Figure 39 : Distribution marginale pour la vitesse du vent (U).
Les couleurs donnent les valeurs des directions du vent D_u (°).

5.4. ANALYSE TRI-VARIÉE DES EXTRÊMES

La relation de dépendance entre les extrêmes de H_s , SWL et U a été représentée par la méthode semi-paramétrique décrite par Heffernan et Tawn (2004) au-delà d’un certain seuil. Exprimé en probabilité de non dépassement, ce seuil est fixé à 0,95 pour chaque variable et a été établi à partir des diagnostics décrits par Heffernan et Tawn (2004). Une fois les paramètres de la relation estimés, une période fictive statistique de 10 000 ans a été simulée par une méthode Monte Carlo (Figure 40).

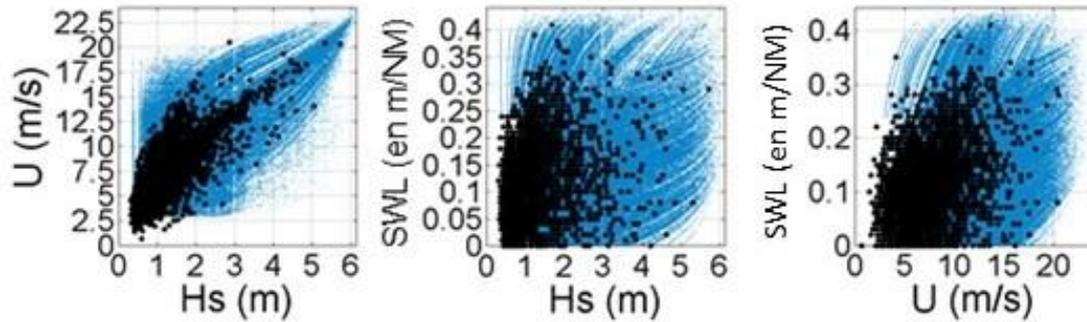


Figure 40 : Combinaisons (Hs ; SWL ; U) observées (points noirs) et ceux simulés (points bleus) par méthode Monte-Carlo à l’aide des lois marginales et des lois de dépendances.

Les résultats sont présentés sous la forme d’iso-contours d’iso-période de retour de dépassement conjoint (Hawkes *et al.*, 2002). Ce sont des courbes 3D (x,y,z) dans l’espace des trois variables (Hs ; U ; SWL) où chaque point de la courbe a la même probabilité de dépassement conjoint :

$$P(Hs > x, U > y, SWL > z) = 1/\lambda T \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec λ le nombre moyen d’évènements par an (dans notre cas $\lambda = 106$) et T la période de retour considérée en années.

La Figure 41 donne la courbe 3D correspondante à la période de retour de dépassement conjoint centennale.

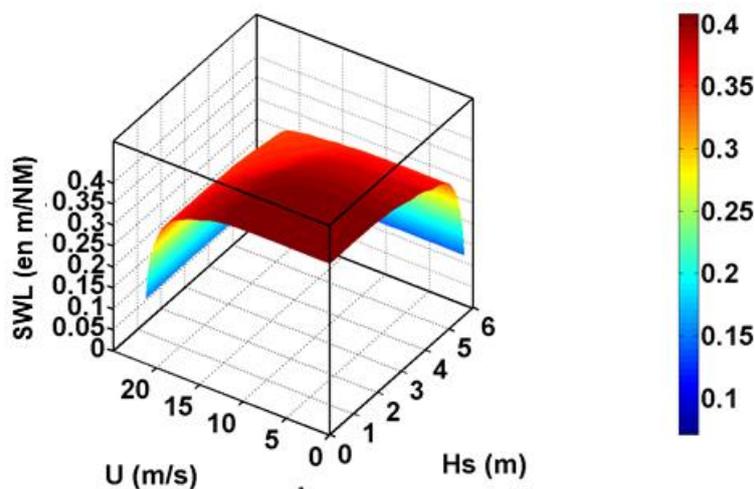


Figure 41 : Courbe 3D correspondante à la période de retour de dépassement conjoint centennale ; les couleurs correspondent aux valeurs de niveau marin SWL (m/NM).

Pour faciliter l’analyse, la Figure 41 peut être également représentée en 2D (Figure 42).

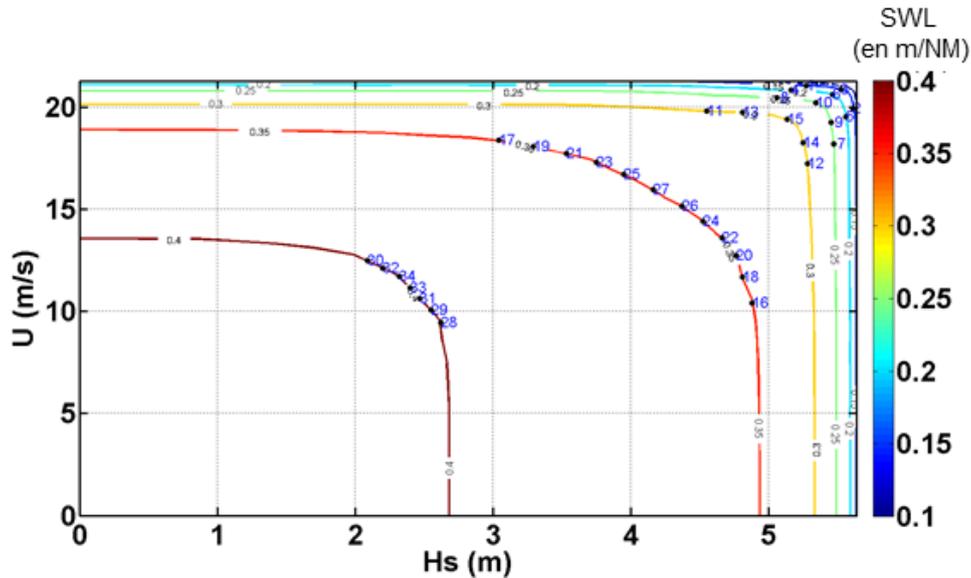


Figure 42 : Représentation 2D de l'iso-contour d'iso-période de retour de dépassement conjoint centennale (voir représentation en 3D sur l'Figure 41). Les valeurs sur les courbes sont les valeurs de niveau marin SWL. Les points bleus représentent les combinaisons prises en entrée des simulateurs numériques (34).

À partir de la Figure 41, des combinaisons ($H_s ; U ; SWL$) de période de retour de dépassement conjoint centennale peuvent être identifiées. Au sein de la courbure maximale des iso-contours d'iso-période de retour de dépassement conjoint, ce sont une trentaine de combinaisons qui ont été considérées représentatives et sélectionnées (34 dans le cas présent). Notons que le choix des valeurs de période des vagues T_p est détaillé dans la section suivante. Ces combinaisons seront utilisées comme entrées des simulations numériques.

5.5. ANALYSE DES CO-VARIABLES

5.5.1. Période T_p

La période des vagues a été simulée en suivant l'approche décrite par Gouldby et al. (2014) : Sect. 3.2 adapté de Hawkes et al. (2002). Cette approche se focalise sur la cambrure S_t définie à partir de H_s comme suit :

$$S_t = \frac{2\pi H_s}{gT_p^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

A partir des observations, un modèle de régression polynomial dit « hétéroscédastique » a été construit de sorte que la moyenne et la variance des erreurs d'ajustement soient conditionnelles à la valeur de H_s . Ce modèle a alors été utilisé pour simuler les cambrures (et ainsi les périodes T_p) à partir des simulations Monte-Carlo de H_s (points cyan sur la Figure 43).

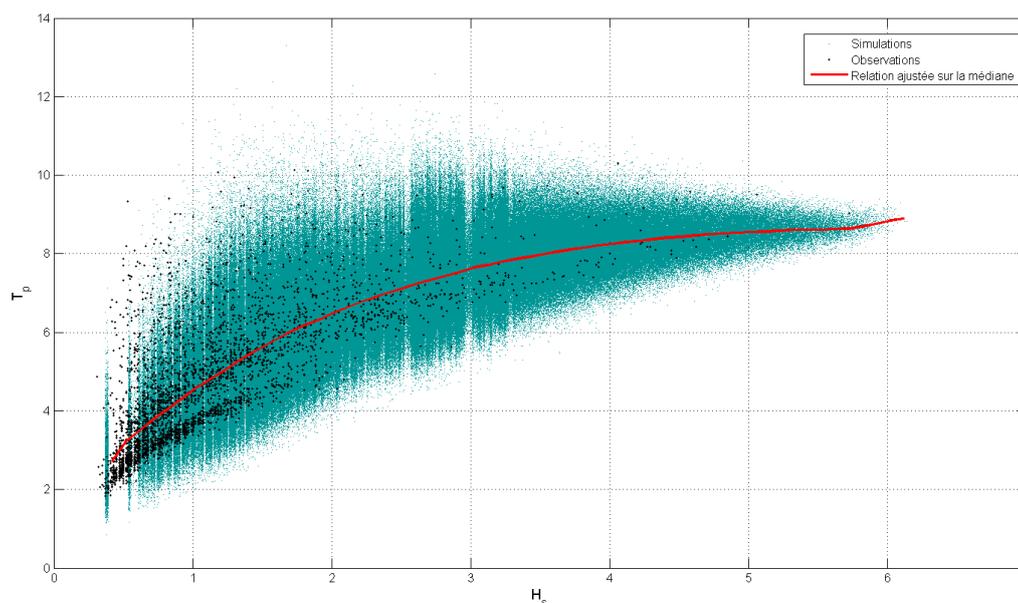


Figure 43 : Relation entre T_p et H_s : observations (points noirs), résultats de la simulation Monte-Carlo (points cyans), modèle de régression ajusté sur la médiane des simulations.

Afin de faciliter la sélection des combinaisons en entrée des simulateurs numériques, le choix a été fait de prendre la médiane des périodes simulées pour chacune des hauteurs significatives considérées (courbe rouge sur la Figure 43).

5.5.2. Directions

Les directions D_p et D_u ont été choisies à partir des analyses des sections 5.3.2 et 5.3.3 ainsi qu'en fonction de la configuration du site. Elles correspondent aux valeurs les plus pénalisantes en terme d'effet à la côte, à savoir une direction $30^\circ N$ pour les vagues et $60^\circ N$ pour le vent.

5.6. SYNTHÈSE DES ÉVÈNEMENTS DE RÉFÉRENCE

5.6.1. Combinaisons centennales vagues, niveaux d'eau et vent retenues

Numéro	Hs (m)	Tp (s)	U (m/s)	SWL (m/NM)
1	5.27	8.6	21.07	0.15
2	5.61	8.62	19.95	0.15
3	5.52	8.61	20.87	0.15
4	5.16	8.57	20.84	0.2
5	5.56	8.62	19.55	0.2
6	5.46	8.61	20.63	0.2
7	5.47	8.61	18.21	0.25
8	5.06	8.56	20.47	0.25
9	5.45	8.61	19.27	0.25
10	5.34	8.61	20.24	0.25
11	4.55	8.44	19.83	0.3
12	5.28	8.6	17.23	0.3
13	4.81	8.52	19.76	0.3
14	5.25	8.59	18.26	0.3
15	5.13	8.57	19.41	0.3
16	4.88	8.53	10.43	0.35
17	3.04	7.66	18.38	0.35
18	4.81	8.52	11.69	0.35
19	3.29	7.84	18.09	0.35
20	4.76	8.5	12.75	0.35
21	3.53	7.99	17.73	0.35
22	4.66	8.48	13.62	0.35
23	3.75	8.12	17.3	0.35
24	4.52	8.43	14.43	0.35
25	3.95	8.23	16.71	0.35
26	4.37	8.39	15.17	0.35
27	4.16	8.31	15.96	0.35
28	2.62	7.25	9.46	0.4
29	2.55	7.16	10.06	0.4
30	2.09	6.6	12.49	0.4
31	2.47	7.08	10.62	0.4
32	2.2	6.75	12.13	0.4
33	2.4	7	11.17	0.4
34	2.32	6.91	11.73	0.4

Tableau 2 : Valeurs des paramètres de vagues (Hs et Tp), de vent (U) et de niveau d'eau (SWL en m/NM) au large pour 34 combinaisons centennales.

5.6.2. Évènements de référence « actuel » et « 2100 »

Conformément aux consignes 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 donc 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.

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).

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.

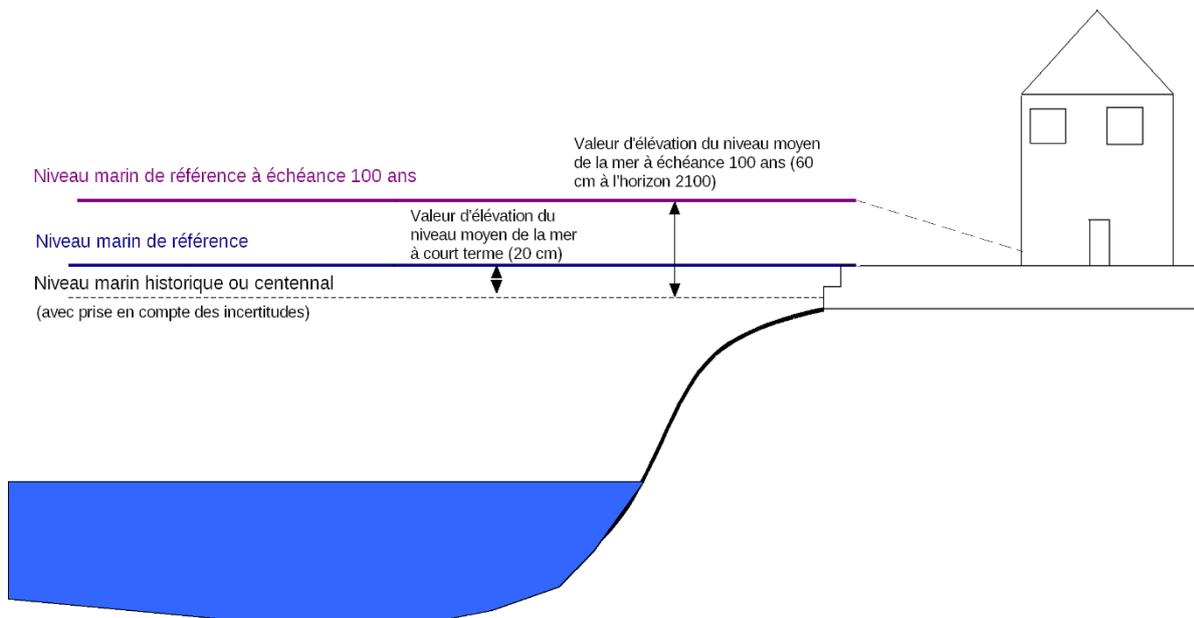


Figure 44 : Recommandations pour la prise en compte de l’élévation du niveau de la mer en lien avec le changement climatique (MEDDE, mai 2014).

6. Calcul des niveaux marins au rivage

L’objectif de cette étape est la propagation par modélisation numérique des évènements de référence depuis le large vers le rivage afin de calculer les niveaux marins statiques au rivage. **Ce calcul est effectué pour l’ensemble des 34 combinaisons centennales** sélectionnées et présentées paragraphe 5.6.1 ce qui permet de retenir les valeurs maximales de niveaux marins.

Comme présenté dans le paragraphe 1.2, la méthode de modélisation permet de prendre en compte pour le calcul des niveaux marins statiques au rivage, **les différentes contributions** du niveau de marée, de la surcote liée aux vagues (wave setup) et de la surcote atmosphérique (effet de baromètre inverse et effet du vent).

De plus, les niveaux marins au rivage sont calculés pour **un évènement dit « actuel » et un évènement dit « 2100 »** qui incluent toutes les marges (élévation du niveau de la mer et incertitudes) recommandées par le ministère (MEDDE, mai 2014) telles que rappelées paragraphe 0.

6.1. PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE MODÉLISATION NUMÉRIQUE

6.1.1. Rappels théoriques et stratégie de modélisation

La stratégie de modélisation numérique mise en œuvre repose sur l’utilisation de deux modèles (Figure 45) : SWAN (Simulating WAVes Neashore) permettant de calculer la surcote liée au déferlement des vagues (wave setup) et SWASH-2D (Simulating WAVes till Shore) permettant de calculer les niveaux d’eau et la surcote liée au vent. Ces trois contributions (vagues, vent, niveau d’eau) sont ensuite additionnées pour obtenir le niveau marin statique au rivage **Ntot**.

Grilles des modèles

Afin d’obtenir la surcote liée au déferlement des vagues (modèle SWAN) 3 grilles ont été construites (Figure 32) : l’une dite « rang 0 » (ou grille mère, A en rouge sur la figure) avec une résolution de 50 m et les trois autres dites « rang 1 » (ou grilles filles, B, C et D en orange sur la figure) de résolution 10 m.

Pour ce qui est du calcul des niveaux d’eau et de la surcote atmosphérique due au vent (modèle SWASH-2D), seule la grille mère de résolution 50 m est employée.

Pour rappel, les données topo-bathymétriques exploitées ont été présentées chapitre 4.

Conditions de forçage

Pour l’évènement de référence « actuel », les simulations seront réalisées comme facteurs de forçage les caractéristiques de vent, vagues et niveaux d’eau issues des 34 combinaisons précédemment calculées (Tableau 2, Chapitre 5).

Pour rappel, une marge de +20 cm pour la prise en compte de l’élévation du niveau de la mer sous l’effet du changement climatique ainsi qu’une marge de +25 cm pour la prise en compte des incertitudes sont ajoutées au niveau d’eau au large, avant propagation vers le rivage.

Pour l’évènement « **2100** », les simulations ne seront réalisées que pour quelques combinaisons qui ont été les plus impactantes en terme de niveau d’eau pour l’évènement « actuel ». Sous condition de changement climatique plus marquée, la marge prise en compte n’est plus de +20 cm mais +60 cm.

Comme expliqué précédemment (section 5.5.2), les directions des vagues D_p et du vent D_u ont choisies à partir des analyses des sections 5.3.2 et 5.3.3 ainsi qu’en fonction de la configuration du site. Elles correspondent aux valeurs les plus pénalisantes en terme d’effet à la côte.

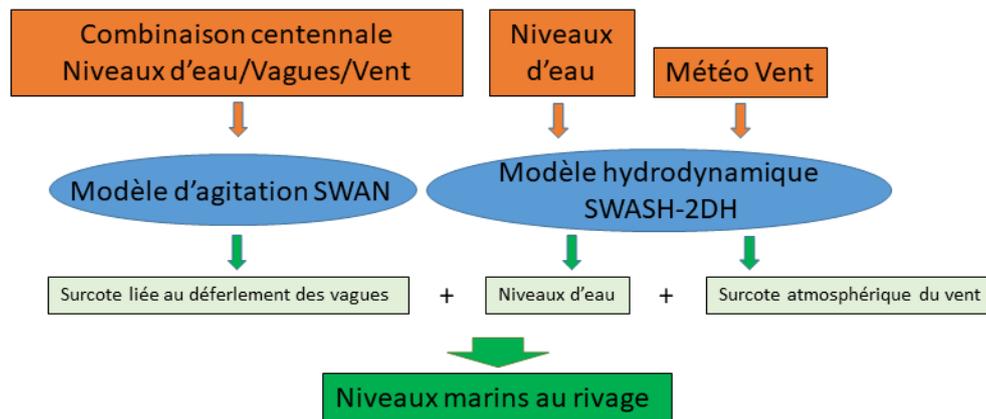


Figure 45 : Principe de la stratégie de modélisation pour le calcul des niveaux marins statiques au rivage (N_{tot}).

6.1.2. SWAN

Le modèle SWAN (Simulating WAVes Neashore) développé à l’Université de Technologie de Delft (Pays-Bas) permet de calculer les paramètres décrivant les vagues au niveau des zones côtières, des lacs et des estuaires en résolvant l’équation de conservation de la densité d’action des vagues. Une description détaillée du modèle est faite dans Booij et al. (2004).

SWAN modélise les processus de propagation suivants :

- propagation à travers un espace géographique et gonflement de la houle ;
- réfraction due à des variations spatiales du fond ou des courants ;
- diffraction ;
- blocage ou réflexion par des courants de retour ;
- transmission à travers des obstacles, blocage ou réflexion.

SWAN modélise également les processus de génération et de dissipation :

- génération par le vent ;
- interactions houle – houle (quadruplets et triplets de fréquence) ;
- dissipation de l’énergie par moutonnement ;
- dissipation de l’énergie par déferlement dû aux variations de profondeur ou aux courants ;
- dissipation de l’énergie par frottement au fond.

Il présente également l’avantage de pouvoir calculer directement le wave-setup ce qui permet un chaînage avec SWASH.

6.1.3. SWASH-2D

Le code de calcul SWASH (Simulating WAVes till Shore) développé à l’Université de Technologie de Delft (Pays-Bas) dans la continuité de SWAN, permet une résolution des équations non linéaires en eau peu profonde. Une description détaillée du modèle est faite dans Zijlema *et al.* (2011).

SWASH modélise les processus suivants :

- propagation des vagues ;
- péfraction ;
- piffraction ;
- shoaling ;
- interactions non linéaires vagues/vagues;
- interactions vagues/structures ;
- interactions vagues/courants ;
- déferlement des vagues.

Il est ainsi possible d’obtenir en sortie de modèle, la hauteur significative, l’élévation de la surface libre ou encore la surcote atmosphérique liée à l’action du vent par exemple.

6.2. PRINCIPAUX RESULTATS

Parmi l’ensemble des combinaisons sélectionnées, celles qui génèrent les niveaux marins statiques au rivage les plus importants sont les combinaisons :

- 15, 16, 23 et 25 pour le secteur de Porto-Vecchio,
- 15, 16, 23 et 30 pour le secteur de Santa Giulia,
- 15, 16, 17 et 30 pour le secteur de Sant’Amanza.

Pour les secteurs de Porto-Vecchio et Sant’Amanza, seuls les résultats de la combinaison 15, dont les caractéristiques de vagues et de vent sont parmi les plus élevées ($H_s = 5,13$ m et $T_p = 8,57$ s, $U = 19,41$ m/s, $SWL = 0,3$ m) de toutes les combinaisons testées, seront présentés à titre d’illustration dans ces paragraphes. Pour le secteur de Santa Giulia, c’est la combinaison 16 qui sera présentée. Elle correspond à des conditions de vagues moins importantes mais un niveau de l’eau (SWL) plus élevé ($H_s = 4,88$ m, $T_p = 8,53$ s, $U = 10,43$ m/s et $SWL = 0,35$ m/NM).

Pour rappel, les directions pics des vagues et du vent sont respectivement de $30^\circ N$ et $60^\circ N$.

6.2.1. Effet des vagues

La Figure 46, la Figure 47 et la Figure 48 mettent en évidence l’effet de la configuration morphologique du littoral et de la bathymétrie sur les caractéristiques de vagues à proximité du rivage :

- **la réfraction** à l’intérieur des baies (Pinarellu, San Ciprianu, Nord de Santa Giulia par exemple) et du golfe de Porto-Vecchio. Elle est en revanche faible à l’intérieur du Golfe de Sant’Amanza orienté dans l’axe des vagues de direction $30^\circ N$;
- **l’atténuation des hauteurs significatives** avec la diminution de la profondeur. Elle est surtout marquée dans le Golfe de Porto-Vecchio (à l’ouest de l’axe plage de Casadelmar

et Punta di l’Arena), dans les baies de San Ciprianu et Santa Giulia, et de manière moindre dans le Golfe de Sant’Amanza au droit de la plage de Maora. En revanche, l’atténuation est beaucoup moins importante sur les plages de Palombaggia, de Pinarellu et Balistra par exemple, plus ouvertes vers le large, plus exposées avec des pentes bathymétriques plus fortes.

Bien que la combinaison 15 ne génère pas les niveaux marins maximaux à l’intérieur de la baie de San Cyprianu par exemple, elle génère cependant une **surcote liée au déferlement de l’ordre de 15 cm**, plus élevée que celle des combinaisons 16, 23 et 25. À l’intérieur du golfe de Porto-Vecchio, la surcote liée au déferlement des vagues est de l’ordre de 10 cm à l’ouest de l’axe plage de Casadelmar et Punta di l’Arena. Dans la baie de Santa Giulia, elle est également de l’ordre de 10 cm. A l’intérieur du Golfe de Sant’Amanza, la surcote liée au déferlement des vagues est faible, de l’ordre de 5 cm.

En complément de l’analyse historique (chapitre 2.5) puis des calculs (chapitre 6), ces résultats apportent des éléments pour l’identification des secteurs potentiellement exposés aux franchissements de paquets de mer.

Les périodes pic des vagues (T_p , Figure 49 et Figure 50) sont de l’ordre de 9 s au large et généralement peu atténuée au rivage sauf au fond du Golfe de Porto-Vecchio (3s) et au droit de la plage de Maora (Golfe de Sant’Amanza, 5s). Ces périodes de l’ordre de 3-5 s avec des hauteurs significatives de moins de 1,5 m sont caractéristiques du clapot.

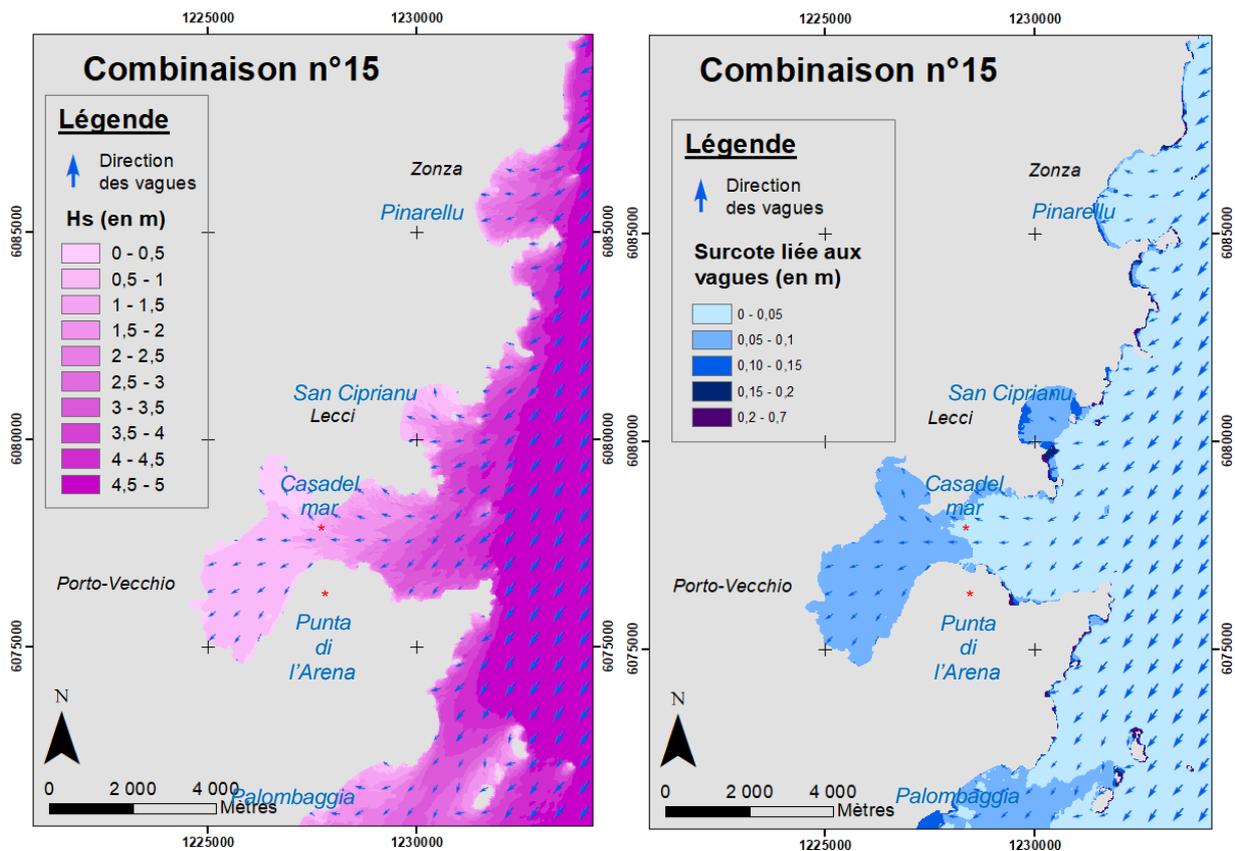


Figure 46 : Caractéristiques de vagues (hauteur significative et direction) et la surcote induite pour la combinaison n° 15 et l’évènement « actuel » sur le secteur de Porto-Vecchio.

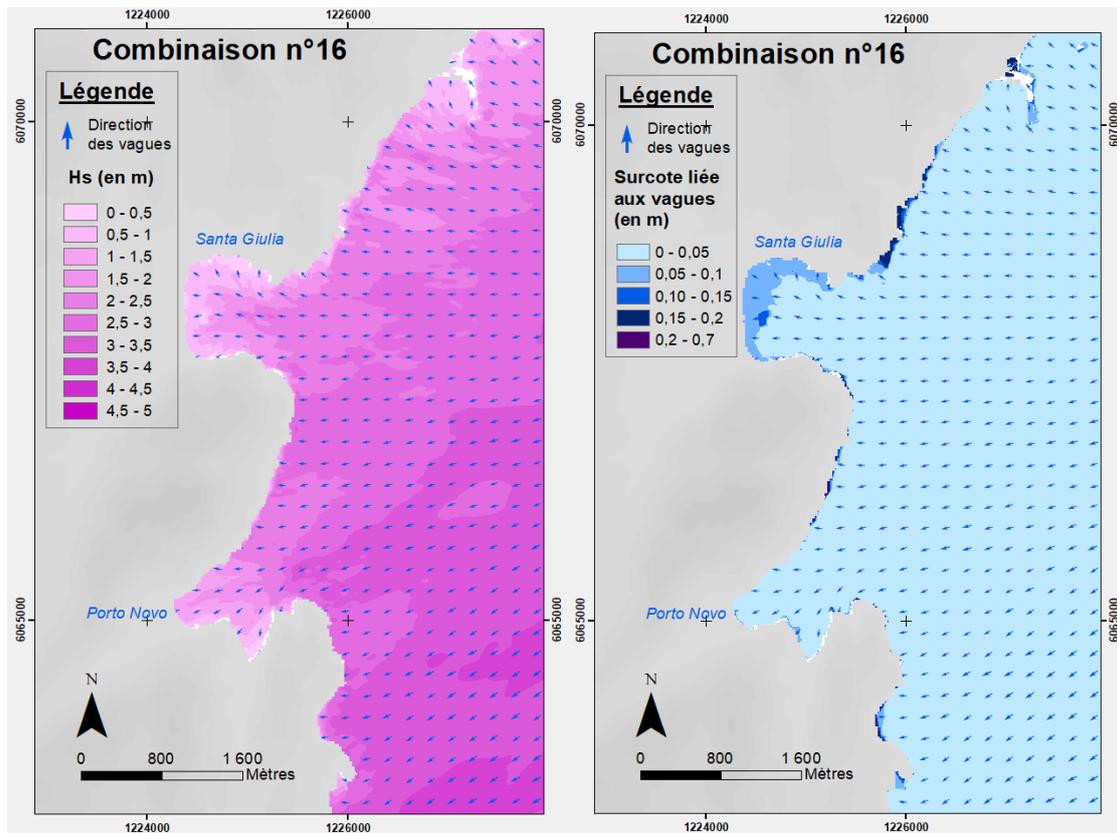


Figure 47 : Caractéristiques de vagues (hauteur significative et direction) et la surcote induite pour la combinaison n° 16 et l'évènement « actuel » sur le secteur de Santa Giulia.

