

**ÉTUDE DU RISQUE DE SUBMERSION MARINE PAR
FRANCHISSEMENT DE PAQUET DE MER A L'ECHELLE DU
TERRITOIRE DE GRANVILLE TERRE ET MER
PHASE 2 & PHASE 3**



INFORMATIONS GENERALES SUR LE DOCUMENT

Contact	CASAGEC INGENIERIE 35 Place de l'Église 29170 FOUESNANT - FRANCE Tel : + 33 2 98 52 86 81 Web : http://www.casagec.fr
Titre du rapport	Etude du risque de submersion marine par franchissement de paquet de mer à l'échelle du territoire de Granville Terre et Mer Phases 2 & 3
Maître d'Ouvrage	Communauté de communes Granville Terre et Mer
Auteur(s)	Damien Dailloux / Antoine Fegne
Responsable du projet	dailloux@casagec.fr
Rapport n°	CI-21070-50-Phases 2 & 3

SUIVI DU DOCUMENT

Rev.	Date	Description	Rédigé par	Approuvé par
00	13/07/2023	Version provisoire envoyée à GTM	DDX/AFE	ASY

TABLE DES MATIERES

1.	Contexte de l'étude.....	10
1.1.	Contexte général	10
1.2.	Organisation de l'étude	11
2.	Description général du littoral	13
2.1.	Contexte géographique	13
2.2.	Contexte géologique.....	14
2.3.	Géomorphologie.....	15
2.4.	Contexte sédimentaire	18
2.5.	Mouvements sédimentaires.....	19
3.	Analyse de l'évolution du littoral	22
3.1.	Évolution historique du trait de côte.....	22
3.1.1.	Analyse diachronique de la sous-cellule Bricqueville – Bréhal.....	22
3.1.2.	Analyse diachronique de la sous-cellule Bréville – Donville.....	23
3.2.	Description de l'ouvrage de protection de Bréhal- Coudeville.....	28
3.3.	Évolution récente du trait de côte.....	30
3.3.1.	Suivi du trait de côte, hauteur de sable et profil de plage	30
3.3.2.	Données altimétriques	36
4.	Forçages océaniques et météo-marin.....	39
4.1.	Vents.....	39
4.2.	Niveau d'eau.....	40
4.2.1.	Marée astronomique	40
4.2.2.	Surcote	41
4.2.3.	Surcote liée à l'action des vagues (wave setup).....	41
4.2.4.	Niveaux extrêmes.....	41
4.2.5.	Changement climatique	42
4.3.	État de mer	45
4.3.1.	Généralité sur les houles océaniques.....	45
4.3.2.	Analyses statistiques de états de mer	45
4.3.3.	Propagation à la côte	47
4.4.	Probabilité conjointe des évènements extrêmes d'états de mer et de niveau marin	50
5.	Hypothèses de travail.....	51
5.1.	Définition des objectifs de projet	51
5.2.	