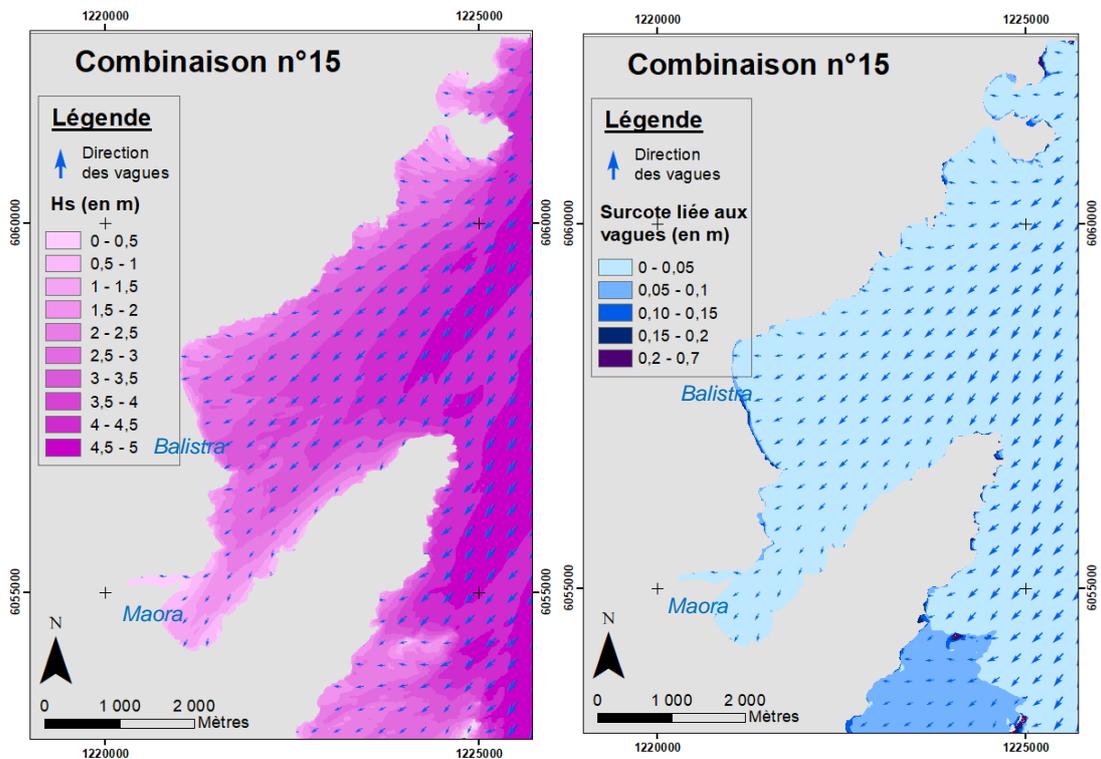


Figure 48 : Caractéristiques de vagues (hauteur significative et direction) et la surcote induite pour la combinaison n° 15 et l'évènement « actuel » dans le Golfe de Sant’Amanza.

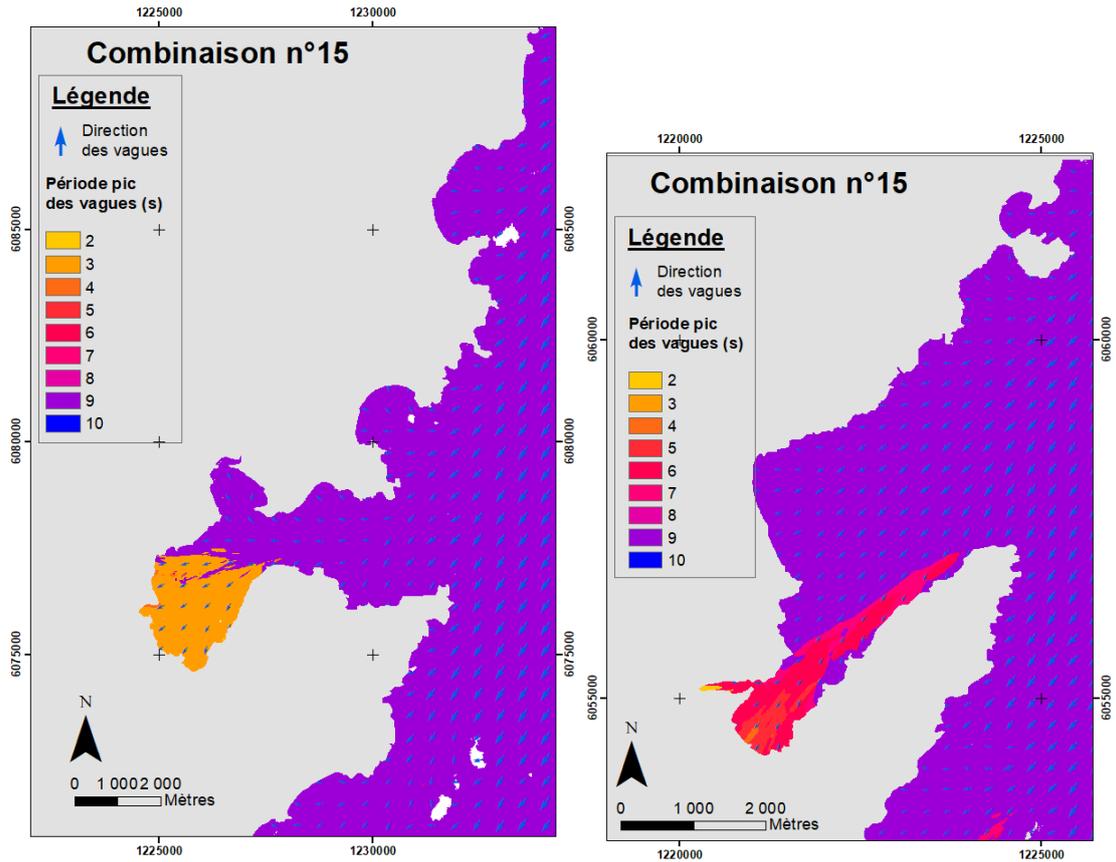


Figure 49 : Période pic des vagues pour la combinaison n° 15 sur les secteurs de Porto-Vecchio (à gauche) et de Sant’Amanza (à droite).

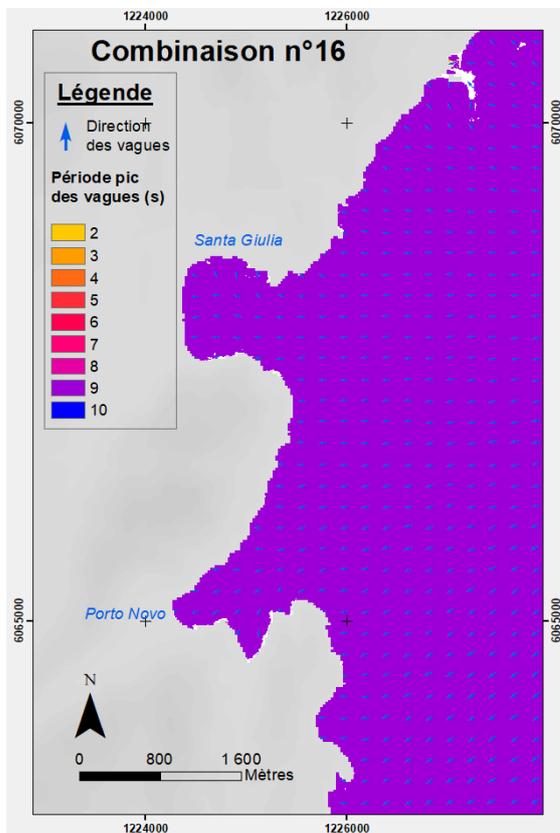


Figure 50 : Période pic des vagues pour la combinaison n° 16 sur les secteurs Santa Giulia.

6.2.2. Effet du vent

Généralement moins impactante que la surcote liée au baromètre inverse, la surcote induite par le vent peut être non négligeable dans des configurations géomorphologiques complexes telles que celle du Golfe de Porto-Vecchio. La stratégie de modélisation a donc permis de vérifier l’effet de la poussée des masses d’eau par le vent au fond du golfe. Cette **surcote liée au vent** est de l’ordre d’une **dizaine de centimètres** dans le Golfe de Porto-Vecchio et atteint une quinzaine de centimètres au fond. Elle est également d’une dizaine de centimètres au fond du Golfe de Sant’Amanza, au droit de la plage Maora. Ailleurs elle est de l’ordre de 5 cm.

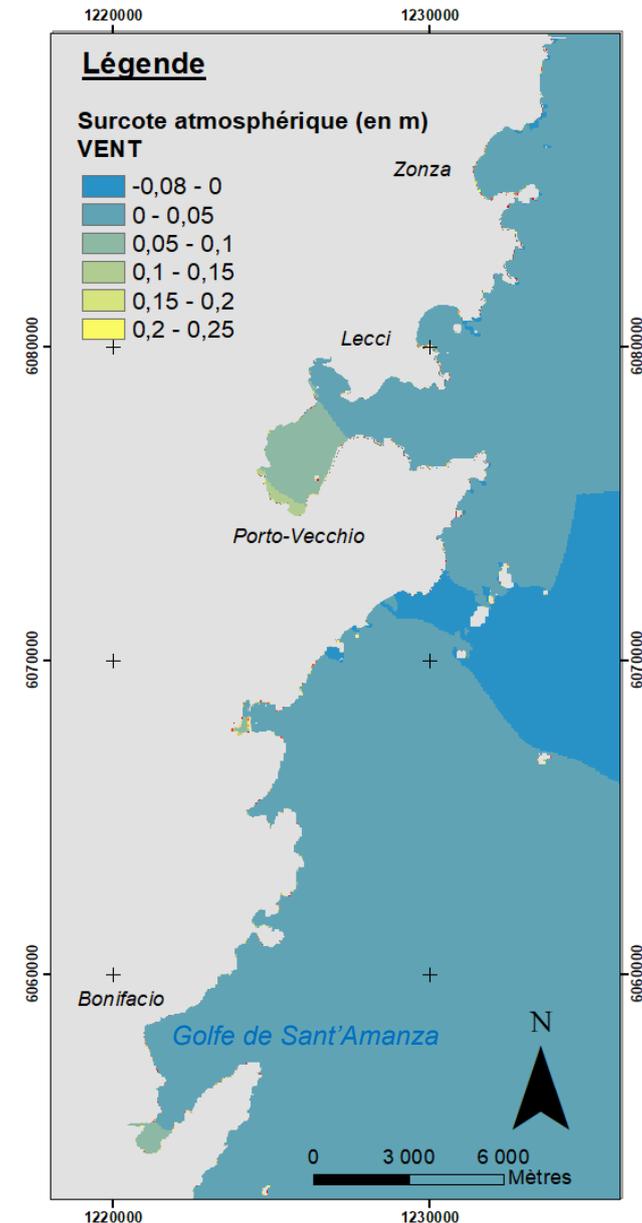


Figure 51 : Effet du vent (surcote) généré par la combinaison n° 15 et l’évènement « actuel » sur l’ensemble de la zone d’étude.

6.2.3. Niveaux marins au rivage (Ntot)

Les simulations SWAN et SWASH fournissent les niveaux marins au rivage pour chacune des combinaisons testées (cf. Tableau 2). La différence de résultat entre les combinaisons est généralement faible (moins de 5 cm) et non significative. Seules quelques combinaisons présentent des écarts significatifs de plus de 5 cm (n°15, 16, 23 et 25 pour le secteur de Porto-Vecchio, 15, 16, 23 et 30 et n°15, 16, 17 et 30 pour le secteur de Sant’Amanza). Les valeurs maximales des niveaux marins statiques au rivage sont retenues. La Figure 52 et la Figure 53 illustrent la distribution des niveaux marins maximaux le long du rivage (à gauche) ainsi que les combinaisons les ayant générés (à droite), pour les événements « actuel » et « 2100 » respectivement.

Pour l'évènement « actuel », les niveaux marins statiques au rivage sur le secteur d'étude sont globalement compris entre **0,95 et 1,1 m/NGF**¹⁹.

Pour l'évènement « 2100 », ils sont globalement compris entre **1,35 et 1,5 m/NGF**.

Pour l'exploitation de ces niveaux marins, une seule valeur par secteur géomorphologiquement homogène a dû être retenue. La méthode est présentée dans le chapitre 7.

¹⁹ Note sur les références altimétriques : Comme il est d'usage dans les études de modélisation numérique en océanographie, les niveaux d'eau au large sont exprimés en référence au Niveau Moyen (NM, cf. chapitre 5). Pour obtenir les niveaux marins au rivage en référence NGF (IGN 78), une conversion en 2 étapes à partir des Références Altimétriques Maritimes du SHOM de 2017 a dû être réalisée :

1/ expression par rapport au zéro hydrographique : le Niveau Moyen est au-dessus du zéro hydrographique (ou Cote Marine, NM/ZH = 0,47 m au port de Porto-Vecchio) ;

2/ expression par rapport au zéro NGF de l'IGN78 : le zéro NGF est au-dessus du zéro hydrographique (ZH/Zref := - 0,385 m au port de Porto-Vecchio).

On ajoute donc 0,085 m pour passer d'un niveau en référence au NM à un niveau exprimé en NGF

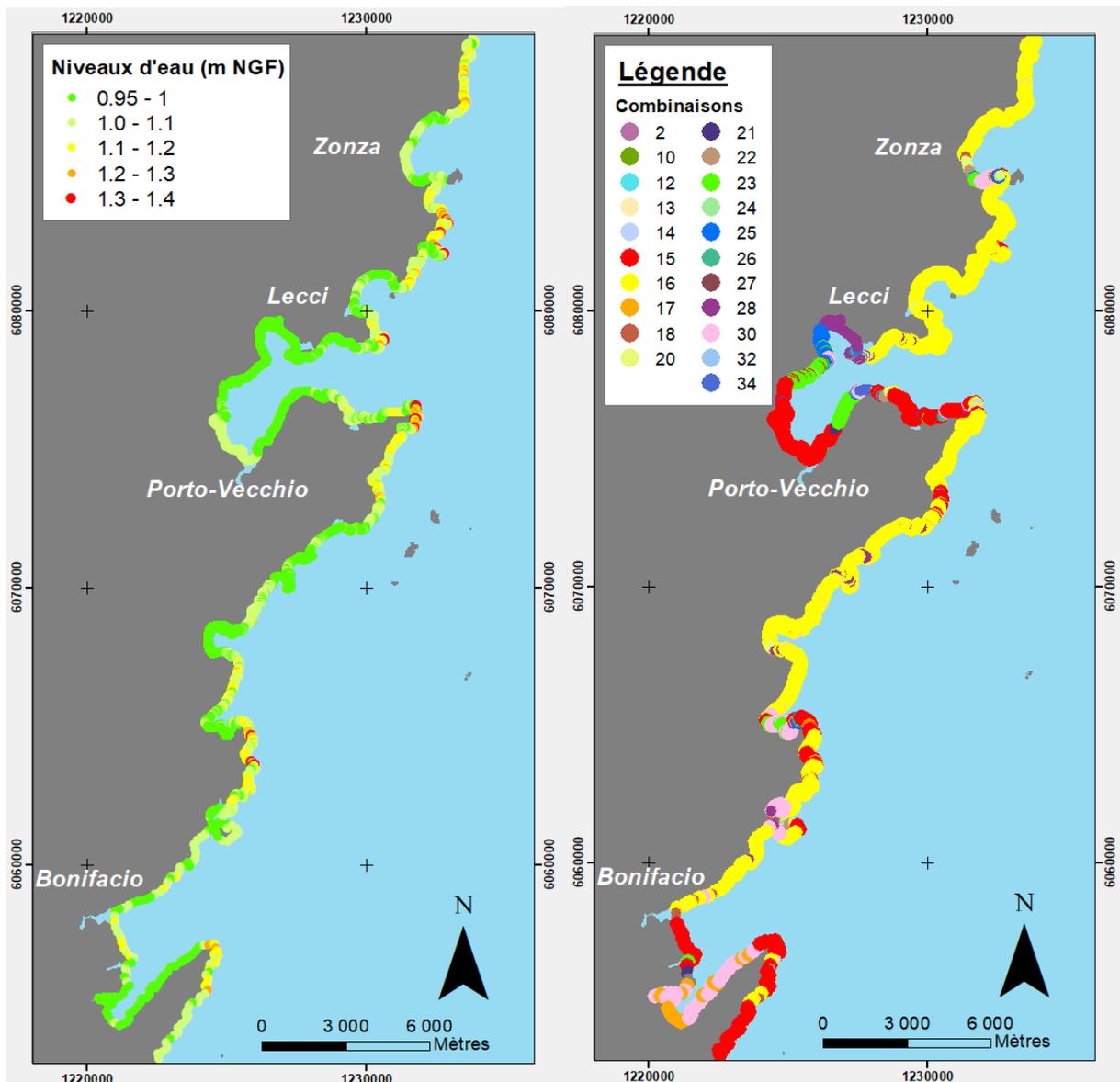


Figure 52 : Illustration des niveaux marins au rivage maximum (Ntot) à gauche, combinaison générant les niveaux marins au rivage maximum à droite, pour l'évènement « actuel ».

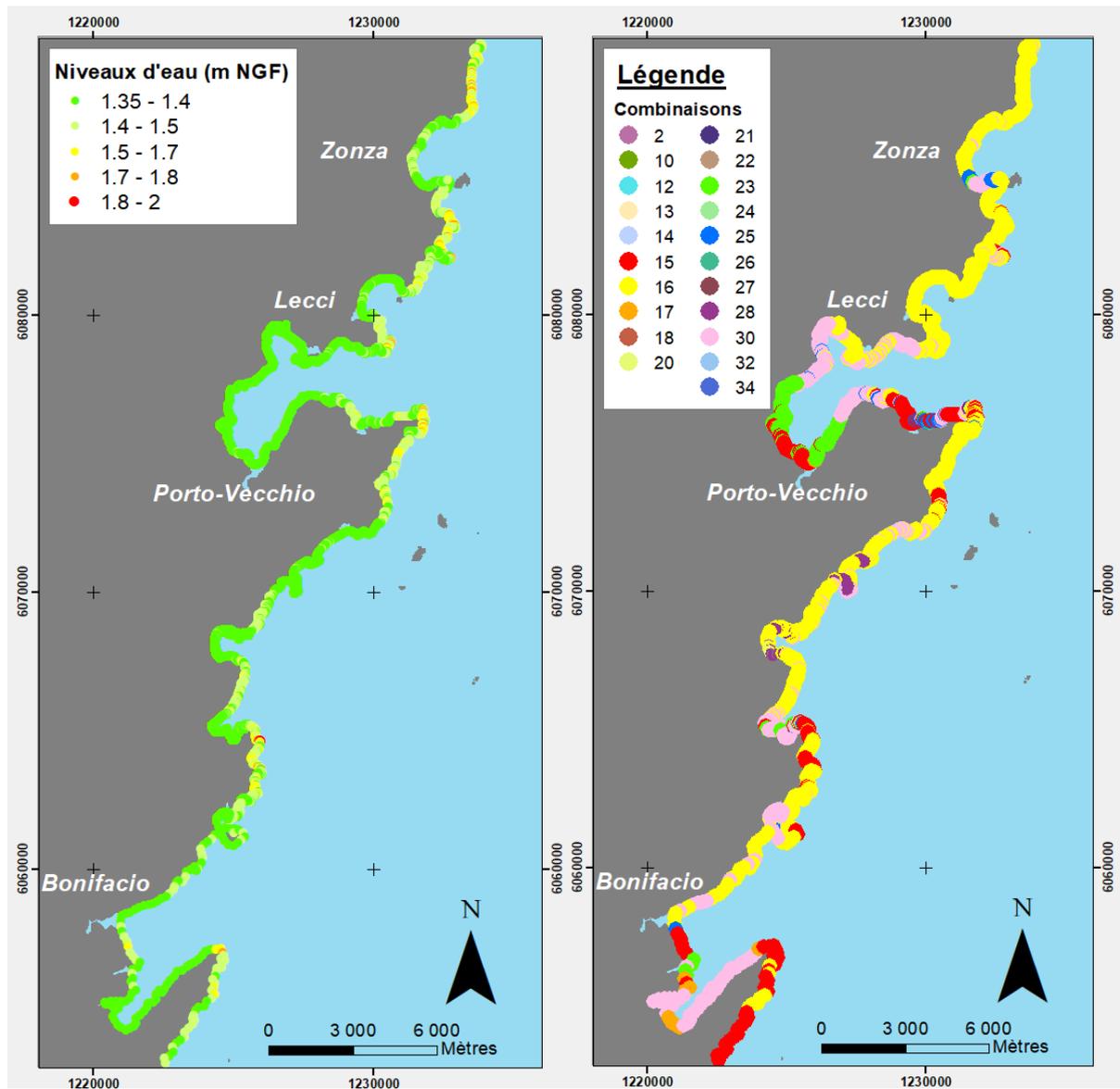


Figure 53 : Illustration des niveaux marins au rivage maximaux (Ntot) à gauche, combinaison générant les niveaux marins au rivage maximaux à droite, pour l'évènement « 2100 ».

7. Cartographie des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines

7.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA MÉTHODE

La méthode mise en œuvre dans cette présente étude permet de cartographier les ZBPESM à l'échelle 1/10 000. Il s'agit d'une approche dite « statique » qui consiste à projeter sur la topographie les niveaux marins au rivage précédemment calculés. Pour cela, la donnée topographique exploitée est le produit RGE ALTI® 1 m (IGN) de 2013 et le logiciel de traitement géomatique employé est ArcGIS 10.5.1.

Une analyse à dire d'expert est appliquée en complément afin d'ajuster et d'affiner la cartographie finale telle que présentée dans les paragraphes suivants.

Limites de la méthode

L'approche « statique » ne tient pas compte de la dynamique du phénomène (durée de l'évènement, vitesse d'écoulement, etc.).

La connaissance de la durée de l'évènement, c'est-à-dire de la durée pendant laquelle le niveau marin reste supérieur à l'altitude du terrain naturel (tel que représenté sur la Figure 54) et la modélisation des écoulements sur les zones inondées permettraient de calculer le volume d'eau qui va réellement submerger une zone et sa répartition (hauteurs et vitesses de l'eau) dans les zones basses inondées (approche « dynamique »).

Avec l'approche « statique », la durée n'est pas prise en compte et donc le volume d'eau n'est limité que par la capacité des zones basses à se « remplir » jusqu'à une altitude correspondante au niveau de la mer au rivage (Ntot). L'emprise de la zone submergée est donc uniquement déterminée par la topographie.

Il est également souligné que cette approche « statique » ne permet pas de prendre en compte les conjonctions avec des phénomènes de crues des cours d'eau.

Néanmoins, l'approche « statique » fournit, pour un niveau d'eau au rivage donné, l'étendue des zones potentiellement submersibles par quelques processus marins que ce soit (pénétration par les exutoires des cours d'eau, débordements, brèches, destructions d'ouvrages, paquets de mer envahissant des terrains situés sous le niveau de la mer...).

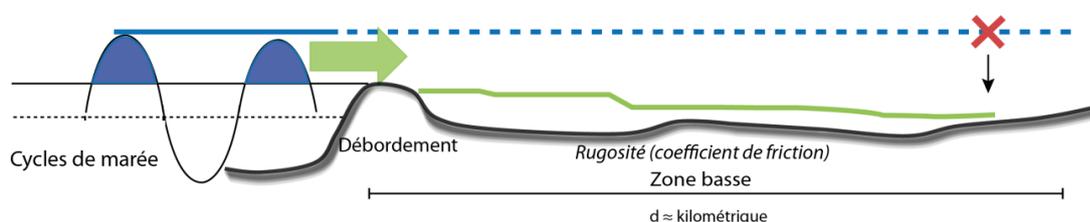


Figure 54 : Illustration schématique de submersion par une approche « statique » (ligne bleue) et par une approche dynamique (ligne verte).

Cette approche fournit l'étendue des zones basses présentant une altitude au sol inférieure à un niveau de la mer donné.

7.2. IDENTIFICATION DE SECTEURS HOMOGÈNES ET NIVEAUX MARINS

Pour la cartographie, des secteurs homogènes ont été identifiés à dire d’expert à partir de l’orthophotographie de 2016 et des données LIDAR de 2013 de l’IGN. Seuls des critères géomorphologiques ont été retenus : il s’agit de plages de poches, de baies, de golfe, de zones particulièrement basses par exemple et/ou de zones séparées par des ruptures topographiques. Ces secteurs géomorphologiquement homogènes sont identifiés sur la Figure 55.

Pour chaque secteur homogène, le modèle numérique fournit la valeur maximale du niveau marin au rivage en plusieurs points espacés d’un pas régulier (20m pour le secteur de Porto-Vecchio, 10 m pour le secteur de Santa Giulia et 50 m pour le secteur de Sant’Amanza). **Pour les besoins de la cartographie ainsi que pour les usages de la DDTM de Corse-du-Sud, il est nécessaire de retenir une seule valeur de niveau marin par secteur homogène.**

Pour cela, une analyse de la sensibilité de la topographie (LIDAR 2013 de l’IGN) à différentes valeurs comprises dans la gamme des résultats de la modélisation à l’échelle de chaque secteur homogène, est réalisée. Il s’agit de vérifier l’impact de ces différentes valeurs sur l’emprise de la zone basse avec un affichage à l’échelle de restitution qui est 1/10 000.

Outre cette analyse de la sensibilité de la topographie, l’analyse à dire d’expert s’appuie également sur :

- des paramètres statistiques (moyenne, médiane et écart type) de l’ensemble des niveaux marins d’un même secteur ;
- les valeurs maximales de niveaux marins au droit des entrées d’eau préférentielles (grau, embouchures, points bas, etc.).

Par exemple, pour la baie de San Ciprianu qui représente un secteur homogène, le niveau marin au rivage actuel ($N_{tot_{actu}}$) et 2100 ($N_{tot_{2100}}$) varient respectivement entre 0,95 et 1,05 m/NGF et entre 1,35 et 1,50 m/NGF. L’analyse a permis de retenir les valeurs de 1 m/NGF pour $N_{tot_{actu}}$ et de 1,40 m/NGF pour $N_{tot_{2100}}$ pour l’ensemble du secteur (Figure 57).

Les cartes présentant la valeur retenue pour chaque secteur homogène et pour les événements « actuel » et « 2100 » sont fournies dans l’Annexe 1.

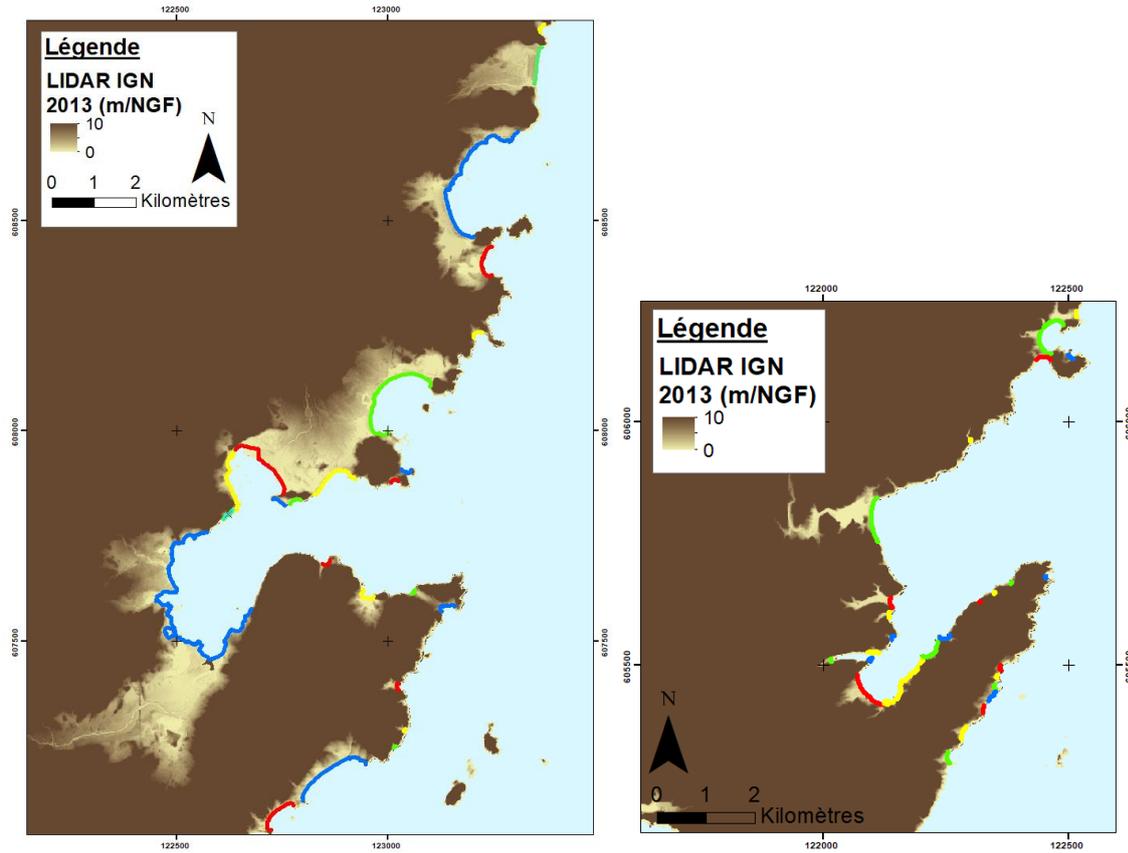


Figure 55 : Carte des secteurs géomorphologiquement homogènes (emprise de Porto-Vecchio à gauche, emprise de Sant’Amanza à droite).

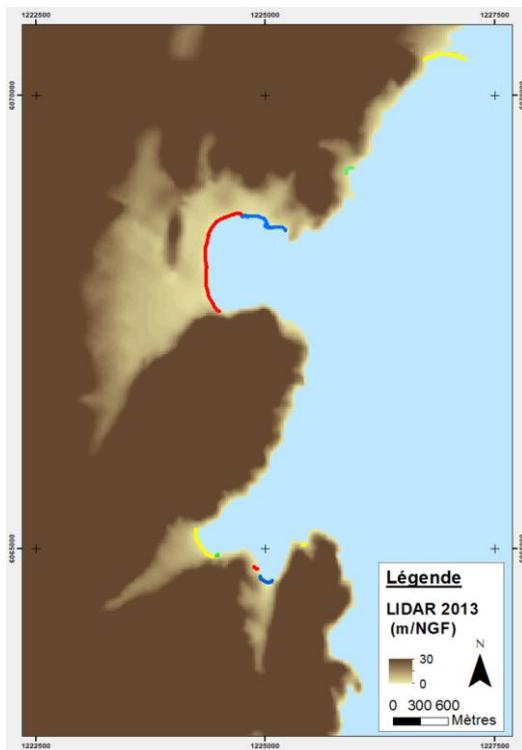


Figure 56 : Carte des secteurs géomorphologiquement homogènes sur l’emprise de Santa Giulia.

Les couleurs permettent de distinguer la succession des différents secteurs homogènes (une même couleur ne signifie pas que les secteurs ont les mêmes caractéristiques).

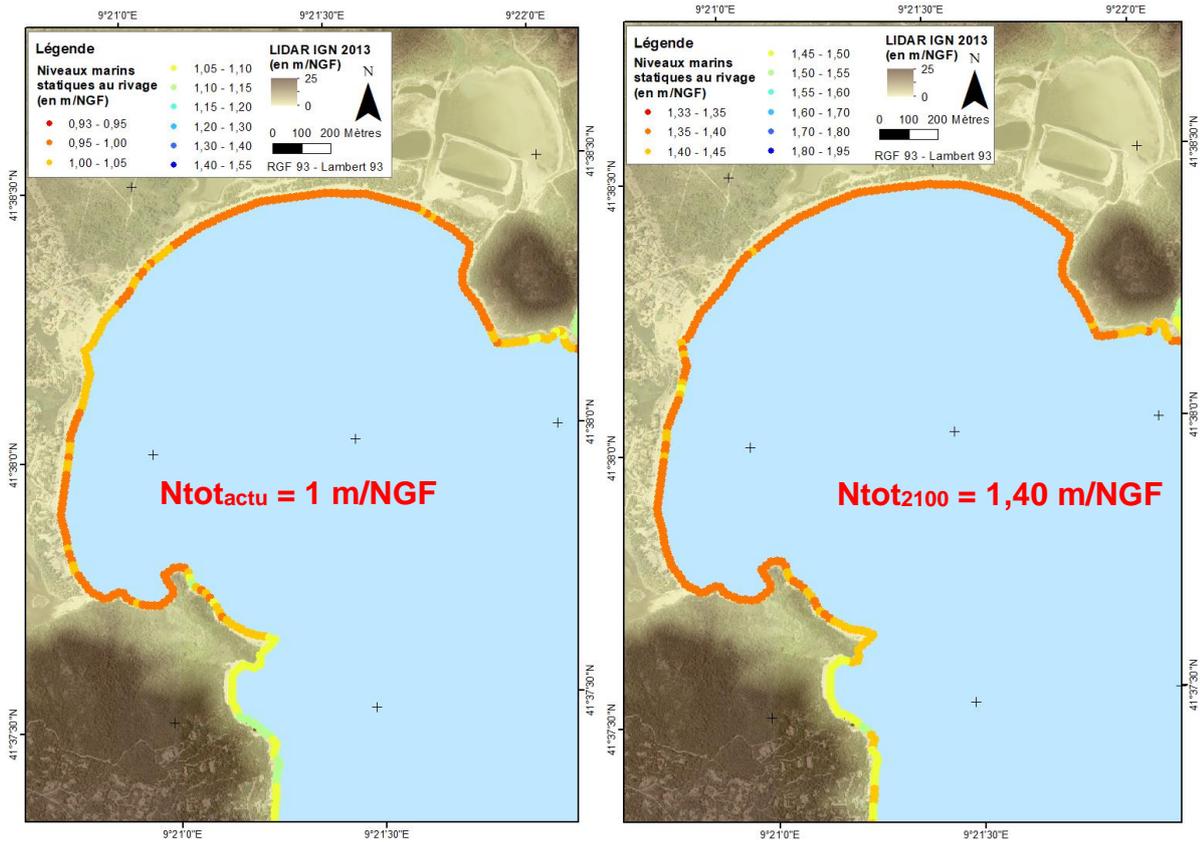


Figure 57 : Exemple de secteur homogène (San Ciprianu) pour le choix de $N_{tot_{actu}}$ (1 m/NGF, à gauche) et $N_{tot_{2100}}$ (1,40 m/NGF, à droite).

7.3. MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE

7.3.1. Identification de la limite côté mer de la submersion

Les ZBPESM sont délimitées à terre par l’altitude correspondant au niveau marin de référence calculé précédemment (approche « statique »). Pour la limite côté mer, il a été choisi de prendre en compte le trait de côte qui correspond à la limite entre la terre et la mer (MEDDEM, 2010). Il est considéré que la submersion marine générée par l’évènement de référence « démarre » à partir de cet indicateur.

Tel que détaillée dans le rapport Mallet *et al.* (2012), la notion de trait de côte diffère selon les usages et les organismes. Ce rapport commandé par le ministère au BRGM en 2011 (convention MEDDTL/DEB-BRGM 2011) en appui à l’actualisation des catalogues sédimentologiques des côtes françaises, présente une synthèse des différents indicateurs du trait de côte ainsi que des bonnes pratiques pour son suivi. Il distingue notamment les types d’indicateurs (altimétriques, géomorphologiques, botaniques ou hydrodynamiques) :

- **définition du SHOM** (type altimétrique) qui correspond à la laisse des plus hautes mers dans le cas d’une marée astronomique de coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales (pas de vent du large, pas de dépression atmosphérique susceptible d’élever le niveau de la mer) ;
- **définitions qui prennent en compte le caractère « dynamique » du trait de côte.** Elles sont utilisées dans le cadre d’études techniques d’ingénierie ou de recherche et peuvent correspondre à la limite du jet de rive en conditions météorologiques normales (type hydrodynamique), à la limite de végétation (type botanique), à la berme de bas de plage ou au pied de dune (type géomorphologique). Ces définitions considérant le caractère

dynamique du trait de côte sont utilisées par les observatoires du littoral, par exemple. Le jet de rive et la berme sont des marqueurs du trait de côte employés par exemple par le CEREMA pour produire l’indicateur national de l’érosion côtière (digitalisation d’orthophotographies) ou bien encore par le BRGM pour les suivis sur le terrain du trait de côte « bas » ou du trait de côte « haut » en Méditerranée, depuis 2001 pour le Réseau d’Observation du Littoral (ROL) de la Corse notamment). La Figure 58 présente les corps morphosédimentaires illustrant le trait de côte classiques d’un profil de plage méditerranéen.

Pour répondre aux besoins de la présente étude, la notion de trait de côte qui a été choisie pour la limite côté mer des ZBPESM répond exclusivement à des critères géomorphologiques et botaniques.

Les plages sont par définition submersibles, c’est-à-dire régulièrement recouvertes par la mer, principalement sous l’effet des vagues en raison du caractère micro-tidal du littoral Corse, même hors événement extrême. D’autre part, elles sont extrêmement mobiles sous l’effet de leur dynamique naturelle (vent, vagues et courants) et sur certains endroits sous l’effet du piétinement et des actions mécaniques (reprofilage, réaménagement). **C’est pourquoi, il a été choisi de considérer la limite haute de la plage, c’est-à-dire le trait de côte « haut » tel que représenté sur la Figure 58.**

Egalement suivi par le ROL, le trait de côte « haut » correspond dans ce cadre à la limite entre la plage et la dune dont l’évolution est essentiellement contrôlée par l’action du vent. Tel que représenté par exemple sur la Figure 58 et la Figure 59, le trait de côte « haut » s’identifie par une **limite de végétation dunaire et/ou une laisse de mer et/ou par une rupture de pente topographique** lorsqu’elle est visible (pente douce à falaise par exemple).

Le trait de côte considéré pour la présente étude peut également correspondre au **piéd d’ouvrages** de fixation du trait de côte (longitudinaux) ou de bâtiments (Figure 59).

La position du trait de côte a été déterminée par numérisation de ces indicateurs à partir de l’orthophotographie 2016 et du LIDAR de 2013 de l’IGN, à une échelle 1/2 000. En complément, des mesures topographiques ont été effectuées avec un système DGPS lors de la visite de terrain les 24 et 25 octobre 2018, sur les secteurs géomorphologiquement homogènes pour lesquels la numérisation de la position du trait de côte présentait une trop forte incertitude (Figure 59).

☞ Le trait de côte a été identifié tel que présenté ci-dessus uniquement au droit des secteurs géomorphologiquement homogènes tels que définis dans le paragraphe 7.2. Il n’a pas été identifié en présence de falaises rocheuses.

☞ Afin de représenter les secteurs potentiellement exposés aux chocs mécaniques et les projections liés aux vagues, la limite côté mer de la bande de sécurité (cf. paragraphe 8.4) correspond au trait de côte déjà identifié pour les secteurs géomorphologiquement homogènes. Sur la base de sa connaissance historique et en concertation avec le BRGM, la DDTM de Corse-du-Sud a identifié des secteurs complémentaires (généralement rocheux) pour lesquels la limite côté mer de la bande de sécurité correspond à la limite de l’eau (hors falaise présentant une pente abrupte et une altitude supérieure à 6m/NGF).

☞ Les plages et zones mobiles sont représentées sur la cartographie des ZBPESM (cf. paragraphe 8.4). Cependant, en raison de la mobilité de la plage, aucune information de hauteur d’eau n’est fournie.

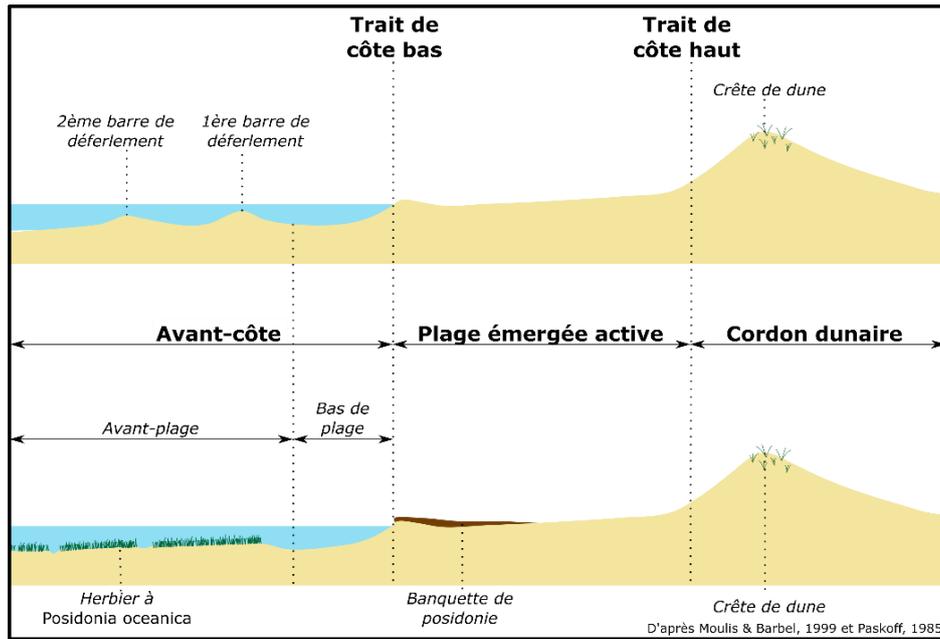


Figure 58 : Profil Type Méditerranéen, descripteurs suivis dans le cadre du ROL (Moulis et Barbel, 1999 et Paskoff, 1985).

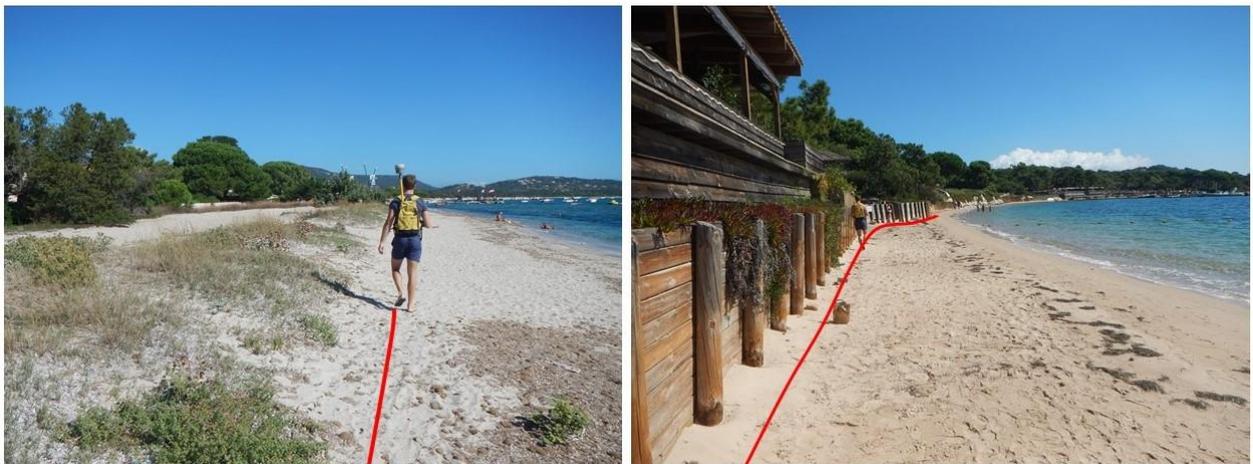


Figure 59 : Levé de la position du trait de côte haut (limite de la végétation à gauche, pied d’ouvrage à droite) au DGPS lors de la visite de terrain le 24 septembre 2018. En rouge, le trait de cote « haut » considéré dans la présente étude pour la délimitation des ZBPESM côté mer.

7.3.2. Création des polygones des zones basses

Une fois un niveau marin défini pour chaque secteur homogène, l’isoligne correspondante est tracée à terre puis le polygone est généré (Figure 60).

Le polygone initial est découpé avec le trait de côte tel que représenté sur la Figure 61. Les polygones sur la plage sont effacés alors que ceux situés côté terre du trait de côte sont conservés pour le traitement cartographique suivant.

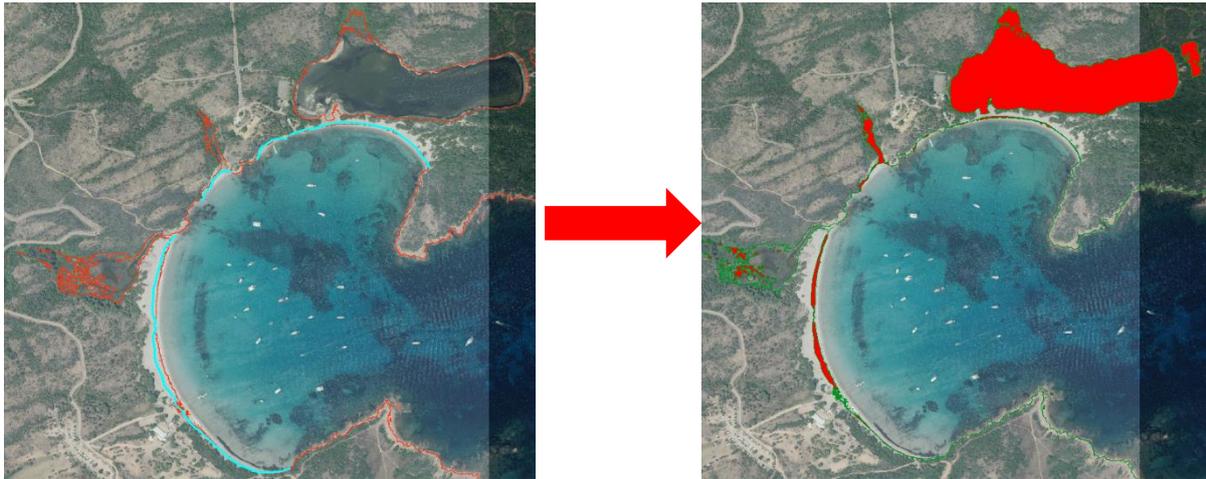


Figure 60 : Exemple de génération d’un polygone pour la cartographie des ZBPESM.

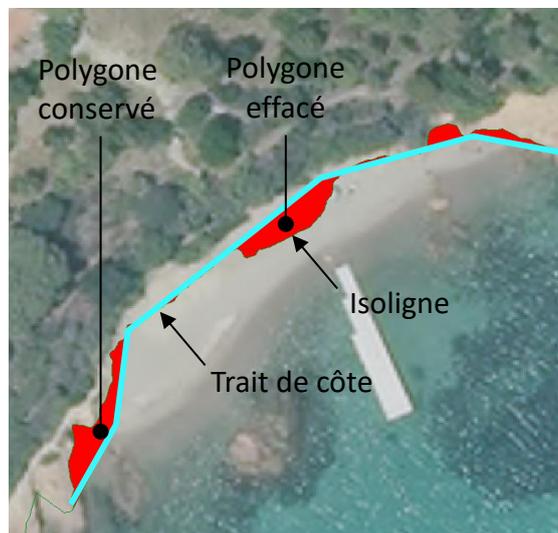


Figure 61 : Exemple de prise en compte de la limite côté mer du polygone.

7.3.3. Modalité de traitement des petites zones basses et hautes

Compte tenu de l’échelle de restitution (1/10 000), seules les zones **supérieures à 500 m²** font l’objet d’un traitement particulier tel que présenté ci-dessous. Les zones inférieures à 500 m² ne sont pas considérées représentatives à cette échelle de travail et sont supprimées ou fusionnées. Les visites de terrain effectuées les 24 et 25 septembre 2018 ont permis de vérifier les modalités de traitement.

Zones hautes au sein du polygone zones basses

Au sein du polygone de la zone basse déterminée, les zones dites « hautes » d’altitude supérieure à la valeur de N_{tot} considérée et dont la surface est supérieure à 500 m² sont identifiées puis découpées. Celles dont la surface est inférieure à 500 m² sont négligées et fusionnées avec le polygone « zone basse ». La Figure 62 et la Figure 63 présentent deux exemples de découpage et de fusion, respectivement, des zones hautes en fonction de leur surface.



Figure 62 : Exemple de découpage des zones « haut » de surface supérieure à 500 m².

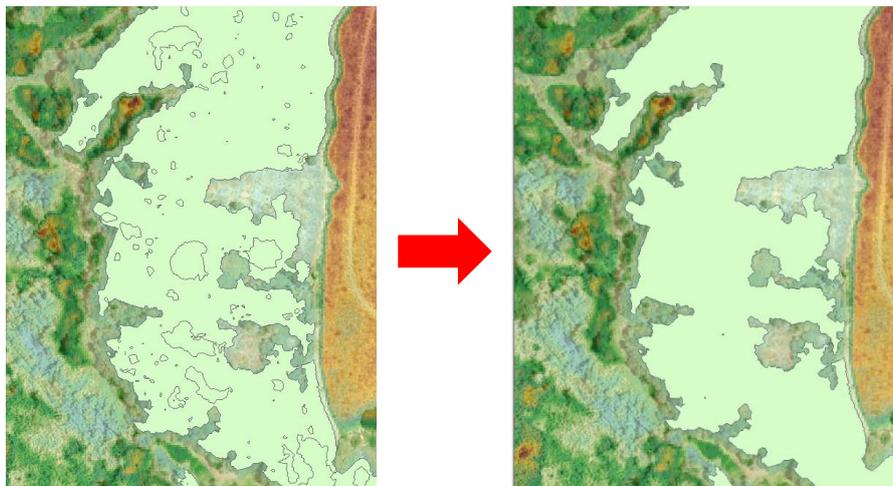


Figure 63 : Exemple de fusion des zones « haut » de surface inférieure à 500 m², intégrées dans la zone basse environnante

Zones basses déconnectées du front de mer

Dans le cas de zones dites « basses » (pour rappel dont l'altitude est inférieure à la valeur de N_{tot} considérée) dont la surface est supérieure à 500 m², une analyse d'expert est nécessaire pour déterminer si l'eau de mer est en mesure de l'atteindre. Plusieurs critères permettent de juger du caractère submersible de la zone basse (Figure 64 et Figure 65) :

- son éloignement au trait de côte (moins de quelques mètres voire moins de quelques dizaines de mètres) ;
- son exposition aux franchissements de paquets de mer ;
- la hauteur du cordon dunaire ;
- l'existence de connexions hydrauliques (buses, pont cadre par exemple, Figure 66).

La Figure 64 illustre une configuration à 2 zones basses. À l'ouest une large zone basse susceptible d'être connectée avec la mer et à l'est une deuxième zone basse (entourée en bleu) située en arrière d'un cordon dunaire relativement élevé et large (2,75 m/NGF et une quarantaine de mètres de largeur, flèche orange). Relativement éloignée du front de mer, cette deuxième zone basse n'a initialement pas été considérée comme potentiellement submersible. Cependant, le calcul des franchissements de paquets de mer a montré que ce cordon pouvait être submersible. C'est pourquoi, cette zone est finalement conservée dans la cartographie des zones basses.

La Figure 65 illustre une autre zone basse déconnectée du front de mer par un cordon dunaire moins large (une quinzaine de mètres) et moins haut (1,75 m/NGF). Elle est conservée en tant que zone basse potentiellement submersible.

Les zones basses d’altitude inférieure à $N_{tot_{actu}}$ et $N_{tot_{2100}}$, et de surface supérieure à 500 m^2 qui ont été supprimées pour les raisons précitées, sont recensées dans un fichier au format shape fourni avec le dossier du SIG (Système d’Information Géographique).

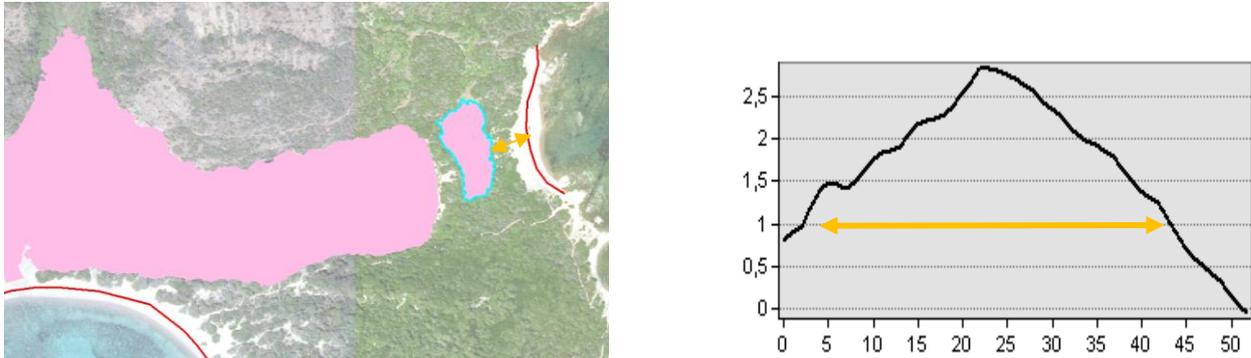


Figure 64 : Exemple 1 de fusion de zone basse de surface supérieure à 500 m^2 .

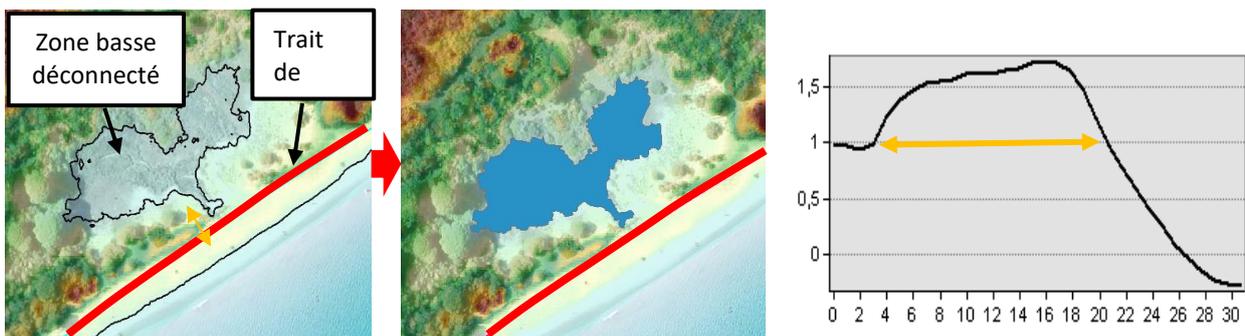


Figure 65 : Exemple 2 de fusion de zone basse de surface supérieure à 500 m^2 .

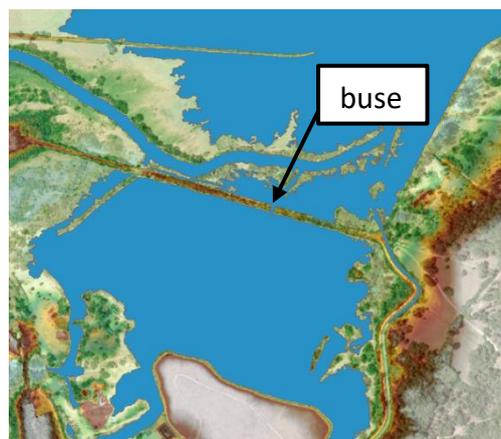


Figure 66 : Fusion de deux polygones en cas de connexion hydraulique.

7.4. EXEMPLES DE RÉSULTATS

Les cartes de résultats présentent les zones de hauteurs d’eau inférieures à 50 cm (polygone bleu) et supérieures à 50 cm (polygone rouge) pour l’évènement « actuel ». La combinaison de ces 2 polygones représente l’emprise des ZBPESM pour l’évènement « actuel » (Figure 67 et Tableau 3).

Elles sont réalisées et fournies à une échelle 1/10 000 avec le scan25 de l’IGN en fond cartographique.

Les hauteurs d’eau ne sont pas représentées pour l’évènement « 2100 » mais sont fournies dans le SIG au format shape. L’emprise de cet évènement correspond à la combinaison des polygones rouge, bleu et vert (Figure 67 et Tableau 3).

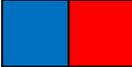
	Zones de hauteur d’eau supérieure à 50 cm pour l’évènement « actuel »
	Zones de hauteur d’eau inférieure à 50 cm pour l’évènement « actuel »
	Emprise de la zone basse (évènement « actuel »)
	Emprise de la zone basse (évènement « 2100 »)

Tableau 3 : Code couleur des cartes des ZBPESM.

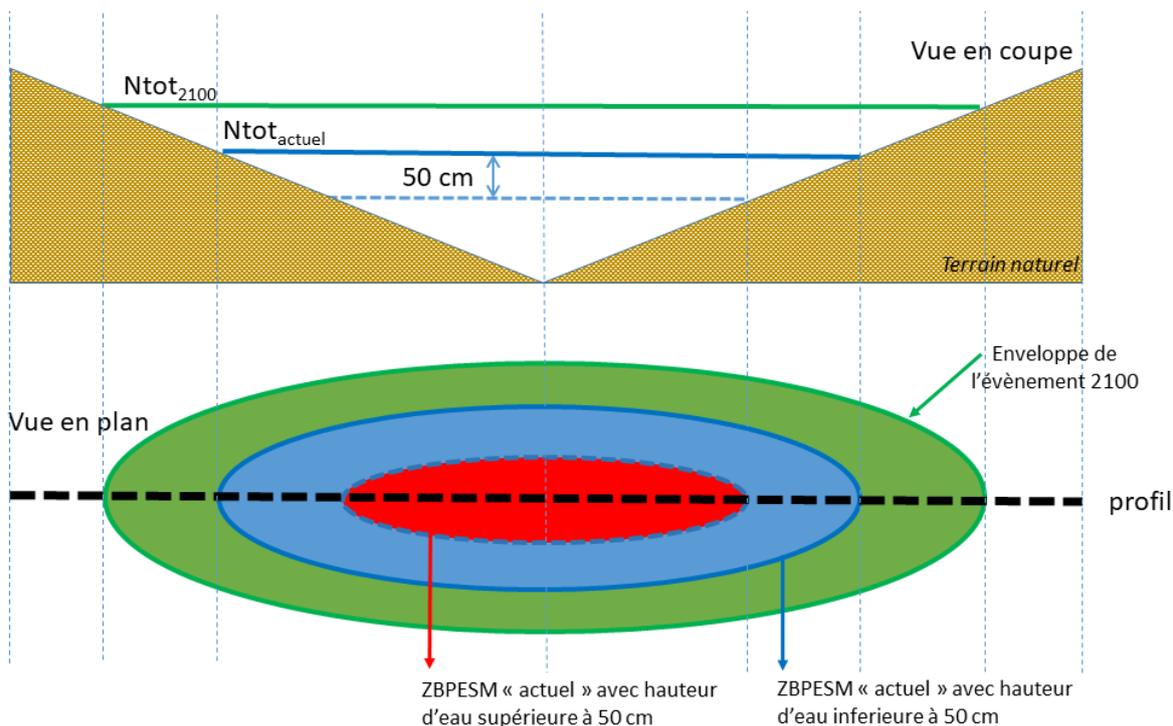


Figure 67 : Schéma illustrant le code couleur appliqué aux polygones d’emprises des ZBPESM et de hauteurs d’eau.

Les secteurs potentiellement exposés aux submersions marines correspondent aux embouchures de cours d’eau et zones humides connexes. Ces embouchures représentent des **entrées d’eau préférentielles permettant la submersion de larges zones basses parfois situées en arrière de cordons dunaires relativement larges et élevés** (plusieurs dizaines de mètres de largeur et plus de 2 mètres NGF d’altitude). C’est le cas par exemple,

des secteurs des plages de l’Ovu Santu, de Pinarellu, de l’Anse de Tramulinacchia, des plages de Palombaggia, de Santa Giulia, de la Rondinara et de Balistra (Figure 68 et Figure 69). Ces secteurs « protégés » par un cordon dunaire ont fait l’objet d’une modélisation des franchissements de paquets de mer afin de vérifier la possibilité de ce type de submersion marine (cf. chapitre 8).

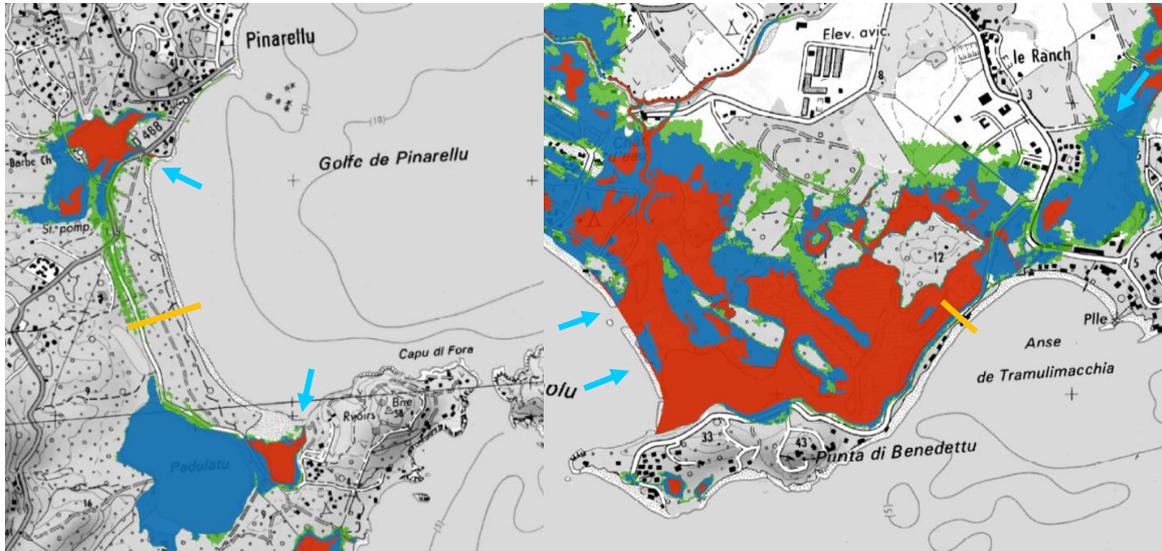


Figure 68 : ZBPESM en arrière de cordon dunaire (flèches bleues : entrées d’eau préférentielles). Exemples de Pinarellu à gauche et de l’Anse de Tramulinacchia à droite, traits oranges : localisation des profils topographiques.

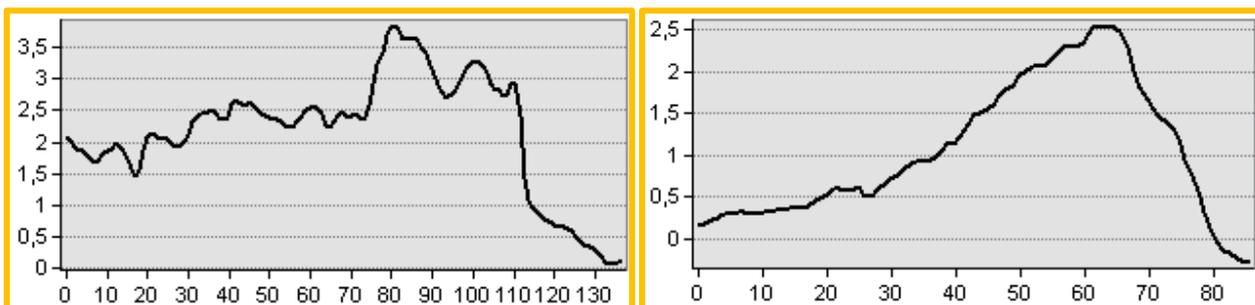


Figure 69 : Profils topographiques de cordons dunaires. Exemples de Pinarellu à gauche et de l’Anse de Tramulinacchia à droite. Axe des ordonnées : altitude en m/NGF ; axe des abscisses : largeur en mètres.

D’autres secteurs tels que les fronts de mer sont potentiellement **directement exposés au débordement** : le front de mer au fond du Golfe de Porto-Vecchio entre la marine di Fiori et le port, ainsi que la marine d’Arje. Pour ces secteurs, le débordement ne concerne que quelques dizaines de mètres vers l’intérieur des terres (300 m maximum). Les secteurs du Golfe di Sognu ainsi que les anciennes salines et polders du Golfe de Porto-Vecchio sont des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines par débordements direct sur plusieurs centaines de mètres vers l’intérieur des terres (Figure 70).



Figure 70 : Exemple du front de mer de Porto-Vecchio au fond du golfe potentiellement submersible par débordement (flèches bleu : entrées d'eau).

Pour rappel, cette étude ne prend pas en compte les éventuelles conjonctions avec des crues des cours d'eau susceptibles d'aggraver le phénomène de submersion marine en particulier dans les secteurs du Golfe di Sognu jusqu'à la baie de San Ciprianu, de la plage de l'Ovu Santu (Olmucci) et au sud de Pinarellu par exemple.

7.5. VISITES DE TERRAIN

Dans le cadre de cette présente étude, les visites de terrain ont été effectuées les 24 et 25 septembre 2018. Elles avaient pour objectif la vérification de plusieurs indicateurs géomorphologiques et éléments techniques tels que :

- la position et la nature du trait de côte ainsi que la configuration géomorphologique des cordons dunaires et du front de mer (Figure 71 et Figure 72) ;
- la présence d'ouvrage de protection côtière jouant un rôle sur l'écoulement de l'eau (digue, muret réhausseur, etc., Figure 73) ;
- la présence de connexions hydrauliques telles que des buses, des fossés, des ponts cadres pouvant relier des zones basses à la mer (Figure 74) ;
- la vérification de la topographie dans des zones présentant des incertitudes.

À l'échelle de la zone d'étude, les observations ne sont pas exhaustives. Elles ont été concentrées sur les secteurs particulièrement bas et exposés aux vagues.

Les mesures topographiques ont été effectuées avec un système DGPS Trimble R10 (précision centimétrique). Elles ont permis de compléter et vérifier les données LIDAR 2013 également exploitées (précision meilleure que 25 cm).



Figure 71 : Identification et mesure au DGPS de la position du trait de côte (Pinarellu à gauche, San Ciprianu à droite).

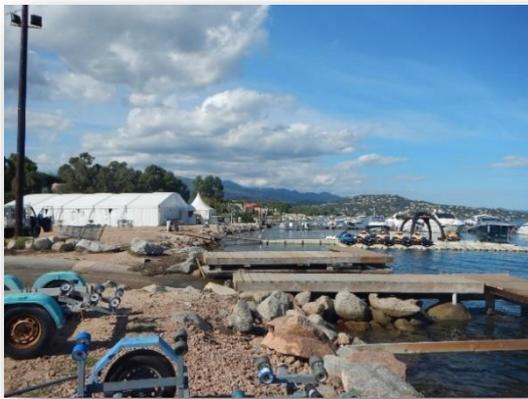


Figure 72 : Exemple d’observations sur le front de mer (Porto-Vecchio à gauche, Anse de Tramulimacchia à droite).



Figure 73 : Exemple d’ouvrage (muret) ayant potentiellement un rôle sur l’écoulement de l’eau en cas de submersion marine (commune de Lecci, San Ciprianu).



Figure 74 : Exemple de connexion hydraulique reliant une zone basse à la mer (commune de Porto-Vecchio, cadre rouge : localisation de la buse sous la route).

8. Localisation des secteurs potentiellement exposés aux franchissements de paquets de mer

8.1. PRINCIPE DE LA MÉTHODE

La connaissance des événements historiques, l’expertise géomorphologique (sur le terrain et grâce aux données disponibles) ainsi que les résultats de l’approche statique pour la cartographie des ZBPESM (zones basses potentiellement exposées aux submersions marines) ont permis de réaliser une première identification des secteurs exposés aux franchissements de paquets de mer. Pour certains secteurs, il a été jugé nécessaire d’approfondir cette identification par le calcul des franchissements de paquets de mer sur des profils représentatifs de chacun de ces secteurs.

Ce calcul permet de vérifier si oui ou non des franchissements de paquets de mer peuvent se produire pour l’évènement de référence actuel et générer voire amplifier une submersion marine. La chronologie de l’évènement (ou durée) n’est pas prise en compte et la méthode mise en œuvre vise à fournir une information qualitative plutôt que quantitative. C’est pourquoi la restitution cartographique des secteurs qui y sont exposés sera indicative avec une bande forfaitaire de 50 m (recommandations ministérielles, guide PPRL du MEDDE, mai 2014) appliquée au trait de côte tel que défini paragraphe 7.3.1.

8.2. SWASH-PROFILS

Pour estimer les franchissements de paquets de mer, le modèle numérique SWASH (Zijlema *et al.*, 2011) a été employé en mode 1DV (ou profil). Il s’agit d’un modèle purement hydraulique qui ne permet pas de simuler la dynamique morphosédimentaire, c’est-à-dire l’évolution de la configuration géomorphologique qui contrôle cependant fortement le déferlement des vagues. Les calculs sont donc effectués à **topographie constante**.

La première étape de l’approche consiste à définir des profils représentatifs de la morphologie locale sur des secteurs homogènes en terme de hauteur, largeur et d’exposition aux vagues (Figure 72). Ces profils sont déterminés de manière orthogonale au trait de côte autant que possible, depuis le large (à partir d’une profondeur de 15 à 5 m en fonction des secteurs) vers le rivage :

- le point au large est pris avant le déferlement des vagues, à une profondeur généralement comprise entre 15 et 5 m selon les secteurs ;
- le point à terre est pris au-delà du cordon dunaire ou du front de mer (plusieurs mètres à l’intérieur des terres) ;
- ils ont donc une longueur variable en fonction de la configuration morphologique et de l’exposition aux vagues (de l’ordre de 500 à 1 000 m).

Au total, 36 profils ont été retenus (Annexe 2).

La deuxième étape consiste à extraire les profils topo-bathymétriques des 2 MNTs de résolution 10 m (secteurs de Porto-Vecchio et de Sant’Amanza) produits dans le cadre de cette présente étude (cf. chapitre 4). Ils sont ré-échantillonnés à 1m. Ces profils sont adaptés à leur extrémité côté mer afin de supprimer une erreur de calcul liée à la réflexion des vagues : un plateau de 200 m de long est ajouté tel que présenté sur la Figure 76 et la Figure 77.

La troisième étape consiste à réaliser les simulations avec le modèle SWASH-profil sur une durée de 1 heure. Les données de forçages appliquées en entrée de SWASH-profil sont les

caractéristiques de vagues (Hs, Tp et Dp) et les niveaux marins générés par les modèles SWAN et SWASH-2DH (cf. chapitre 6) à partir des combinaisons centennales (cf. chapitre 5) pour le calcul des niveaux marins au rivage. Ces caractéristiques de vagues et de niveaux d’eau sont respectivement extraites des simulations SWAN sur les 2 grilles de rang 1 (10 m) et SWASH-2DH sur la grille de rang 0 (50 m). Parmi l’ensemble des combinaisons retenues (cf. Tableau 2), seules les combinaisons les plus impactantes ont été exploitées et testées (combinaisons 15 et 16 pour le secteur de Porto-Vecchio, 15, 17 et 30 pour le secteur de Sant’Amanza). Les calculs ont été effectués pour l’évènement centennal « actuel ».

La simulation SWASH-profil permet de simuler la propagation et le déferlement de chaque vague jusqu’à la côte et de calculer les débits linéiques (m³ par seconde et par mètre de front de mer) franchissant l’ouvrage ou le haut de plage au cours du temps. Le modèle SWASH-profil permet de calculer les hauteurs d’eau et les vitesses d’écoulement tout au long des profils. Cependant, la chronologie de l’évènement n’étant pas prise en compte, ces informations ne peuvent être exploitées pour le calcul des volumes et donc la cartographie des zones potentiellement inondables par submersion marine. En revanche, **ces informations sont exploitées de manière qualitative, à titre indicatif, afin de déterminer la présence ou non d’eau et donc la capacité des franchissements de paquets de mer à générer ou amplifier une submersion marine pour un évènement centennal « actuel ».**

La représentation des franchissements de paquets de mer dans l’atlas cartographique incluant également les zones basses potentiellement exposées aux submersions marines est expliquée dans le paragraphe 8.4, ci-dessous.

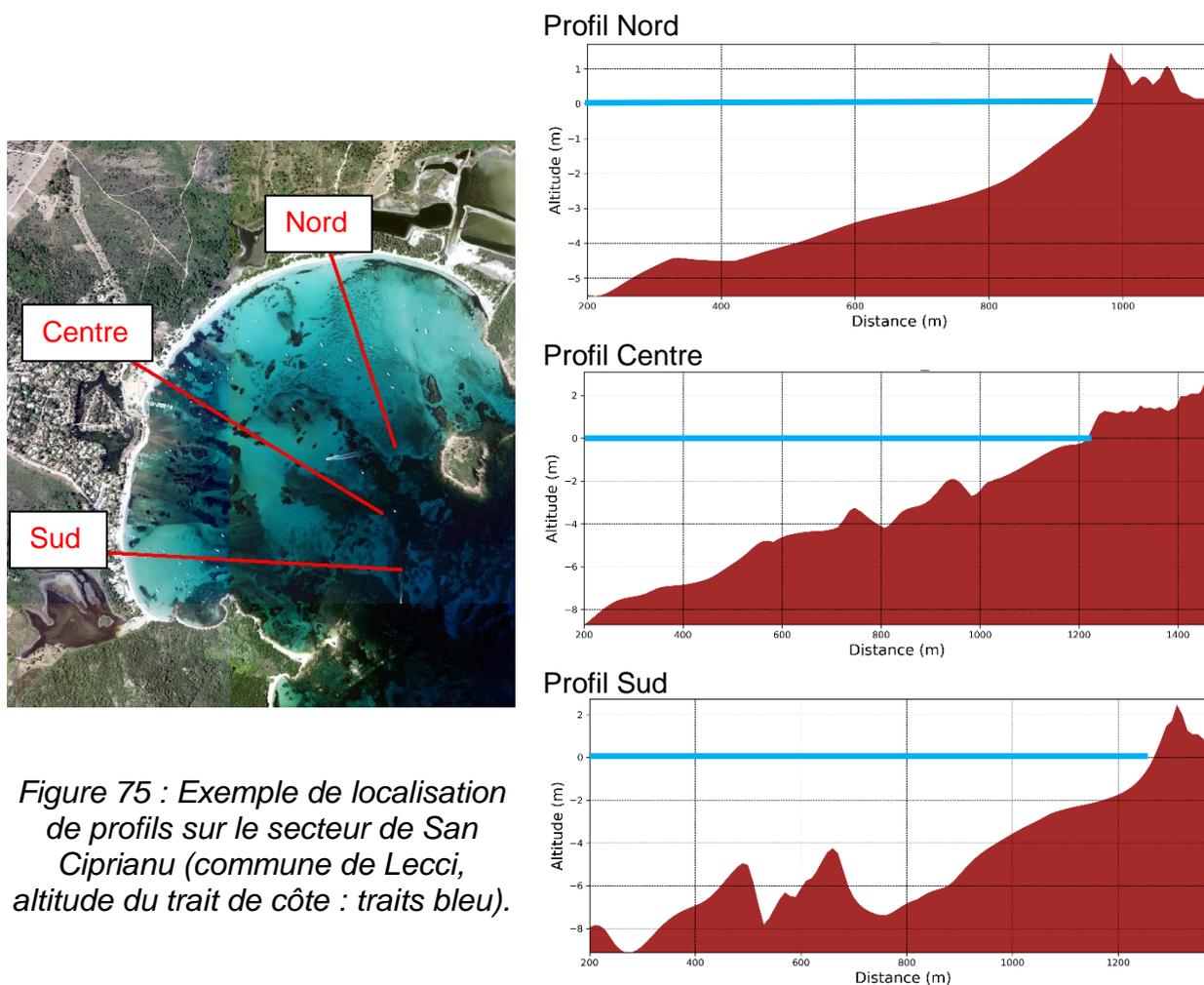


Figure 75 : Exemple de localisation de profils sur le secteur de San Cipriano (commune de Lecci, altitude du trait de côte : traits bleu).

8.3. SECTEURS EXPOSÉS AUX FRANCHISSEMENTS DE PAQUETS DE MER

La Figure 76 et la Figure 77 présentent des exemples de résultats des calculs de SWASH sur les profils (traits rouge). Il en est déduit la capacité des vagues à générer des franchissements de paquets de mer au-delà du cordon dunaire ou du front de mer. Alors que sur la Figure 76 les points verts témoignent de présence d’eau largement à l’intérieur des terres (sur plusieurs mètres voire plusieurs dizaines de mètres, franchissement du cordon dunaire dans l’Anse de Tramulimacchia, par exemple), sur la Figure 77, les points verts témoignent de l’absence d’eau au-delà de la plage.

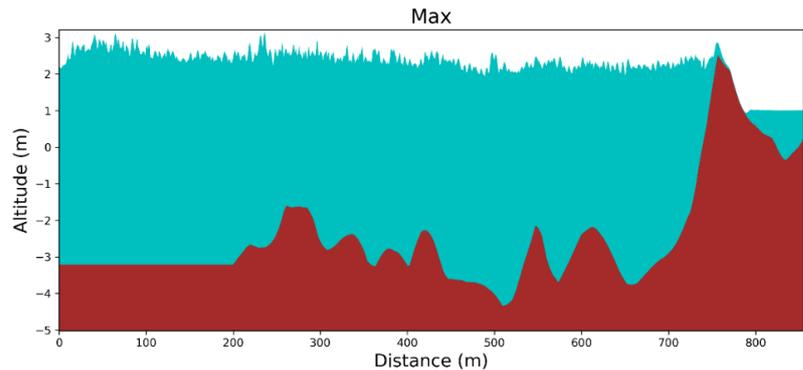


Figure 76 : Exemple d’exploitation des résultats de SWASH-1DV sur le profil de l’Anse de Tramulimacchia (commune de Lecci), secteurs exposés aux franchissements de paquets de mer pour l’évènement « actuel » (points verts : présence d’eau).

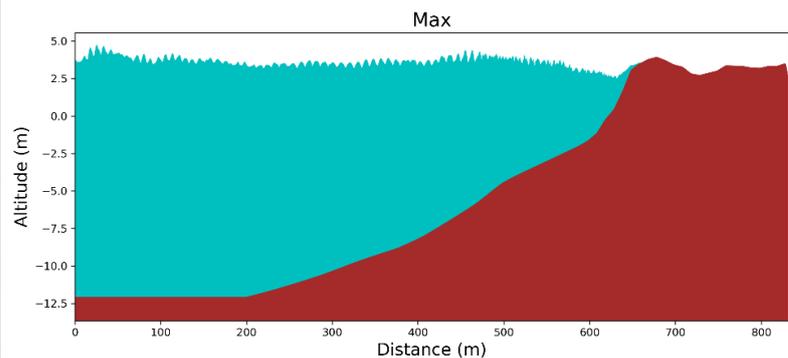
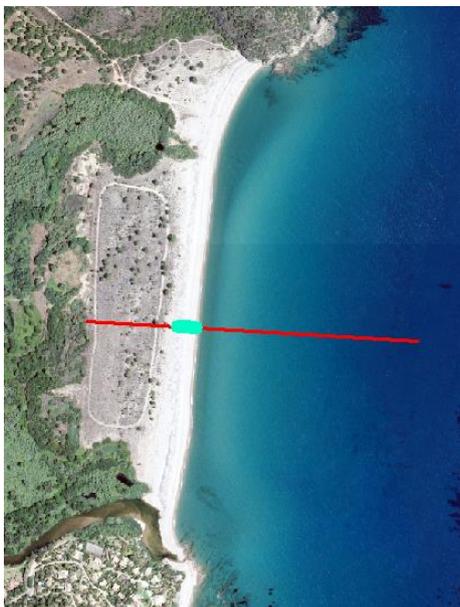


Figure 77 : Exemple d’exploitation des résultats de SWASH-1DV sur le profil de la plage de l’Ovu Santu (commune de Zonza), secteurs non exposés aux franchissements de paquets de mer pour l’évènement « actuel » (points verts : présence d’eau).

Les cartes des Figure 78 et Figure 79 indiquent pour chaque secteur homogène, son exposition ou non à des franchissements de paquets de mer.

Les secteurs n’ayant pas fait l’objet de calcul spécifique avec le modèle SWASH-1DV pour les raisons précisées précédemment sont également représentés. Ces résultats sont également fournis dans un format numérique exploitable dans un SIG.

Un code à 3 couleurs est appliqué sur le linéaire afin de représenter :

- couleur grise : le linéaire n’a pas fait l’objet d’une estimation complémentaire et d’un calcul spécifique ;
- couleur bleu avec les triangles bleus : le linéaire est exposé aux submersions marines par franchissements de paquets de mer pour l’évènement de référence ;
- couleur rose : les franchissements de paquets de mer ne sont pas susceptibles de s’y produire pour l’évènement de référence.

En dehors des zones à falaises et des secteurs avec une topographie abrupte, les zones basses qui n’ont pas fait l’objet de calcul ont été proposées puis acceptées en réunion (20 novembre 2018) par la DDTM2A. Elles répondent aux critères suivants :

- une configuration morphologique conférant une protection vis-à-vis des vagues de la direction 30°N de l’évènement centennal ;
- une large exposition potentielle à la submersion marine par débordement direct (Golfe di Sogno par exemple). Dans les zones identifiées comme potentiellement exposées aux submersions marines par débordement direct de la mer, les franchissements de paquets de mer n’ont pas été étudiés.

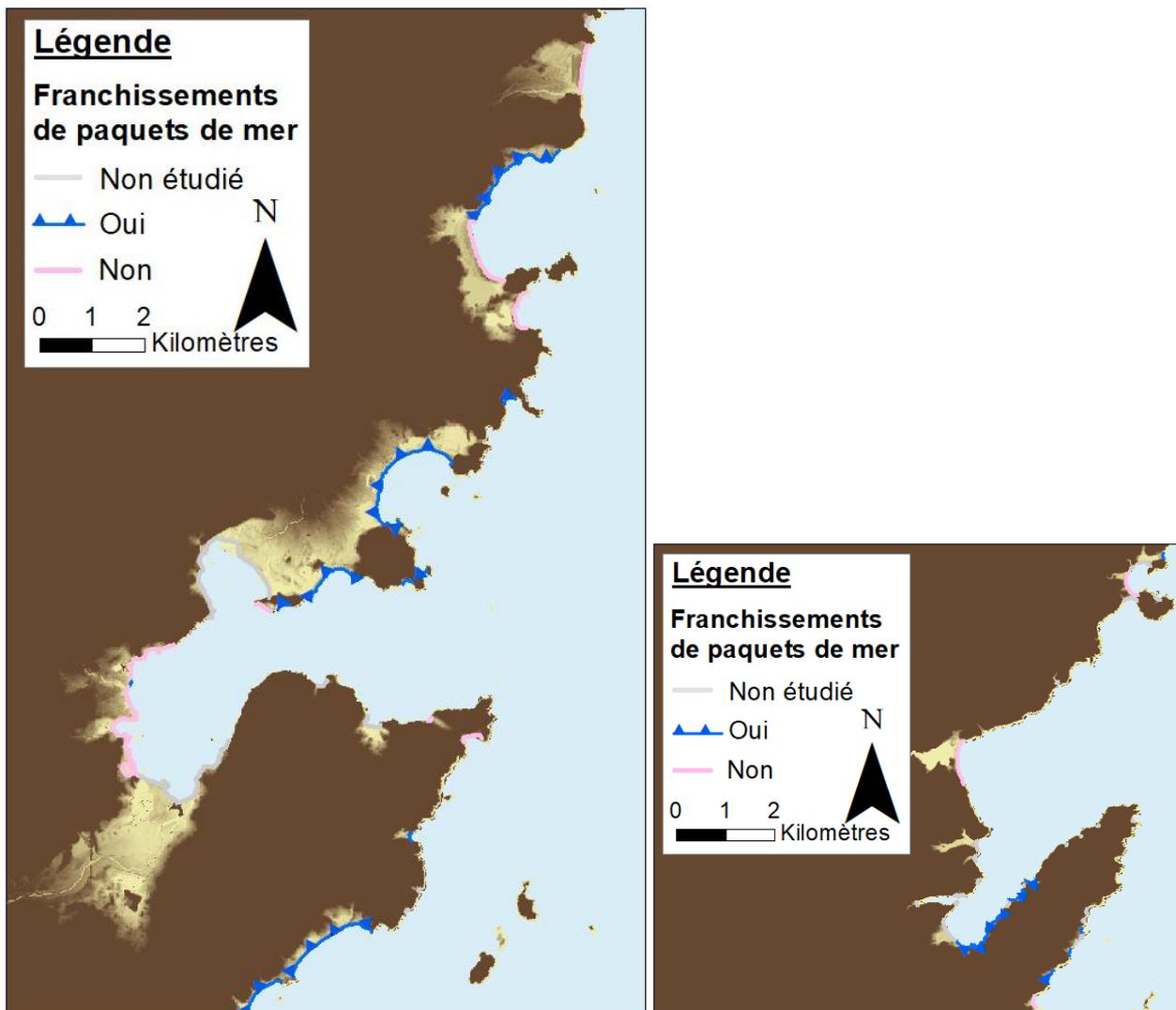


Figure 78 : Exposition aux franchissements de paquets de mer (secteurs de Porto-Vecchio à gauche, secteurs de Sant’Amanza à droite).

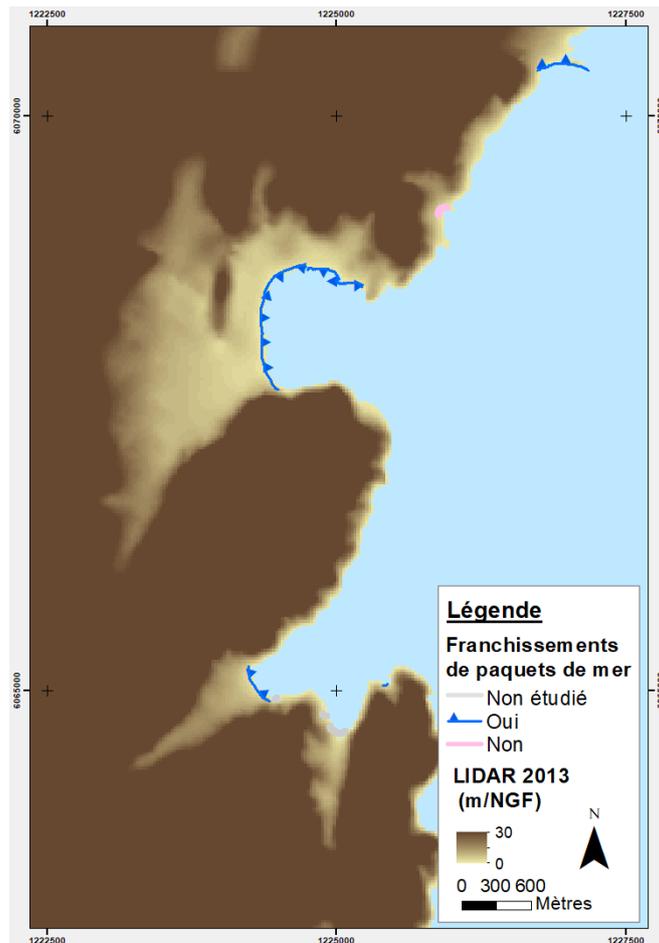


Figure 79 : Exposition aux franchissements de paquets de mer sur le secteur de Santa Giulia.

8.4. REPRÉSENTATION CARTOGRAPHIQUE DES FRANCHISSEMENTS DE PAQUETS DE MER, DES CHOCS MÉCANIQUES ET PROJECTIONS.

À la demande de la DDTM2A, l’atlas cartographique est réalisé au 1/10 000 avec le scan25 de l’IGN en fond support. Il présente les informations suivantes (Figure 80) pour chaque secteur homogène étudié :

- l’emprise des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines ainsi que les hauteurs d’eau pour le scénario actuel et le scénario 2100, tel qu’expliqué au paragraphe 7.4 et sur la Figure 67 ;
- une bande de sécurité forfaitaire de 50 m en hachuré marron afin de représenter les secteurs exposés aux franchissements de paquets de mer déterminés tel qu’expliqué précédemment;
- une bande de sécurité forfaitaire de 25 m en hachuré rouge afin de représenter les secteurs exposés aux chocs mécaniques et projections ;
- une zone en jaune correspondant aux zones mobiles et à la plage submersible par définition. Cette zone est comprise entre la limite haute de la plage (tel que présenté dans le paragraphe 7.3.1) et la limite inférieure du LIDAR 2013 de l’IGN. La plage étant une zone extrêmement mobile, aucune information de hauteur d’eau n’est fournie.

Les valeurs de ces 2 bandes ont été déterminées sur la base de la connaissance du terrain de la DDTM2A, des recommandations méthodologiques du guide PPR (MEDDE, mai 2014) ainsi que des calculs du BRGM pour les franchissements de paquets de mer.

L’emprise des cartes a été définie à une échelle 1/10 000 en A3 sur la base de critères géomorphologiques afin de ne pas « découper » les secteurs homogènes (Figure 81). Chaque commune dispose d’un lot de cartes fourni avec le SIG.

☞ Initialement non prévus à l’étude, les chocs mécaniques et les projections liés aux vagues qui représentent un aléa distinct (mais associé) de l’aléa submersion marine, ont été intégrés à la production cartographique de l’atlas, à la demande de la DDTM2A. L’identification des secteurs identifiés comme potentiellement exposés à ce phénomène a été réalisée en concertation entre le BRGM et la DDTM2A (cf. réunion du 19 novembre 2020) et n’est pas exhaustive à l’échelle de la Corse-du-Sud. Aucune étude technique spécifique n’a été réalisée. Leur représentation est fournie à titre indicatif et appliquée pour :

- les zones basses potentiellement exposées aux submersions marines ;
- les secteurs exposés aux franchissements de paquets de mer ;
- des secteurs complémentaires essentiellement au niveau de zones rocheuses (hors zones à falaises, pente abrupte et altitude supérieure à 6 m/NGF) et au droit de zones urbanisées qui ont été identifiés par la DDTM2A sur la base de sa connaissance terrain et historique.

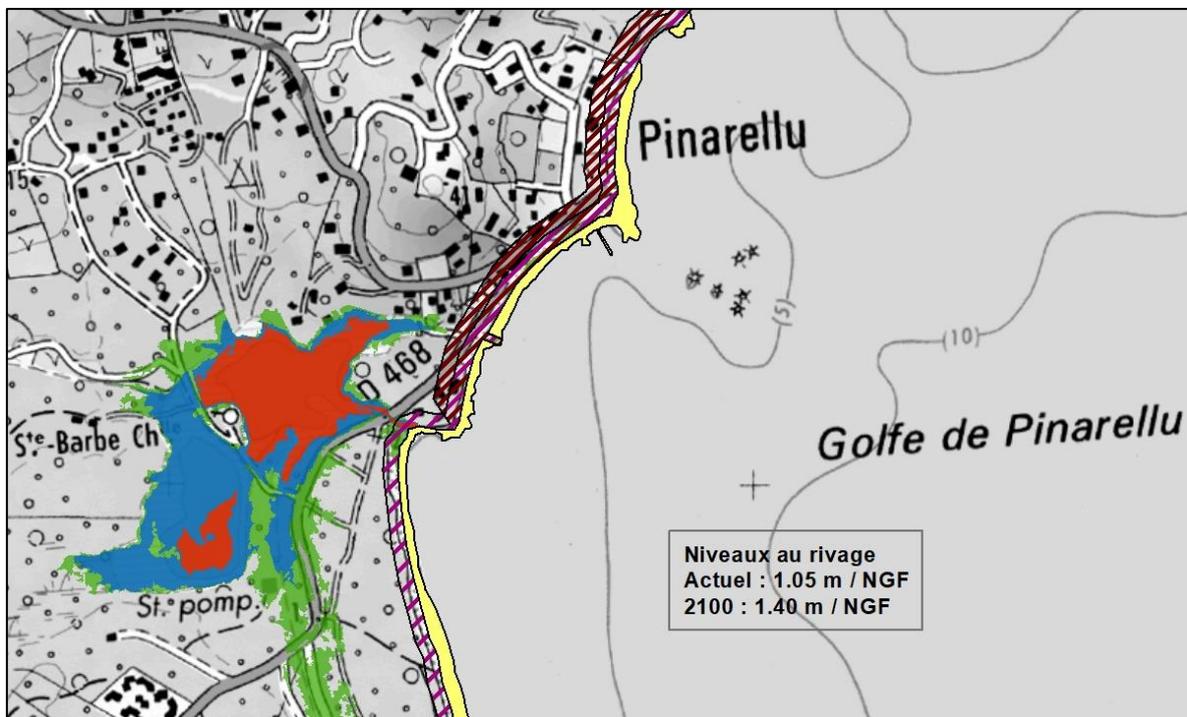


Figure 80 : Exemple de restitution cartographique des bandes liées aux franchissements de paquets de mer (hachuré marron) et aux chocs mécaniques et projections (hachuré violet) ainsi que de la plage (en jaune).

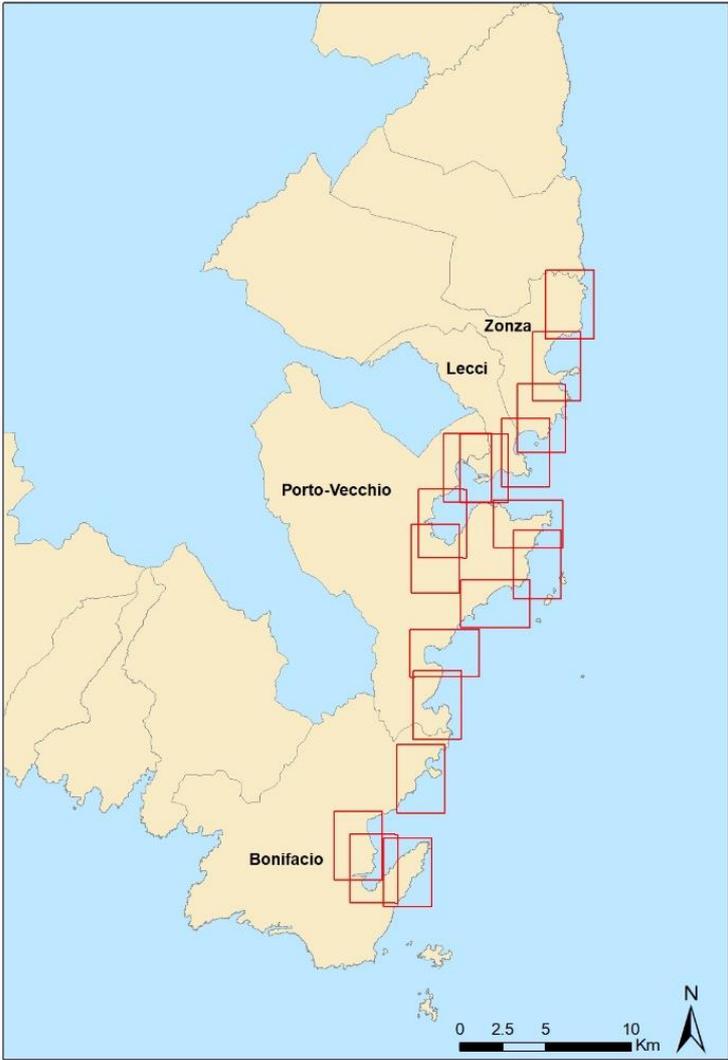


Figure 81: Calepinage de l’atlas cartographique des ZBPESM.

9. Mise en forme du SIG

Les résultats intermédiaires et finaux de l’étude sont mis en forme et restitués dans des formats numériques afin d’être exploités dans un Système d’Information Géographique (SIG).

Bien que le format COVADIS ne soit pas requis dans cette présente étude pour la restitution au format numérique des cartes et différentes couches de résultats, une présentation similaire a été choisie afin de faciliter l’homogénéisation avec les études engagées sur les autres secteurs en Corse.

C’est pourquoi, le fichier numérique au format shape des résultats finaux (« emprise des zones basses ») contient plusieurs champs correspondant aux informations suivantes : le nom de la commune, le numéro de la plage, la valeur de N_{tot} et le type d’évènement (« actuel » ou « 2100 »), la surface du polygone, le périmètre du polygone (Figure 82).

Des résultats intermédiaires sont également fournis dans un dossier dont l’arborescence est présentée (Figure 83). Il s’agit :

- des 3 Modèles Numériques de Terrain produits dans le cadre de la présente étude (l’emprise globale de résolution 50 m et les 2 emprises locales de résolution 10m) au format .grd ;
- d’un shape (polyligne) du trait de côte, découpé selon les secteurs homogènes et précisant la valeur du niveau marin au rivage retenues pour chaque secteur et pour les évènements « actuel » et « 2100 » ;
- un shape identifiant les zones basses déconnectées du trait de côte et d’une surface supérieure à 500 m² qui ont requis une analyse à dire d’expert. Les modalités de traitement y sont précisées ;
- un shape (polygone) des hauteurs d’eau pour l’évènement « actuel » ;
- un shape (polygone) des hauteurs d’eau pour l’évènement « 2100 » ;
- un shape (polygone) des emprises des ZBPESM pour un évènement « actuel » et un évènement « 2100 » ;
- un shape (polyligne) restituant les informations de la Figure 78 relative aux franchissements de paquets de mer ;
- les 2 shapes complémentaires réalisés à la demande de la DDTM de Corse-du-Sud pour la représentation 1/ des chocs mécaniques et projections liés aux vagues et 2/ de la zone mobile située entre le trait de côte et la limite inférieure du LIDAR 2013 (plage).

Le dossier cartographique fourni au format .pdf est produit tel que le fichier .mxd le présente, à partir : 1/ du shape des hauteurs d’eau pour l’évènement actuel ; 2/ du shape des emprises des zones basses ; 3/ du shape de la bande de sécurité de 50m liée aux franchissements de paquets de mer ; et enfin 4/ les 2 shapes complémentaires (chocs mécaniques et zone mobile).

Hormis pour les shapes fournis en compléments optionnels, chacun des autres shapes est fourni avec sa métadonnée au format INSPIRE.

Table

20190117_Emprises_ZonesBasses_SA

	FID	Shape *	Commune	Num plage	Ntot	Shape area	Shape Leng	Type
▶	0	Polygone	Bonifacio	32	1,4	5499,845047	1035,647148	2100
	1	Polygone	Bonifacio	15	1,35	61336,661233	2819,61883	2100
	2	Polygone	Bonifacio	14	1,35	999,162978	284,791144	2100
	3	Polygone	Bonifacio	12	1,35	2785,025252	584,983369	2100
	4	Polygone	Bonifacio	10	1,4	864,028801	571,107971	2100
	5	Polygone	Bonifacio	9	1,4	3995,90487	794,595681	2100
	6	Polygone	Bonifacio	8	1,4	94069,351248	3249,349266	2100
	7	Polygone	Bonifacio	2	1,35	69821,840027	4100,386294	2100

Figure 82 : Présentation des champs contenus dans le shape des emprises des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines.

- 01_MNTs
- 02_NiveauxMarins_Statiques_Rivages
- 03_ZonesBasses_DireExpert
- 04_HauteursEau_Actuel
- 05_HauteursEau_2100
- 06_Emprises_Actuel-2100
- 07_Franchissements
- 08_Complements_optionnels

Figure 83 : Arborescence du dossier numérique contenant les résultats intermédiaires et finaux.

10. Conclusion

Afin de réactualiser la cartographie des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines (AZS, 2014) en Corse, à l'échelle du 1/10 000, il a été élaboré et mis en œuvre une méthode permettant de prendre en compte les spécificités locales de la Corse (géomorphologiques et météo-marines). Cette méthode visant à **reproduire les conditions météo-marines pour des événements de référence centennaux** (hauteur significative, période et direction pics des vagues, vitesse et direction du vent) et à **calculer les niveaux marins résultants au rivage** (contribution de la marée et des surcotes atmosphérique et liée aux vagues) repose sur des analyses statistiques dites de « probabilités conjointes trivariées » ainsi que des modélisations numériques (SWAN et SWASH-2DH).

Une **phase préliminaire conséquente a consisté à préparer les données météo-marines et topo-bathymétriques**. Des simulations rétrospectives ont été spécifiquement générées pour cette étude afin de compléter le peu de données de niveaux d'eau (seulement 2 marégraphes : Ajaccio et Solenzara). Plusieurs sources de données de vagues (mesures et simulations rétrospectives) ont été comparées afin d'utiliser celles présentant les meilleures qualités pour des analyses statistiques d'extrêmes (données NWW3-MED retenues, 1975 - 2010). Enfin, l'ensemble des données topo-bathymétriques disponibles ont été compilées et traitées afin de constituer des Modèles Numériques de Terrain sur la zone d'étude (résolution 10m).

Les analyses statistiques trivariées (vent, vagues et niveaux d'eau) ont permis de déterminer **les caractéristiques d'évènement météo-marins au large de période de retour combinée centennale**. Plusieurs combinaisons centennales considérées représentatives ont été retenues et exploitées en paramètres d'entrées (forçages) des modèles numériques permettant le **calcul des niveaux marins résultants au rivage pour l'évènement « actuel » et pour l'évènement « 2100 »**. En complément de ces résultats de modélisation numérique, une expertise basée sur la connaissance historique et terrain ainsi qu'une approche géomatique a permis de **retenir pour chaque secteur géomorphologiquement homogène, un niveau marin de référence au rivage**.

La cartographie des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines (ZBPESM) issue d'une approche dite « statique » correspond à la projection du niveau marin de référence sur le MNT topographique pour chaque secteur homogène. Cette approche qui ne reproduit pas la dynamique de propagation de la submersion marine, fournit une **estimation des emprises de submersions marines** avec des possibilités à la fois de sous-estimation (non prise en compte des conjonctions avec des crues par exemple) et de surestimation (non prise en compte de la durée de l'évènement par exemple).

Cette approche cartographique « statique » est complétée par une **identification des secteurs pour lesquels les franchissements de paquets de mer sont susceptibles de générer des submersions marines**. L'exploitation du modèle numérique SWASH en mode « profil » a par exemple permis d'identifier les fronts de mer et cordons dunaires que le jet de rive est susceptible de franchir (niveau maximal atteint par les vagues sur les plages après le déferlement des vagues, Figure 1).

La cartographie finale représente l'**emprise des zones basses potentiellement exposées aux submersions marines pour deux évènements météo-marins centennaux « actuel » et « 2100 »**. Ce dernier intègre une marge d'élévation du niveau de la mer (40 cm par rapport à l'évènement « actuel », soit 60 cm au total) liée à l'impact du changement climatique conformément aux recommandations du ministère (MEDDE, mai 2014). La cartographie

représente également au sein de l’emprise de l’évènement « **actuel** », **les zones de hauteur d’eau inférieures et supérieures à 50 cm.**

Les secteurs pour lesquels les franchissements de paquets de mer sont susceptibles de générer une submersion marine ont été identifiés. Ces franchissements sont basés sur la topographie actuelle, sans prise en compte de ruptures d’ouvrages ou de brèches dans les cordons dunaires. Ils sont localisés sur la carte par une bande de sécurité forfaitaire de 50 m à la demande de la DDTM de Corse-du-Sud, sur la base des recommandations ministérielles (guide PPRL du MEDDE de mai 2014).

Le phénomène de chocs mécaniques et projections liés aux vagues initialement non prévus à l’étude a été intégré à la demande de la DDTM de Corse-du-Sud qui a souhaité une représentation cartographique par une bande de sécurité forfaitaire de 25 m conformément aux recommandations ministérielles (guide PPRL du MEDDE de mai 2014). L’identification des secteurs potentiellement exposés à ce phénomène n’est pas exhaustive à l’échelle de la Corse-du-Sud. La représentation est fournie à titre indicatif au droit des zones basses, des secteurs exposés aux franchissements de paquets de mer ainsi qu’au droit de secteurs complémentaires identifiés par la DDTM de Corse-du-Sud (secteurs urbanisés essentiellement, secteurs rocheux hors falaises).

Ce premier rapport réalisé à la demande de la DDTM de Corse du Sud concerne le linéaire côtier allant de la zone du **golfe de Sant’Amanza (commune de Bonifacio) à Zonza**. La méthode déployée dans le présent rapport est également en cours d’application à l’échelle de tout le littoral de la Corse potentiellement exposé aux submersions marines (reste du linéaire de Corse du Sud et Haute Corse).

La cartographie produite ne se substitue pas à une carte d’aléa submersion marine, la dynamique de la submersion n’étant pas prise en compte (durée de l’évènement, vitesse de l’écoulement de l’eau, entrée d’eau préférentielles, occupation du sol, etc.).

En revanche, la méthode mise en œuvre a permis d’aboutir à un nouvel atlas, type AZS à une échelle du 1/10 000, avec des niveaux marins au rivage centennaux « actuels » et « 2100 », régionalisés par tronçons de littoral.

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., E. Rogers, A. Babanin, J.-F. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. van der Westhuysen, P. Queffeuilou, J.-M. Lefevre, L. Aouf, & F. Collard** (2010) - Semi-empirical dissipation source functions for wind-wave models: part I, definition, calibration and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, 40(9):1917–1941.
- Belon R. et Bodéré G.** (2016) – Réseau d'Observation du Littoral de la Corse. Rapport d'observation 2015. Rapport BRGM/RP-66351-FR, 111p, 66 ill.
- Booij N., Ris R.C. and Holthuijsen L.H.**, (1999) – A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation, *J. Geophys. Res.*, **104**, C4, 7649-7666.
- CEREMA et DREAL Corse** (2014) – Traitement du MNT Lidar sur le littoral Corse. 12p.
- 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.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fisher E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J.** (2015) - *System for Automated Geoscientif Analyses (SAGA) v.2.1.4*. *Geosci. Model Dev.*, 8, 1991-2007. doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.
- Delpont G., Robelin Ch., Oliveros C.** (1998) – Littoral septentrional et sud-oriental Corse : Evolution du trait de côte de 1951 à 1996. Etude de 40 plages des Agriates au golfe de Sant'Amanza. Rapport BRGM R 40290, 173p.
- 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.
- Gouldby B., Mendez F.J., Guancho 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. 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.

Lazure P. et Dumas F. (2008) - An external–internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS), *Advances in Water Resources*, **31**, 233-250.

Lyard F., Lefevre F., Letellier T., Francis O. (2006) – Modelling the global ocean tides : modern insight from FES2004 Ocean Dynamics, *56*, 394-415.

Mallet C. et Michot A. avec la collaboration de De La Torre Y., Lafon V., Prevotieux B. (2012) – Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte – Rapport BRGM/RP-60616-FR, 162p., 100fig., 7 ann.

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

MEDDEM (Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer) (2010) – La gestion du trait de côte. Quae. 978-2-7592-0360-4, 290p.

MétéoFrance (2008) – Rapport météorologique, procédure de reconnaissance de catastrophe naturelle “phénomènes liés à l'action de la mer”. Tempête-Chocs mécaniques des vagues-submersions marines du 27 au 29 novembre 2008. Référence DIRSE/CDM2B/n°572, 7p., Note rédigée par JP. Rambaud, Délégué départemental MétéoFrance Haute-Corse.

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.

Pluquet F. (2006) – Evolution récente et sédimentation des plates-formes continentales de la Corse. Thèse de doctorat de l'Université de Corte – Pascal Paoli, 307p.

Saha, S., et al. (2010) - The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of American Meteorological Society*, **91**, 1015-1057.

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

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

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

Stepanian A., Balouin Y., Belon R. et Bodéré G. (2011) – ROL – Etude complémentaire sur le littoral de la Plaine Orientale de Corse – Etat des connaissances sur les impacts des tempêtes sur le littoral. Rapport final. Rapport BRGM/RP-59046-FR, 137 p., 64 ill., 4 ann.

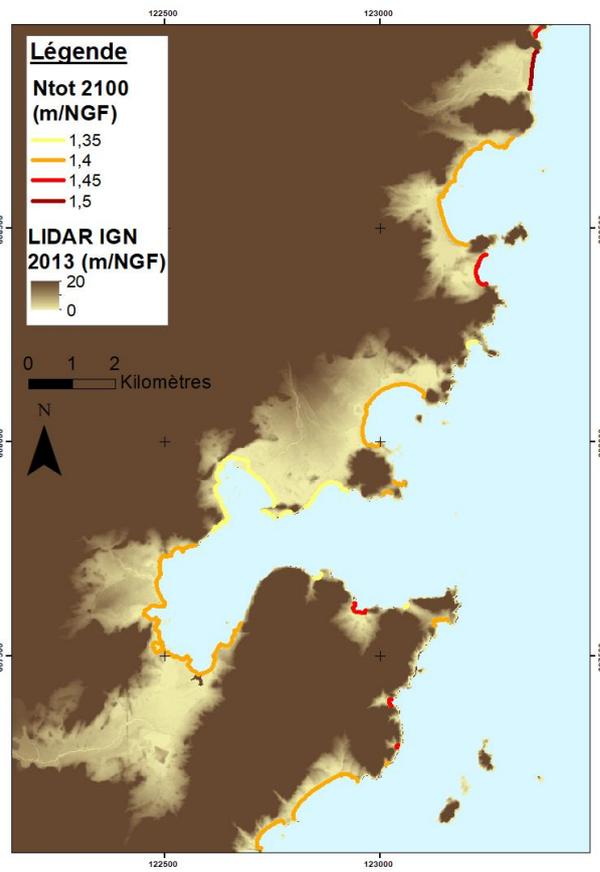
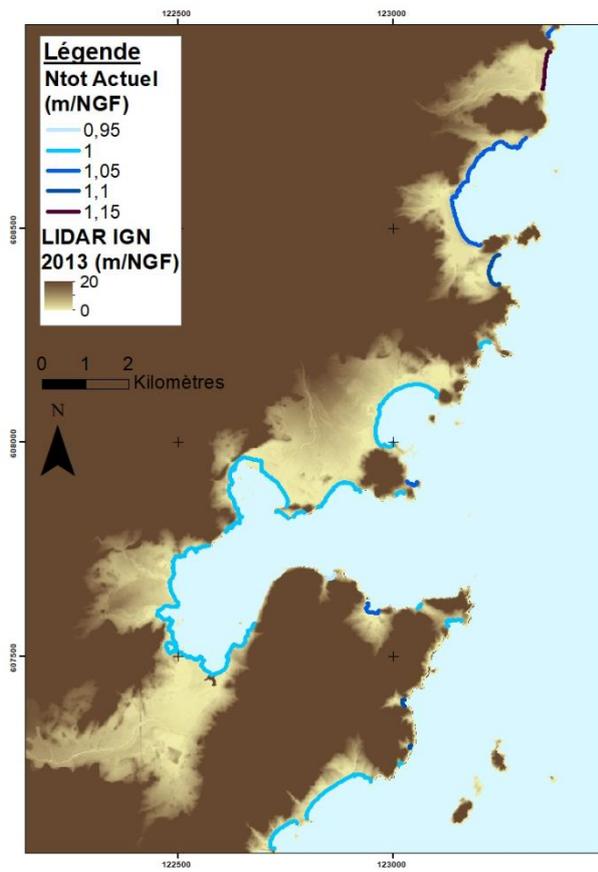
Wessel P., Smith W. H. F., Scharroo R., Luis J., Wobbe F. (2013) - Generic Mapping Tools: Improved Version Released. *EOS Trans. AGU*, **94**(45), 409-410. doi:10.1002/2013EO450001.

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

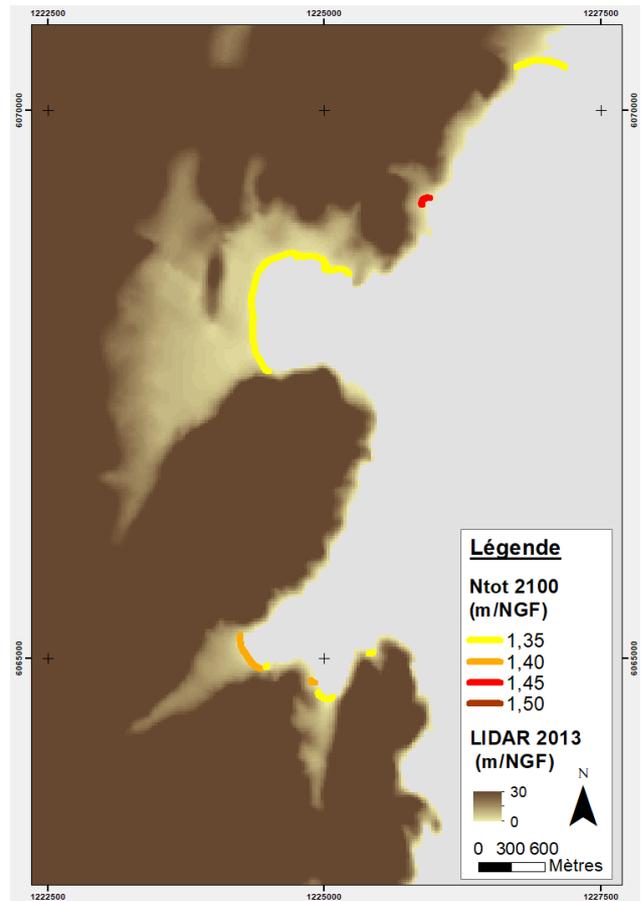
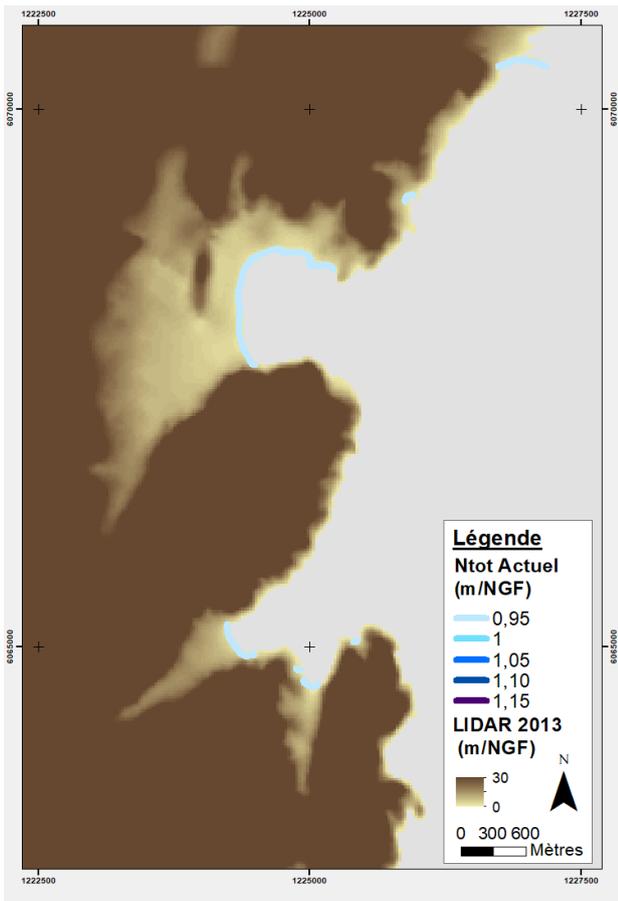
Annexe 1

Niveaux marins au rivage retenus pour chaque secteur homogène et pour les événements « actuel » et « 2100 »

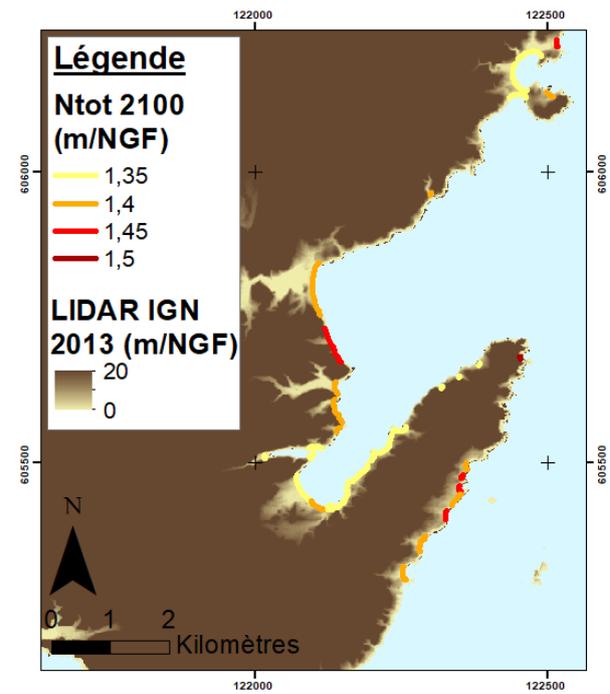
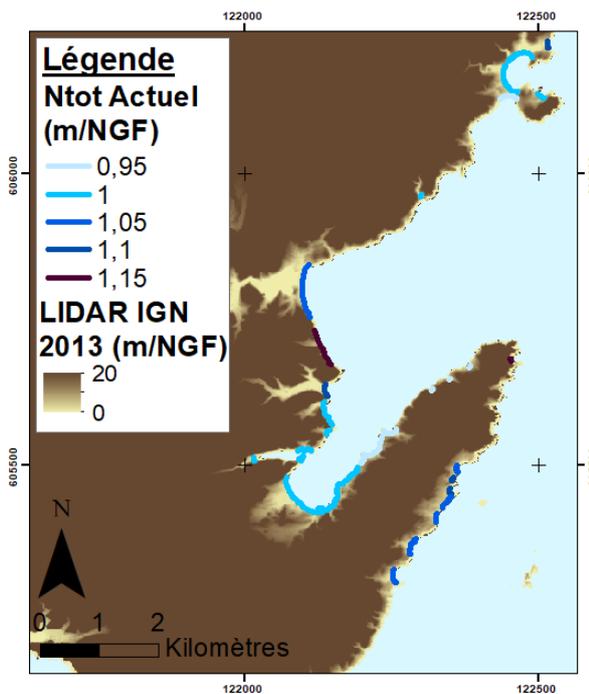
Secteurs de Porto-Vecchio :



Secteurs de Santa Giulia :



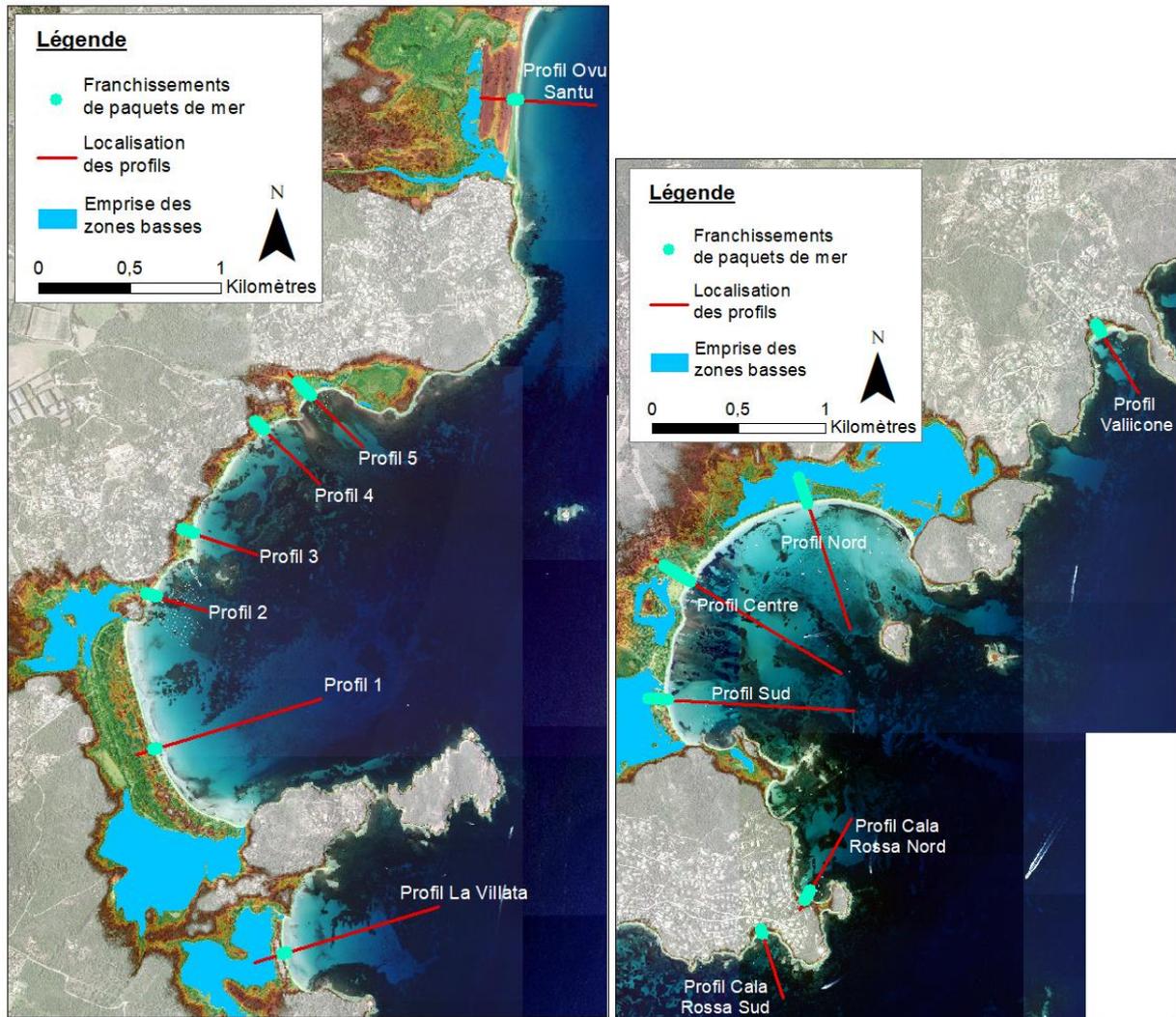
Secteurs de Sant’Amanza :



Annexe 2

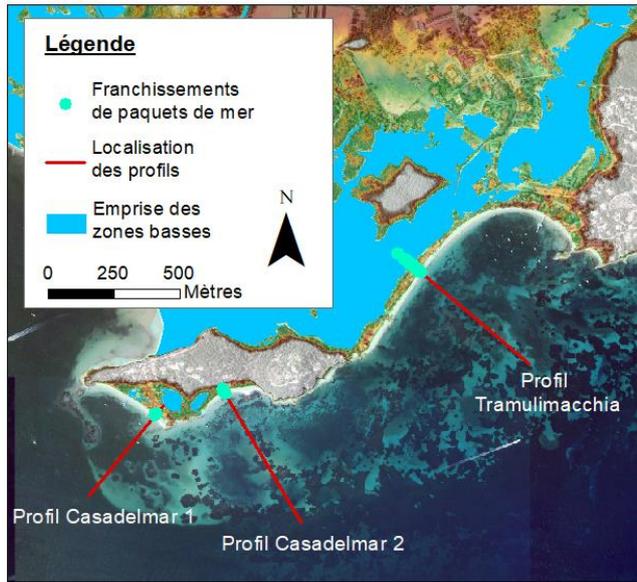
Localisation des profils pour l’étude des franchissements de paquets de mer

Communes de Zonza et Lecci

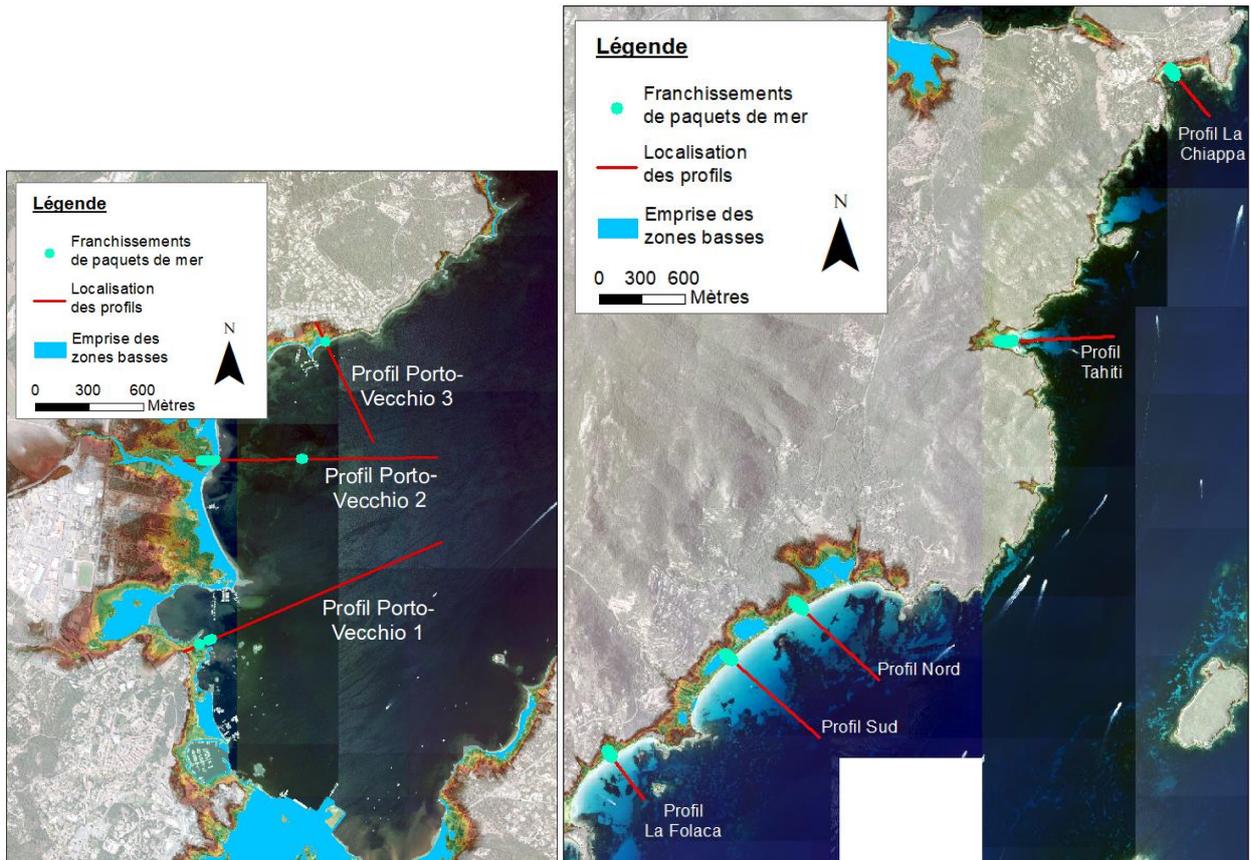


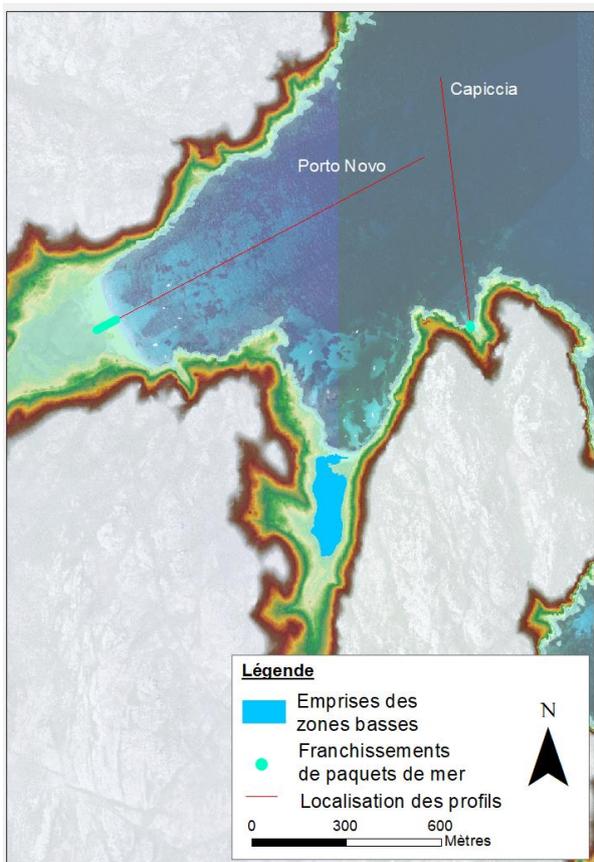
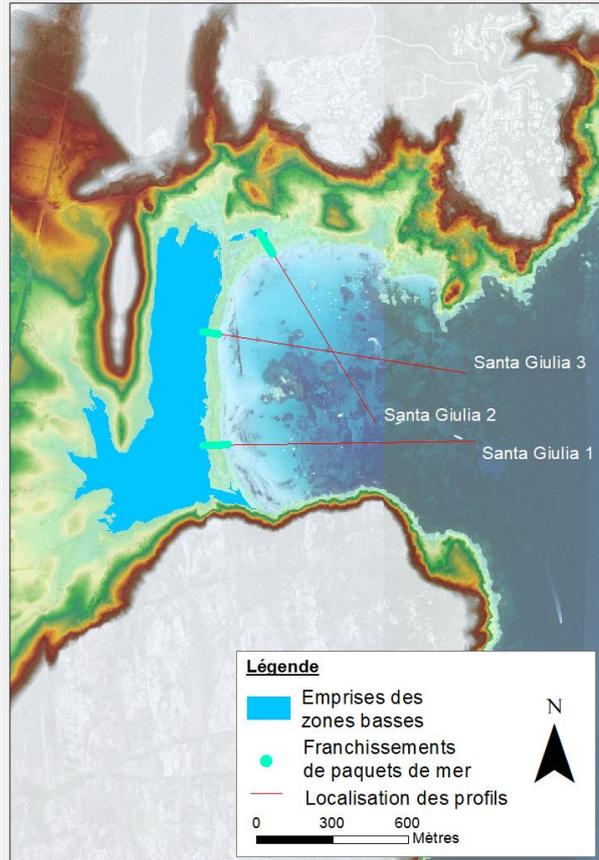
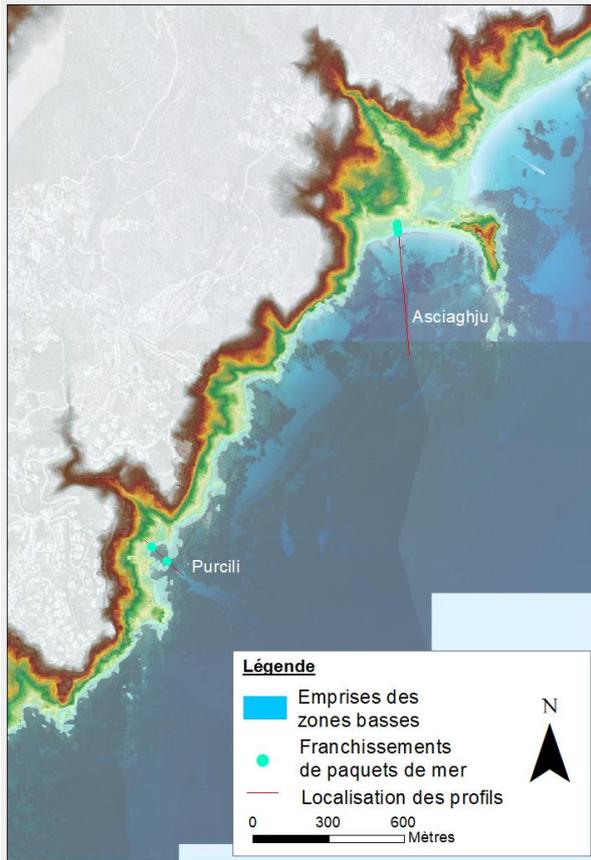
Données IGN en fond cartographique : orthophotographie de 2016 et LIDAR 2013

Commune de Lecci :



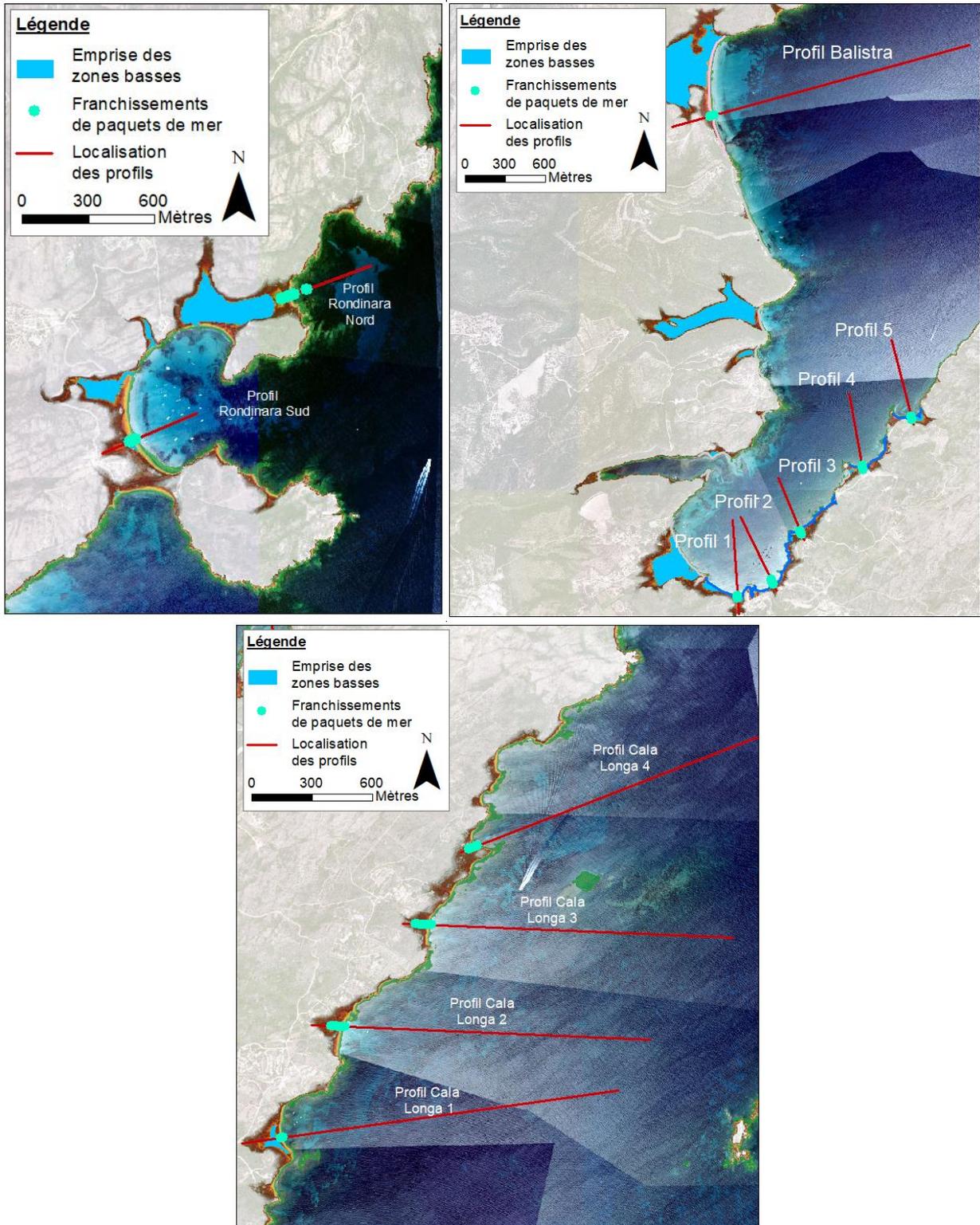
Commune de Porto-Vecchio :





Données IGN en fond cartographique : orthophotographie de 2016 et LIDAR 2013

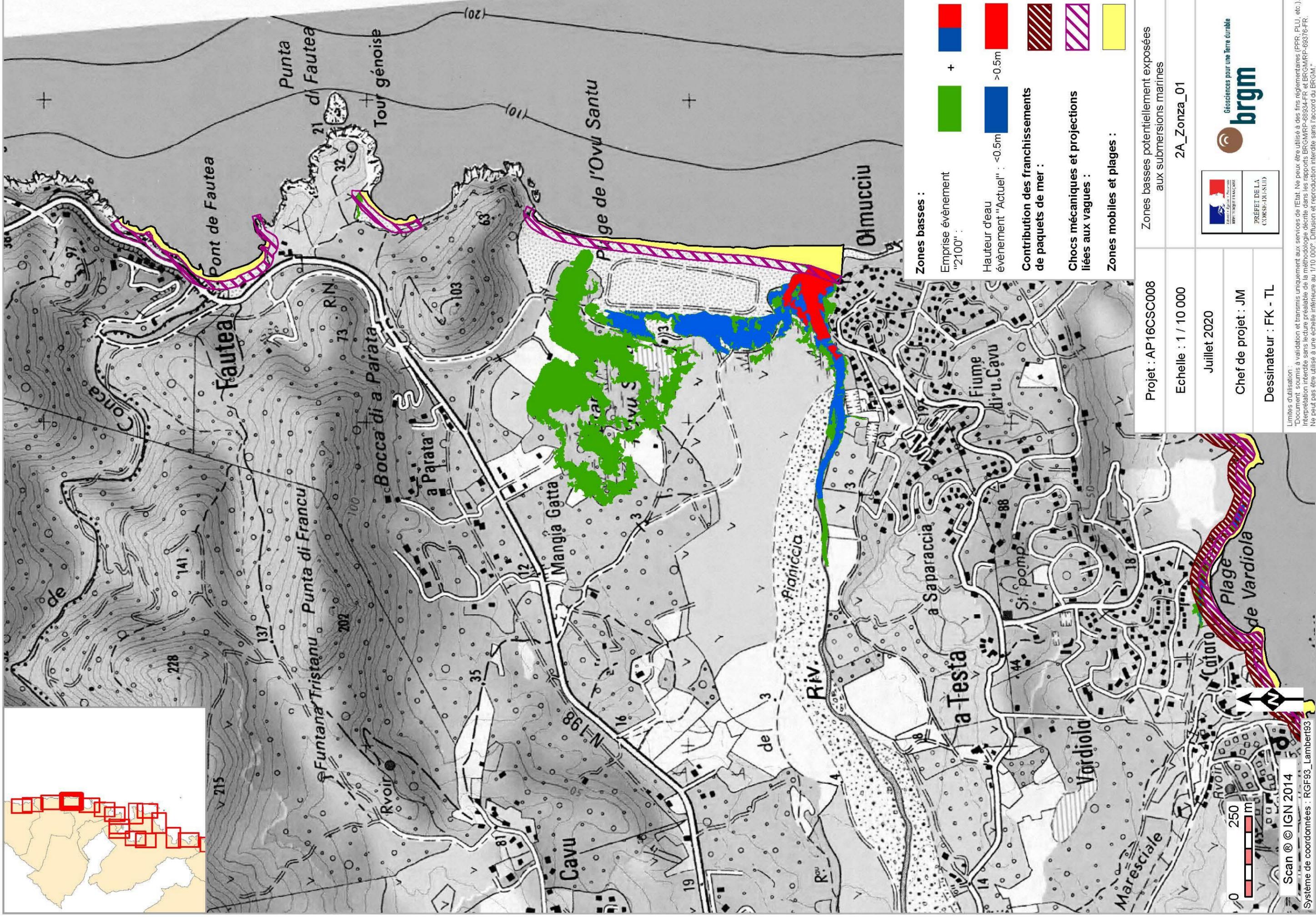
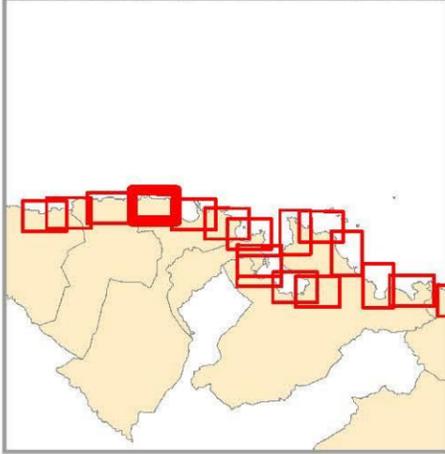
Commune de Bonifacio :



Données IGN en fond cartographique : orthophotographie de 2016 et LIDAR 2013

Annexe 3

Cartes des zones basses potentiellement inondables par submersion marine



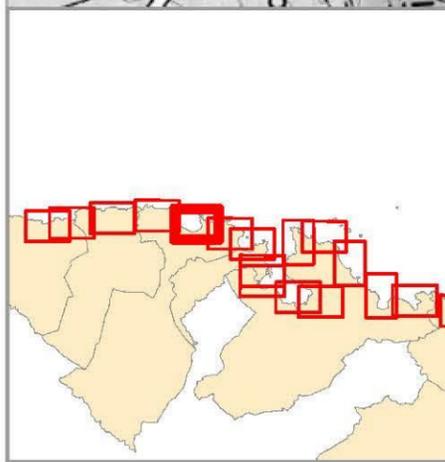
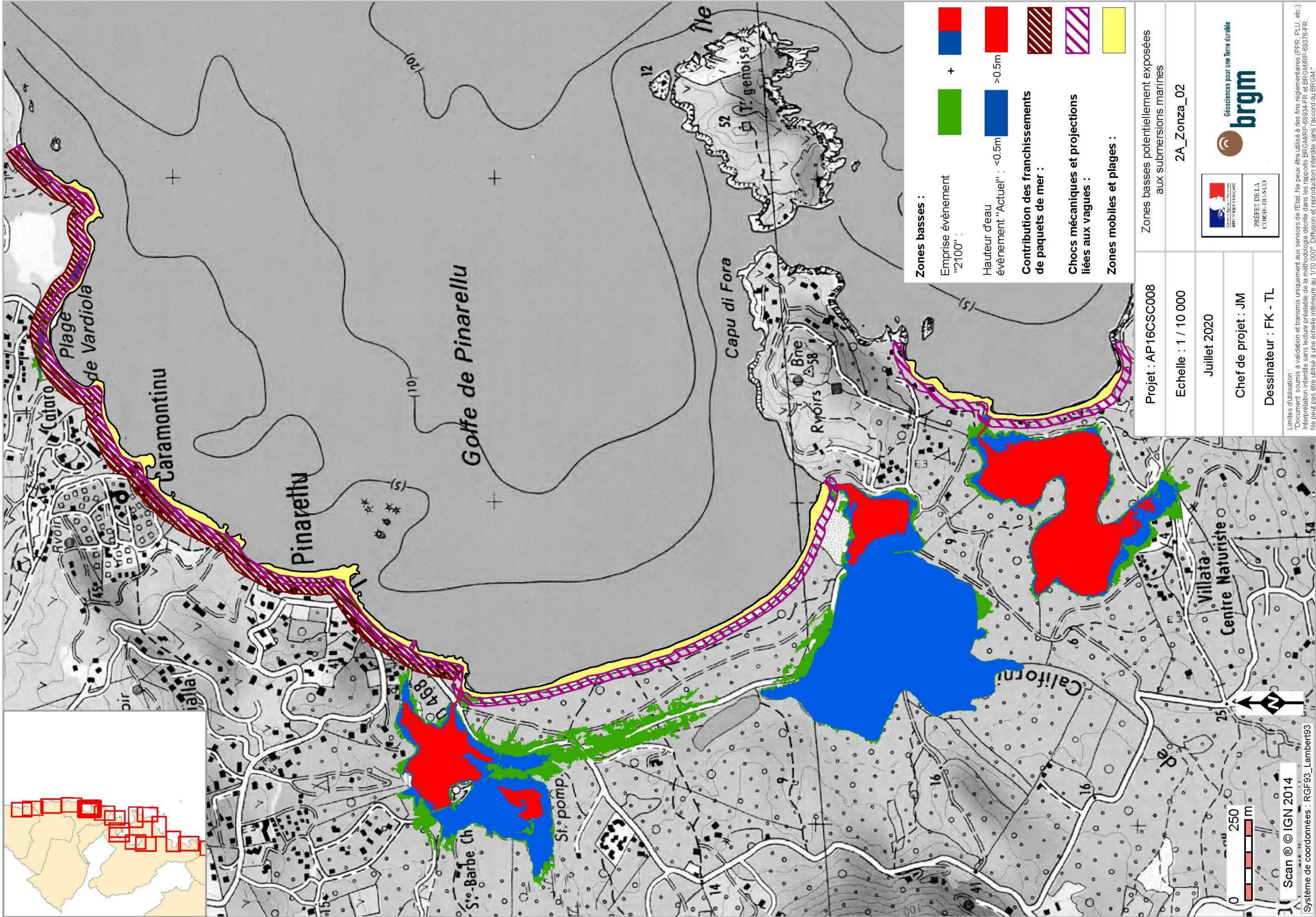
- Zones basses :**
- Emprise événement "2100" : +
 - Hauteur d'eau événement "Actuel" : <0.5m >0.5m
 - Contribution des franchissements de paquets de mer :
 - Chocs mécaniques et projections liées aux vagues :
 - Zones mobiles et plages :

Projet : AP16CSC008	Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines
Echelle : 1 / 10 000	2A_Zonza_01
Juliet 2020	
Chef de projet : JM	
Dessinateur : FK - TL	



Scan © IGN 2014
 Système de coordonnées : RGF93_Lambert93

Limites d'utilisation :
 "Document soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Ne peut être utilisé à des fins réglementaires (PPR, PLU, etc.).
 Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans les rapports BRGM/MP-68934-FR et BRGM/MP-69376-FR.
 Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10 000". Diffusion et reproduction interdites sans l'accord du BRGM."

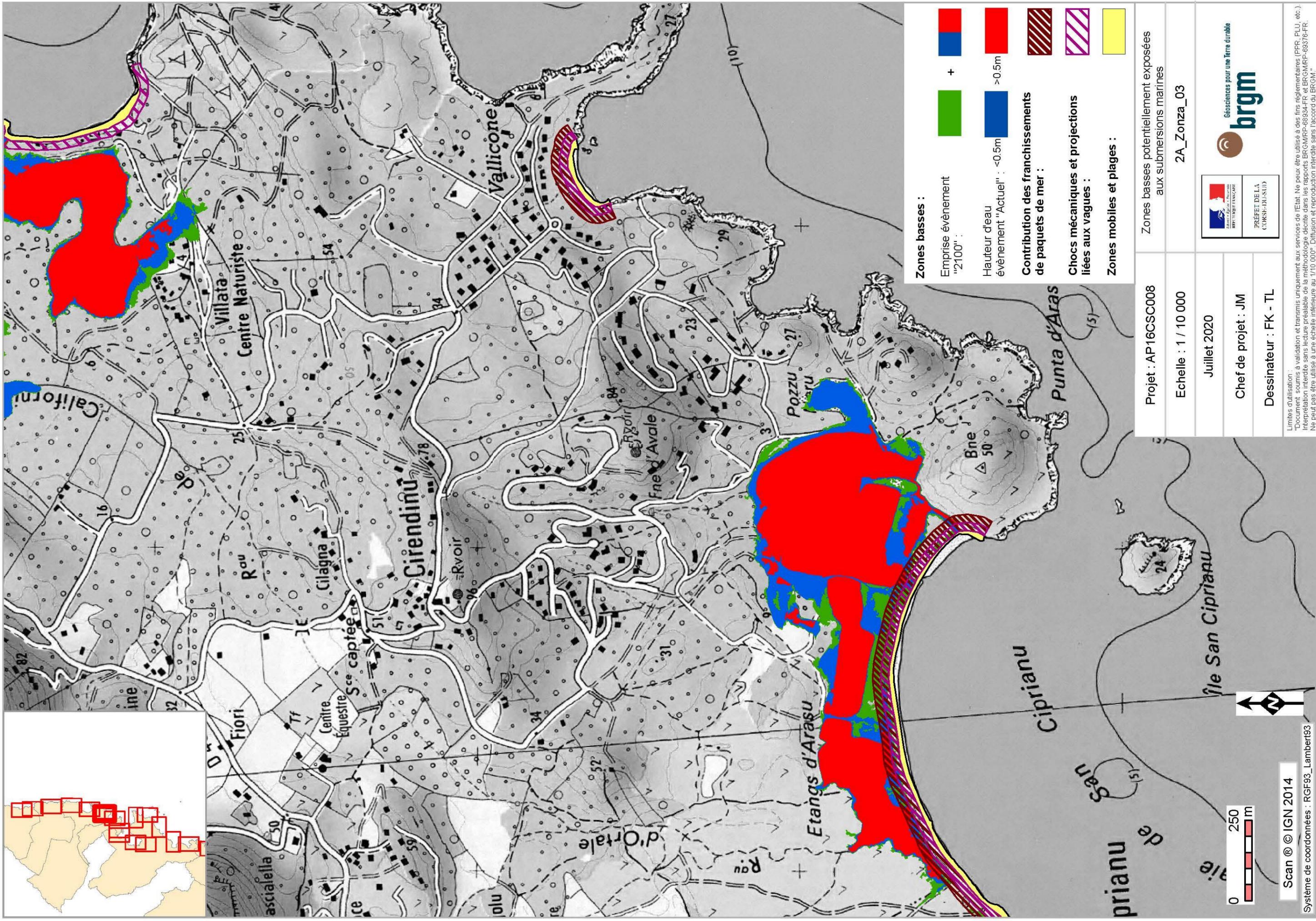


Zones basses :

- Emprise événement "2100" : +
- Hauteur d'eau événement "Actuel" : <0.5m >0.5m
- Contribution des franchissements de paquets de mer :
- Chocs mécaniques et projections liées aux vagues :
- Zones mobiles et plages :

Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines	
Projet : AP16CSC008	2A_Zonza_02
Echelle : 1 / 10 000	Juillet 2020
Chef de projet : JM	
Dessinateur : FK - TL	
<small>Préfecture de la Corse-du-Sud</small> <small>Préfecture de la Corse-du-Sud</small>	

Limites d'utilisation :
 "Document soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Ne peut être utilisé à des fins réglementaires (PPR, PLU, etc.).
 Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans les rapports BRGM/FP-68934-FR et BRGM/FP-68376-FR.
 Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10 000". Diffusion et reproduction interdites sans l'accord du BRGM."

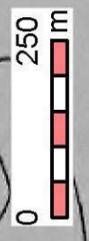
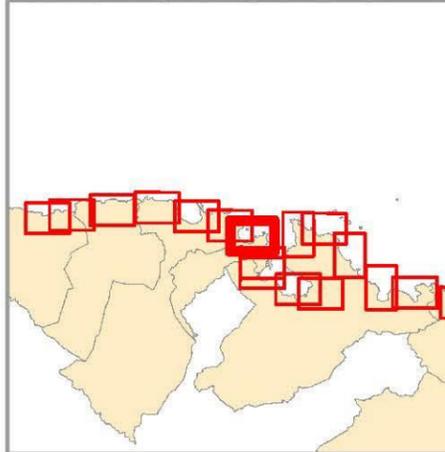
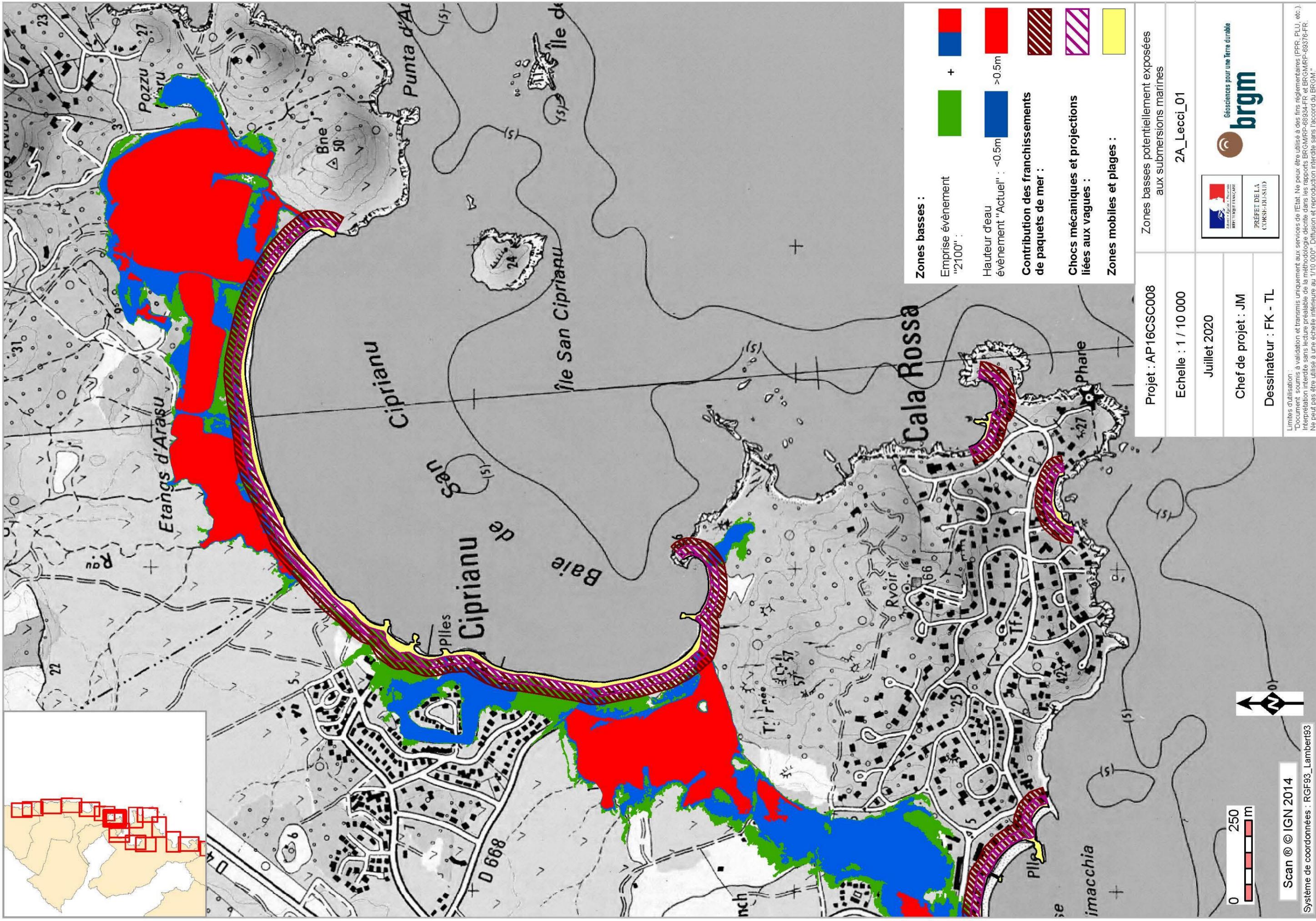


- Zones basses :**
- Emprise évènement "2100" : +
 - Hauteur d'eau évènement "Actuel" : <0.5m >0.5m
 - Contribution des franchissements de paquets de mer :
 - Chocs mécaniques et projections liées aux vagues :
 - Zones mobiles et plages :

Projet : AP16CSC008	Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines
Echelle : 1 / 10 000	2A_Zonza_03
Juliet 2020	
Chef de projet : JM	
Dessinateur : FK - TL	



Limites d'utilisation :
 "Document soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Ne peut être utilisé à des fins réglementaires (PPR, PLU, etc.).
 Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans les rapports BRGM/FP-68934-FR et BRGM/FP-689376-FR.
 Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10 000". Diffusion et reproduction interdites sans l'accord du BRGM."

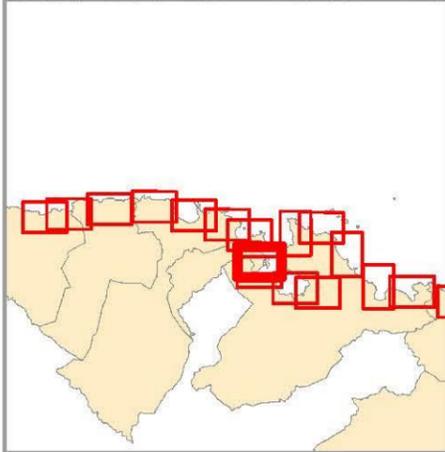
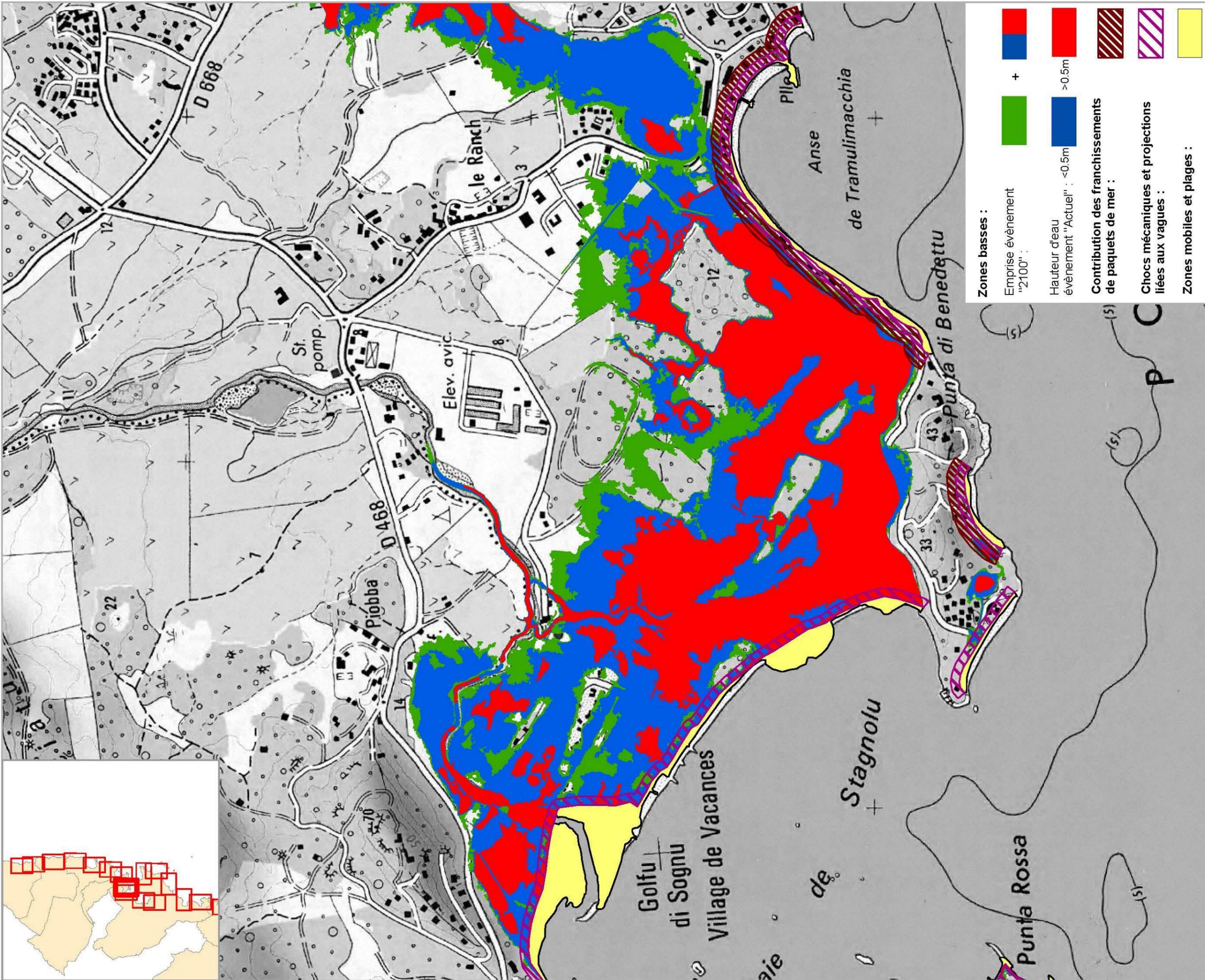


Zones basses :

- Emprise événement "2100" : +
- Hauteur d'eau événement "Actuel" : <0.5m >0.5m
- Contribution des franchissements de paquets de mer :
- Chocs mécaniques et projections liées aux vagues :
- Zones mobiles et plages :

Projet : AP16CSC008	Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines	
Echelle : 1 / 10 000		2A_Lecci_01
Juillet 2020		
Chef de projet : JM		
Dessinateur : FK - TL		

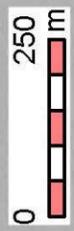




Zones basses :

- Emprise événement "2100" : +
- Hauteur d'eau événement "Actuel" : <0.5m >0.5m
- Contribution des franchissements de paquets de mer :
- Chocs mécaniques et projections liées aux vagues :
- Zones mobiles et plages :

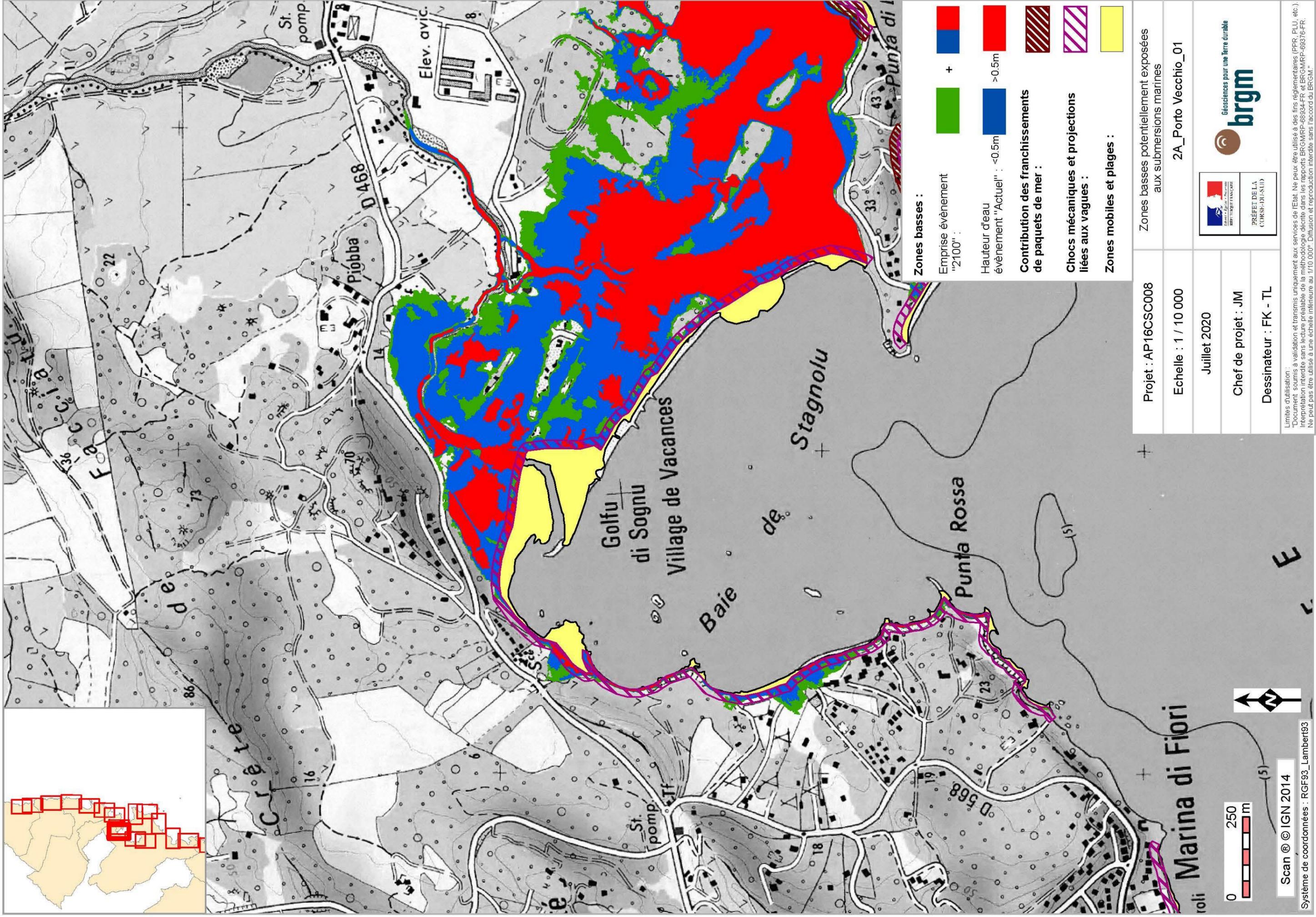
Projet : AP16CSC008	Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines	
Echelle : 1 / 10 000	2A_Lecci_02	
Juillet 2020		
Chef de projet : JM		
Dessinateur : FK - TL		



Scan © IGN 2014

Système de coordonnées : RGF93_Lambert93

Limites d'utilisation :
 "Document soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Ne peut être utilisé à des fins réglementaires (PPR, PLU, etc.).
 Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans les rapports BRGM/FP-6934-FR et BRGM/FP-69376-FR.
 Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10 000". Diffusion et reproduction interdite sans l'accord du BRGM."



Zones basses :

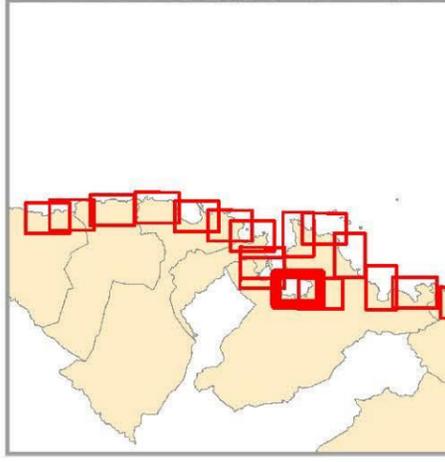
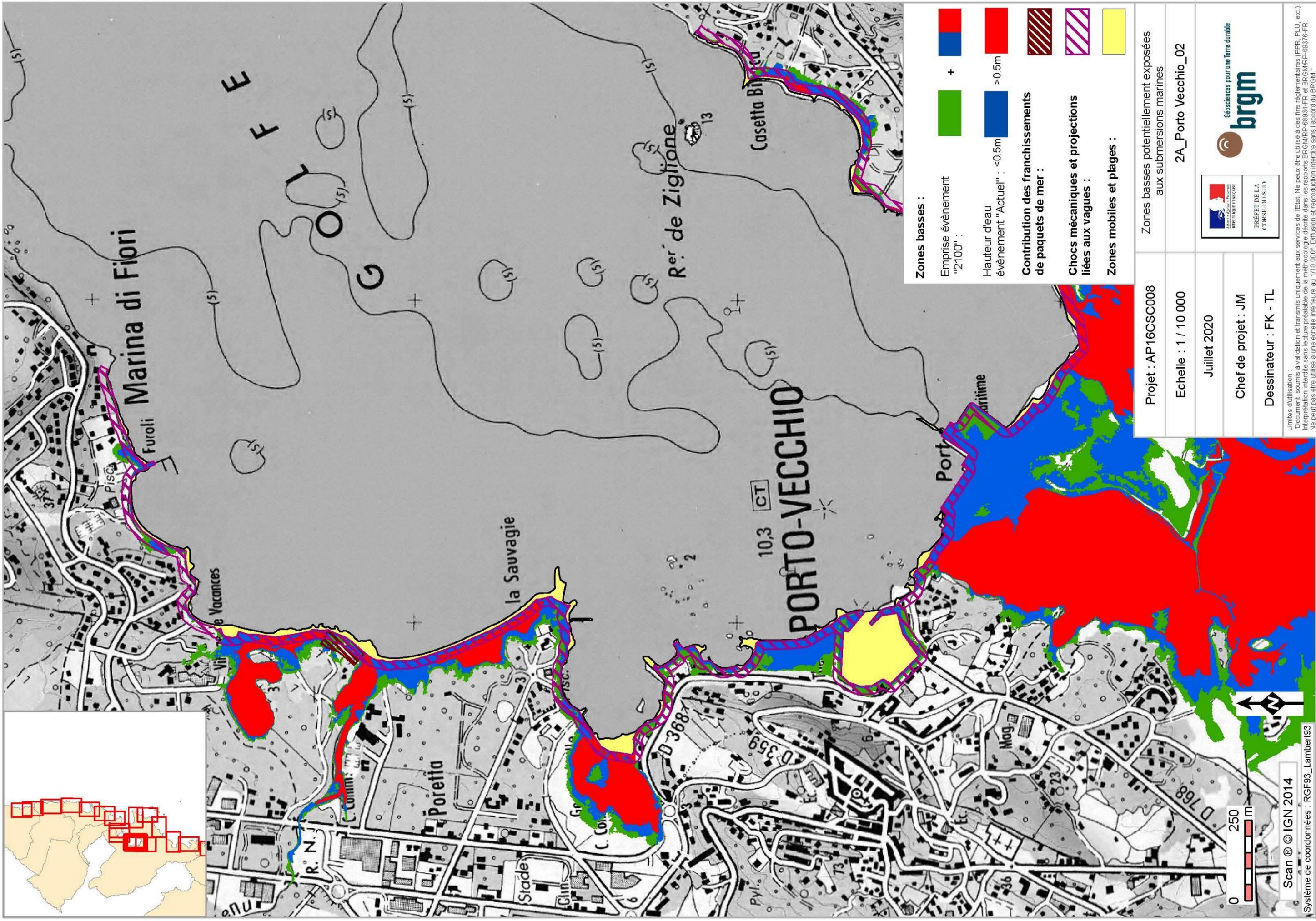
- Emprise événement "2100" : ■ + ■
- Hauteur d'eau événement "Actuel" : ■ >0.5m ■ <0.5m
- Contribution des franchissements de paquets de mer : ▨
- Chocs mécaniques et projections liées aux vagues : ▨
- Zones mobiles et plages : ■

Projet : AP16CSC008	Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines	
Echelle : 1 / 10 000	2A_Porto Vecchio_01	
Juillet 2020		
Chef de projet : JM		
Dessinateur : FK - TL		

Limites d'utilisation :
 "Document soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Ne peut être utilisé à des fins réglementaires (PPR, PLU, etc.)
 Interdiction formelle de la réimpression, de la diffusion ou de la reproduction sans l'accord du BRGM."
 Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10 000. Diffusion et reproduction interdites sans l'accord du BRGM."



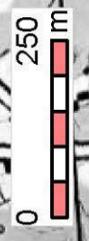
Géosciences pour une terre durable
brgm



Zones basses :

- Emprise événement "2100" : +
- Hauteur d'eau événement "Actuel" : <0.5m >0.5m
- Contribution des franchissements de paquets de mer :
- Chocs mécaniques et projections liées aux vagues :
- Zones mobiles et plages :

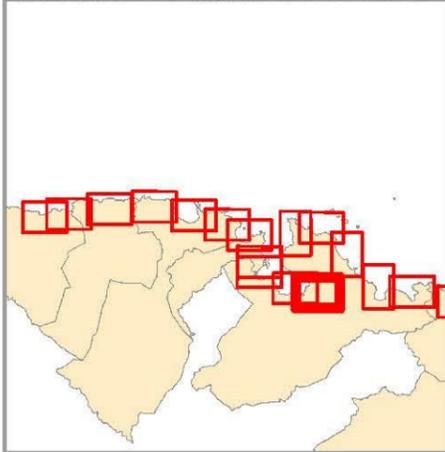
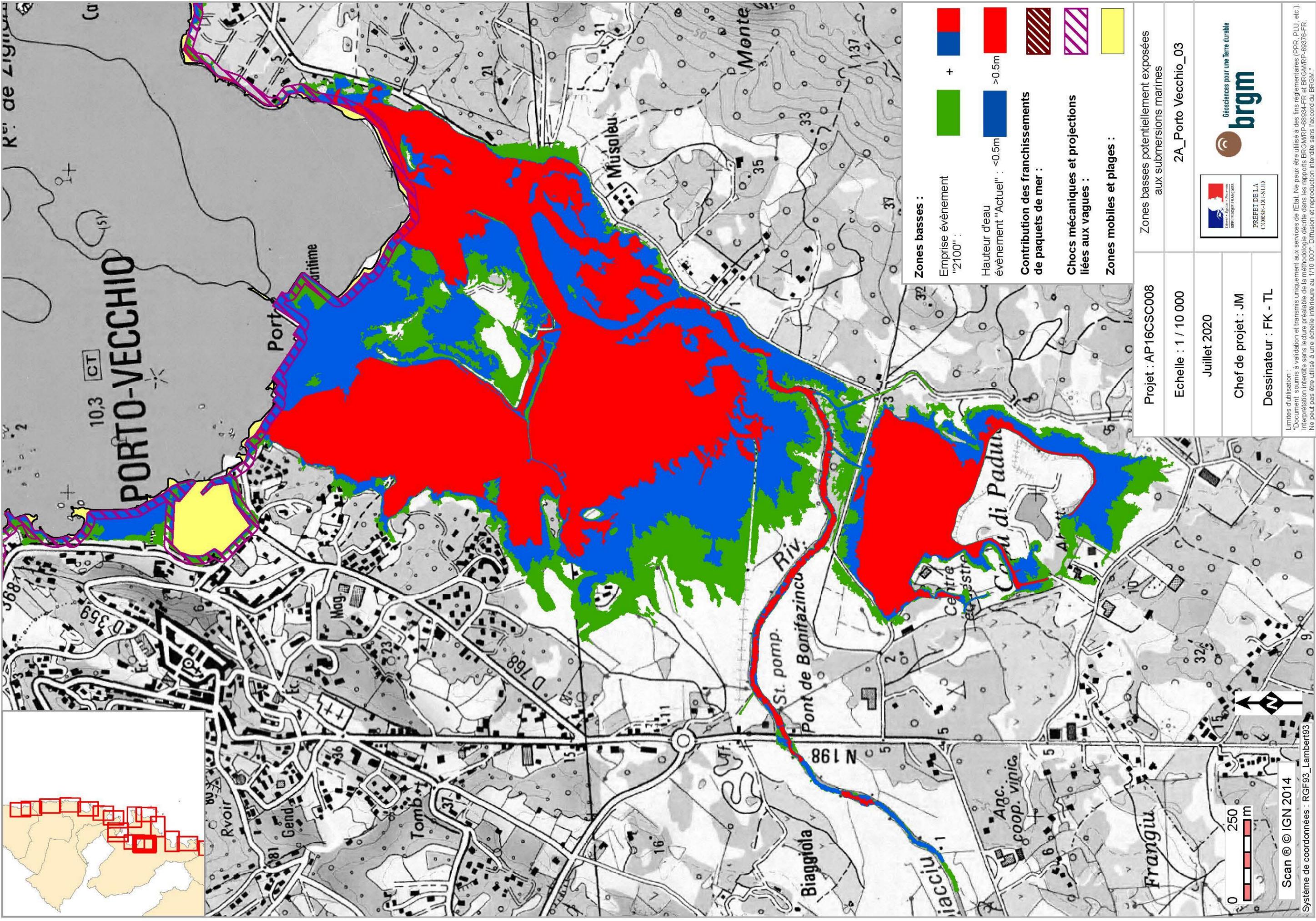
Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines	
Projet : AP16CSC008	2A_Porto Vecchio_02
Echelle : 1 / 10 000	Juillet 2020
Chef de projet : JM	
Dessinateur : FK - TL	



Scan © IGN 2014

Système de coordonnées : RGF93_Lambert93

Limites d'utilisation :
 "Document soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Ne peut être utilisé à des fins réglementaires (PPR, PLU, etc.).
 Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans les rapports BRGM/RP-68934-FR et BRGM/RP-69376-FR.
 Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10 000". Diffusion et reproduction interdites sans l'accord du BRGM."



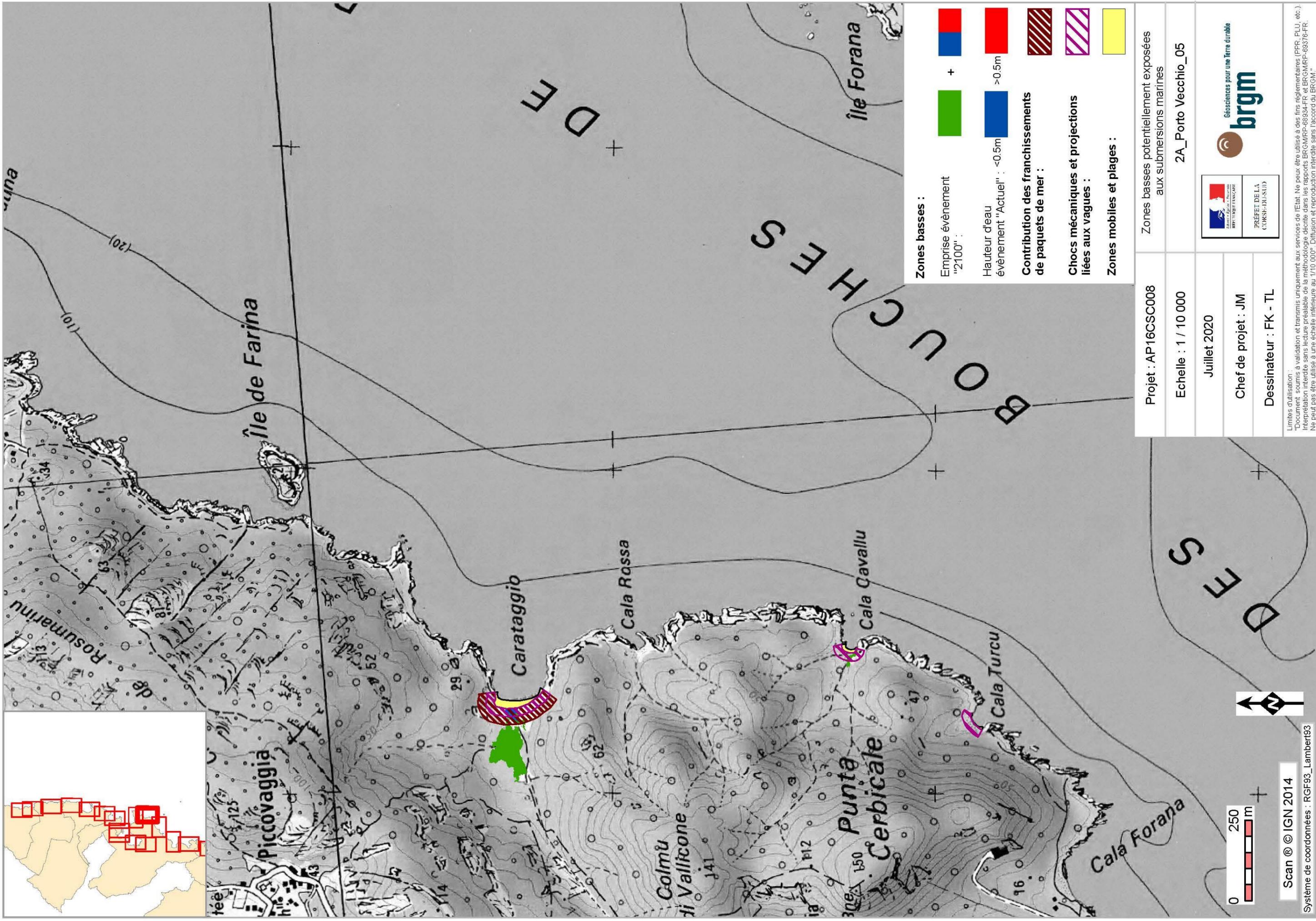
- Zones basses :**
- Emprise événement "2100" : +
 - Hauteur d'eau événement "Actuel" : <0.5m >0.5m
 - Contribution des franchissements de paquets de mer :
 - Chocs mécaniques et projections liées aux vagues :
 - Zones mobiles et plages :

Projet : AP16CSC008	Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines	
Echelle : 1 / 10 000	2A_Porto Vecchio_03	
Juillet 2020	 GÉOSCIENCES pour une terre durable 	
Chef de projet : JM Dessinateur : FK - TL		

Limites d'utilisation :
 "Document soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Ne peut être utilisé à des fins réglementaires (PPR, PLU, etc.).
 Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans les rapports BRGM/FP-68934-FR et BRGM/FP-69376-FR.
 Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10 000". Diffusion et reproduction interdite sans l'accord de BRGM."

Scan © IGN 2014

Système de coordonnées : RGF93_Lambert93

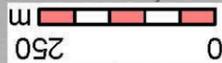


Zones basses :

- Emprise événement "2100" : +
- Hauteur d'eau événement "Actuel" : <0.5m >0.5m
- Contribution des franchissements de paquets de mer :
- Chocs mécaniques et projections liées aux vagues :
- Zones mobiles et plages :

Projet : AP16CSC008	Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines	
Echelle : 1 / 10 000	2A_Porto Vecchio_05	
Juillet 2020		
Chef de projet : JM		
Dessinateur : FK - TL	<small>Préfecture de Corse-du-Sud</small> <small>PRÉFET DE LA CORSE-DU-SUD</small>	

Limites d'utilisation :
 "Document soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Ne peut être utilisé à des fins réglementaires (PPR, PLU, etc.).
 Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans les rapports BRGM/FP-68934-FR et BRGM/FP-69376-FR.
 Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10 000". Diffusion et reproduction interdites sans l'accord du BRGM."



Limites d'utilisation : Document soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Ne peut être utilisé à des fins réglementaires (PPR, PLU, etc.).
Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans les rapports BRGM/RP-68934-FR et BRGM/RP-69376-FR.
Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10 000. Diffusion et reproduction interdite sans l'accord du BRGM.

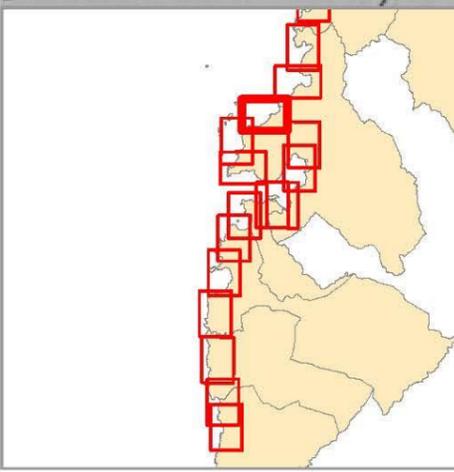
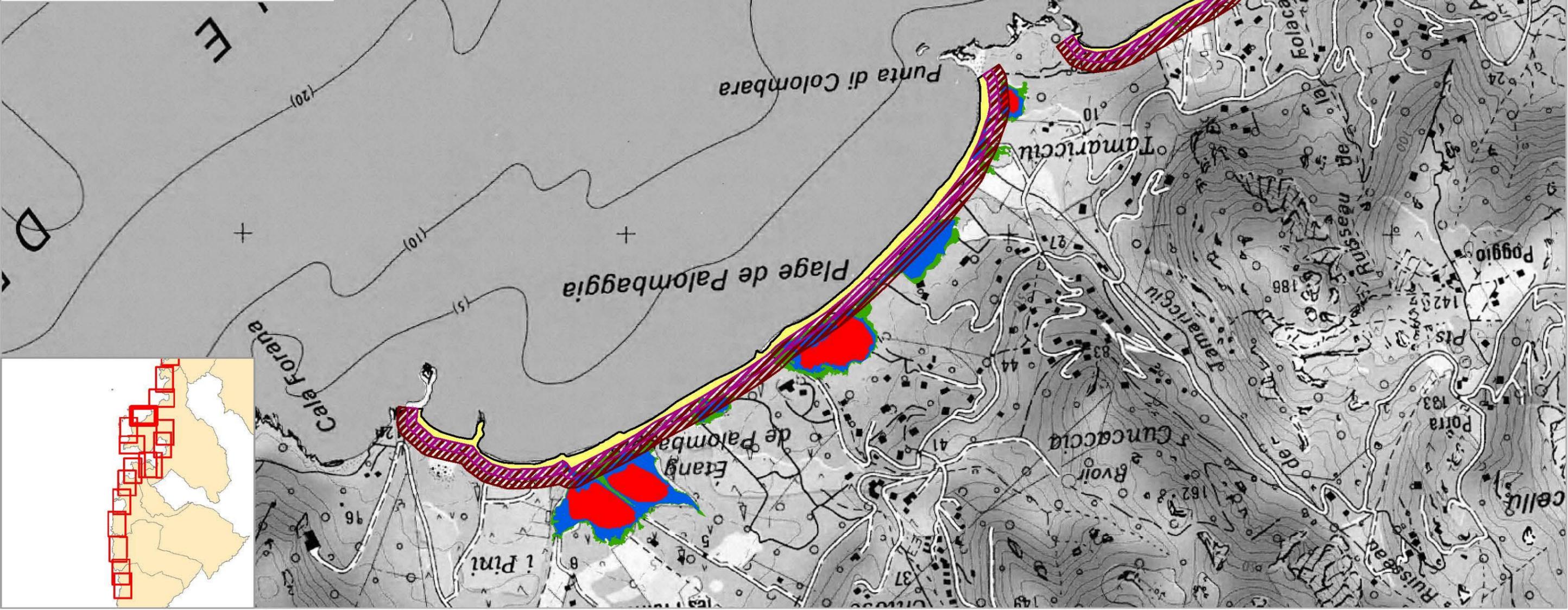
Projet : AP16CSC008	Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines
Echelle : 1 / 10 000	2A_Porto Vecchio_06
Chef de projet : JM	
Dessinateur : FK - TL	

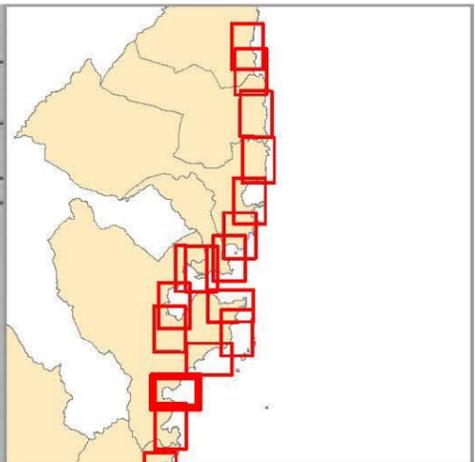
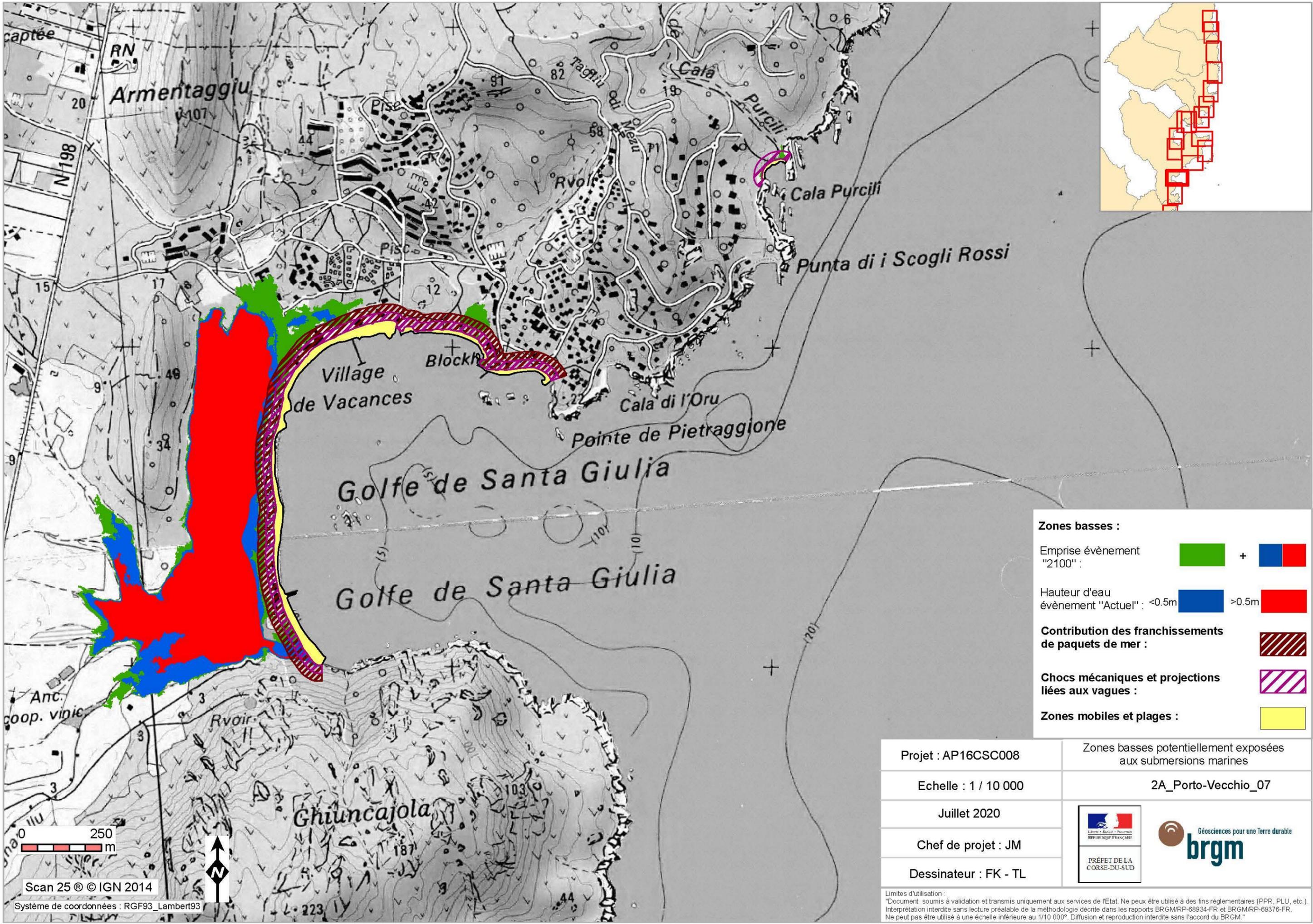
Zones basses :

- Emprise événement "2100" :
- Hauteur d'eau événement "Actuel" : < 0.5m > 0.5m

Zones basses :

- Contributon des franchissements de paquets de mer :
- Chocs mécaniques et projections liés aux vagues :
- Zones mobiles et plages :





Zones basses :

Emprise événement "2100" :  + 

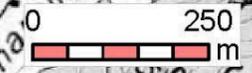
Hauteur d'eau événement "Actuel" : <0.5m  >0.5m 

Contribution des franchissements de paquets de mer : 

Chocs mécaniques et projections liées aux vagues : 

Zones mobiles et plages : 

Projet : AP16CSC008	Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines	
Echelle : 1 / 10 000	2A_Porto-Vecchio_07	
Juillet 2020	 PRÉFET DE LA CORSE-DU-SUD	
Chef de projet : JM		 Géosciences pour une Terre durable
Dessinateur : FK - TL		

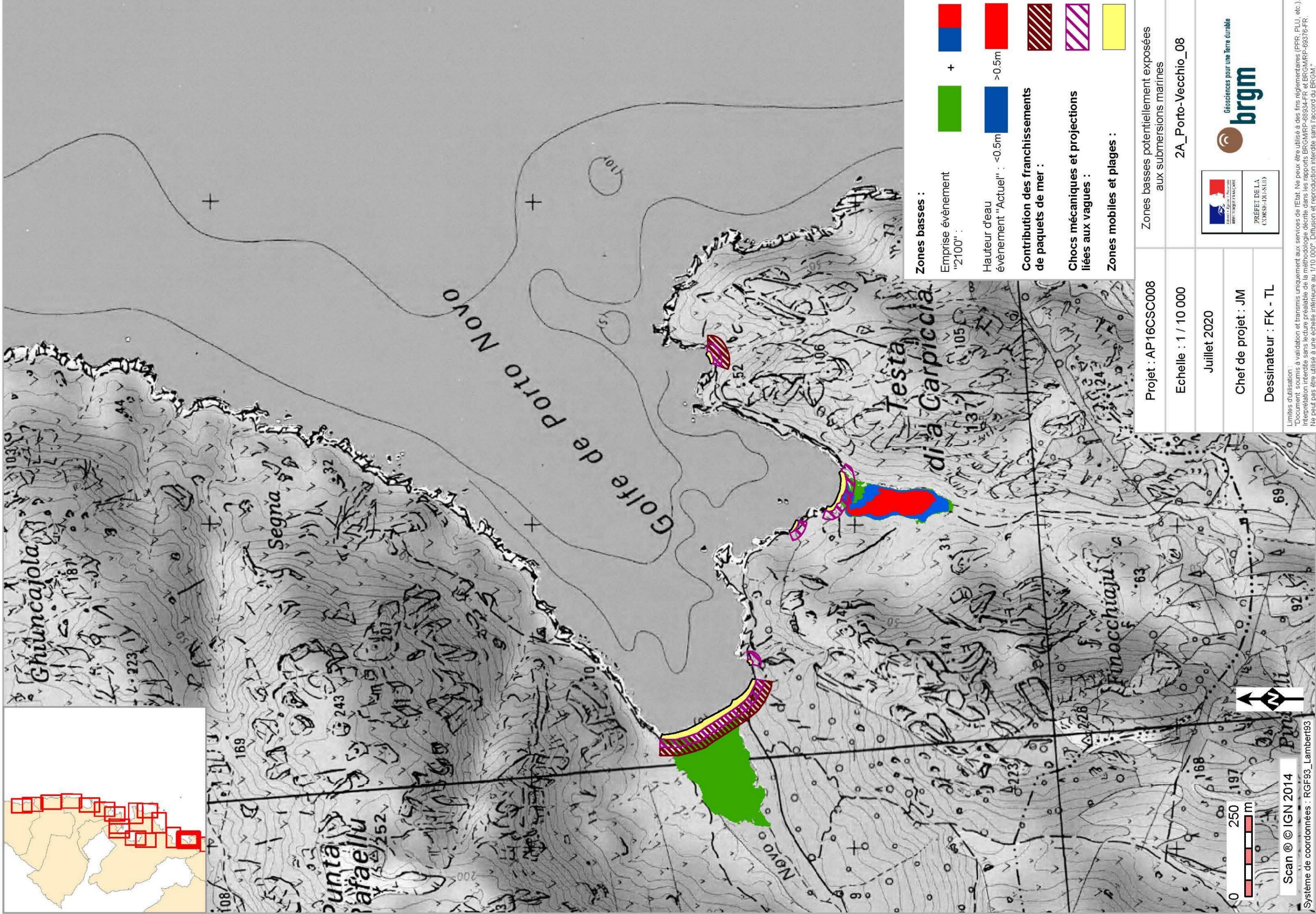
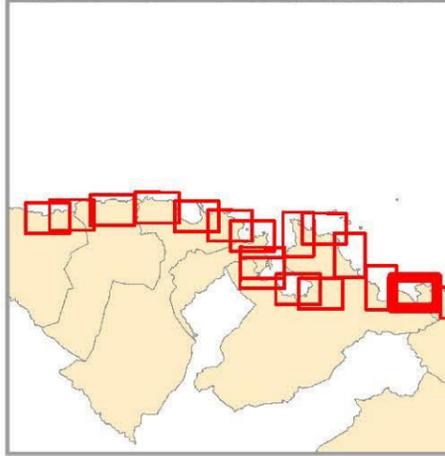


Scan 25 © IGN 2014
 Système de coordonnées : RGF93_Lambert93

Limites d'utilisation :
 "Document soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Ne peut être utilisé à des fins réglementaires (PPR, PLU, etc.).
 Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans les rapports BRGM/RP-68934-FR et BRGM/RP-69376-FR.
 Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10 000°. Diffusion et reproduction interdite sans l'accord du BRGM."

BRGM - 00004413 - Rapport final

7/1



Zones basses :

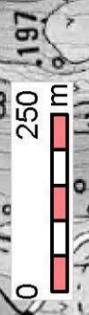
- Emprise événement "2100" : +
- Hauteur d'eau événement "Actuel" : <0.5m >0.5m

Contribution des franchissements de paquets de mer :

Chocs mécaniques et projections liées aux vagues :

Zones mobiles et plages :

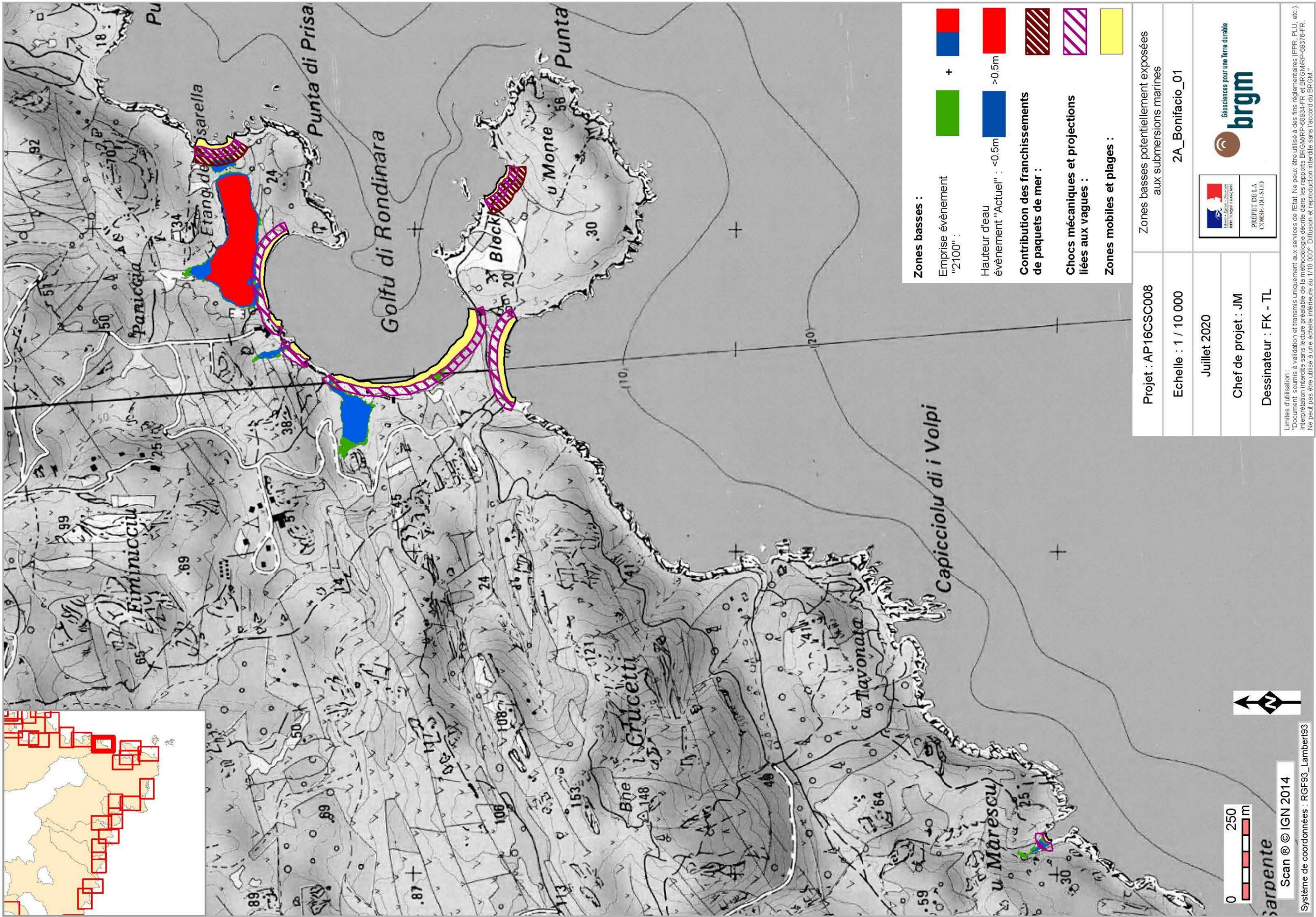
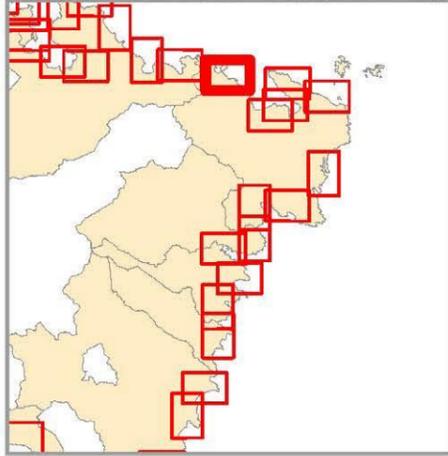
Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines	
Projet : AP16CSC008	2A_Porto-Vecchio_08
Echelle : 1 / 10 000	Juillet 2020
Chef de projet : JM	
Dessinateur : FK - TL	



Scan © IGN 2014

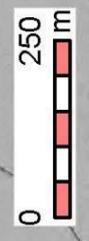
Système de coordonnées : RGF93_Lambert93

Limites d'utilisation :
 "Document soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Ne peut être utilisé à des fins réglementaires (PPR, PLU, etc.).
 Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans les rapports BRGM/RP-68934-FR et BRGM/RP-69376-FR.
 Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10 000". Diffusion et reproduction interdites sans l'accord du BRGM."



Zones basses :

- Emprise événement "2100" : +
- Hauteur d'eau événement "Actuel" : <0.5m >0.5m
- Contribution des franchissements de paquets de mer :
- Chocs mécaniques et projections liées aux vagues :
- Zones mobiles et plages :



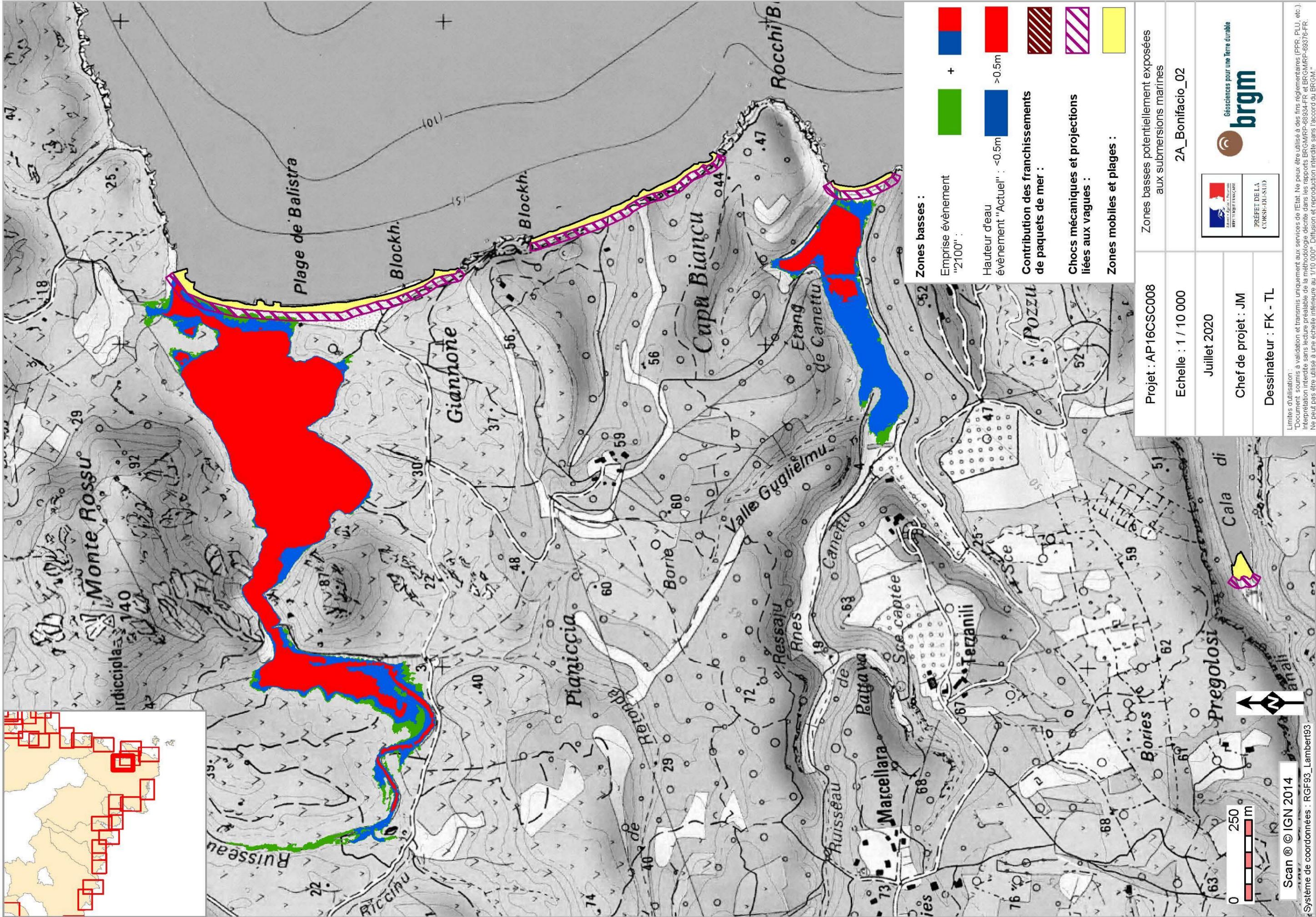
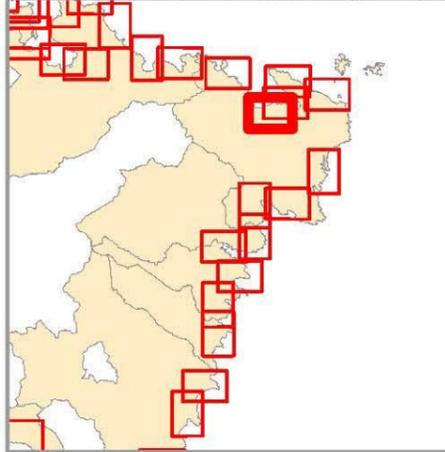
Scan © IGN 2014

Système de coordonnées : RGF93_Lambert93

Projet : AP16CSC008	Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines
Echelle : 1 / 10 000	2A_Bonifacio_01
Juillet 2020	
Chef de projet : JM	
Dessinateur : FK - TL	



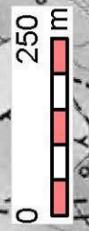
Limites d'utilisation :
 "Document soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Ne peut être utilisé à des fins réglementaires (PPR, PLU, etc.).
 Interdiction formelle de la réimpression, de la réédition, de la reproduction, de la diffusion, de la distribution, de la communication, de la mise à disposition,
 sans l'accord préalable de l'Etat. Toute réimpression, réédition, reproduction, diffusion, distribution, communication, mise à disposition,
 sans l'accord préalable de l'Etat, est formellement interdite."



Zones basses :

- Emprise événement "2100" : +
- Hauteur d'eau événement "Actuel" : < 0.5m > 0.5m
- Contribution des franchissements de paquets de mer :
- Chocs mécaniques et projections liées aux vagues :
- Zones mobiles et plages :

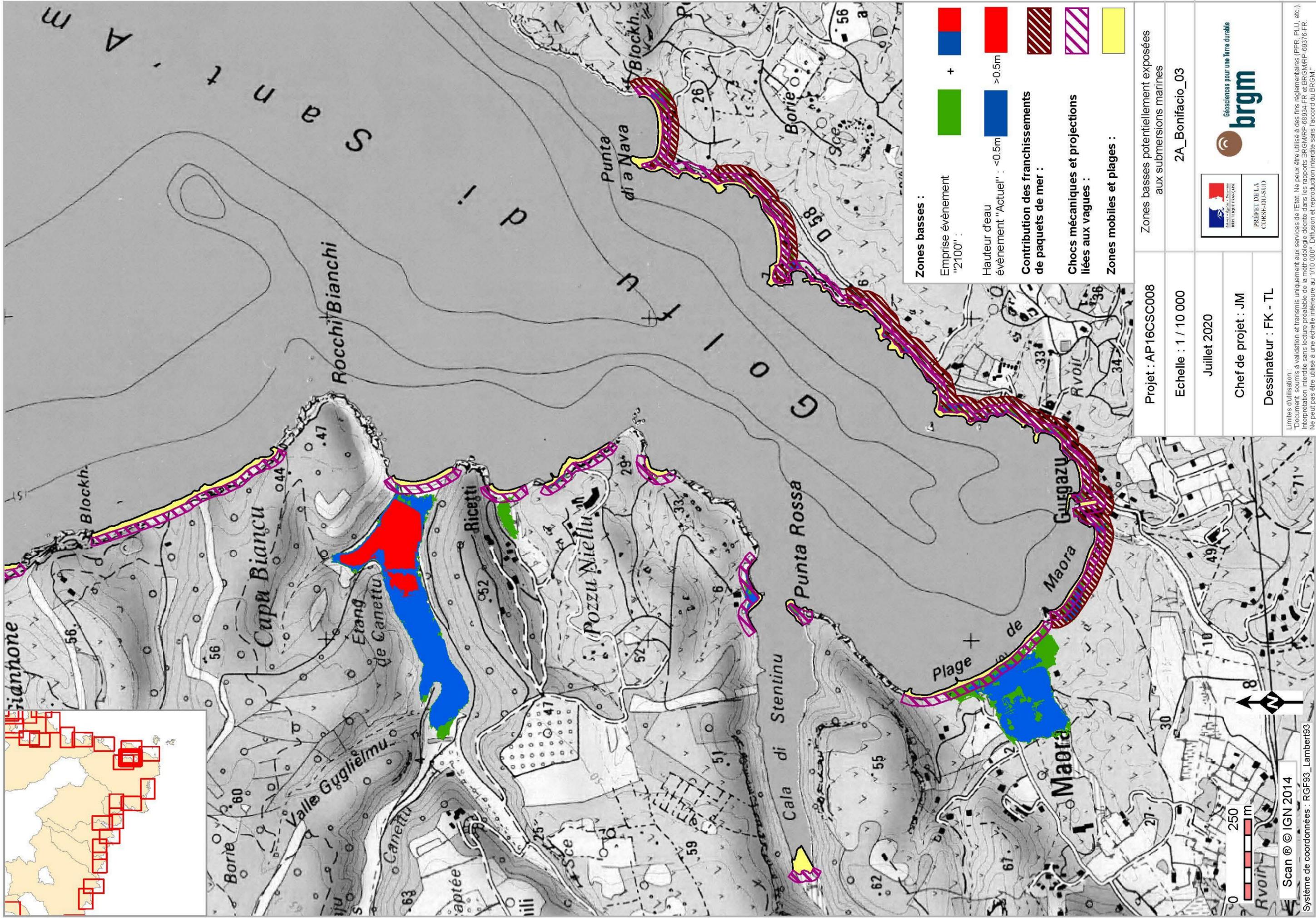
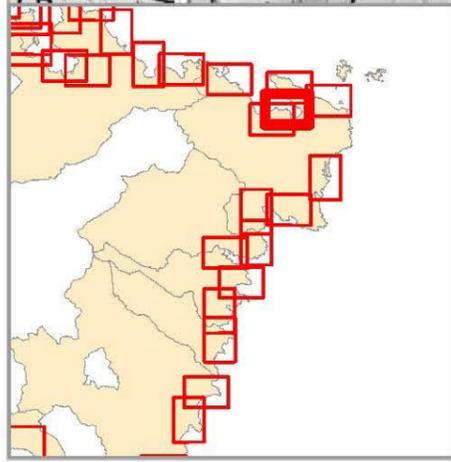
Projet : AP16CSC008	Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines	
Echelle : 1 / 10 000	2A_Bonifacio_02	
Juillet 2020		
Chef de projet : JM		
Dessinateur : FK - TL		



Scan © IGN 2014

Système de coordonnées : RGF93_Lambert93

Limites d'utilisation :
 "Document soumis à validation et transmis uniquement aux services de l'Etat. Ne peut être utilisé à des fins réglementaires (PPR, PLU, etc.).
 Interprétation interdite sans lecture préalable de la méthodologie décrite dans les rapports BRGM/RFP-68934-FR et BRGM/RFP-68376-FR.
 Ne peut pas être utilisé à une échelle inférieure au 1/10 000°. Diffusion et reproduction interdite sans l'accord du BRGM."



Zones basses :

- Emprise évènement "2100" : +
- Hauteur d'eau évènement "Actuel" : <0.5m
- Contribution des franchissements de paquets de mer :
- Chocs mécaniques et projections liées aux vagues :
- Zones mobiles et plages :

Projet : AP16CSC008	Zones basses potentiellement exposées aux submersions marines
Echelle : 1 / 10 000	2A_Bonifacio_03
Juillet 2020	
Chef de projet : JM	
Dessinateur : FK - TL	





Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale en Corse

Immeuble Agostini
Zone Industrielle de Furiani
20600 Bastia – France

Tél. : 04 95 58 04 33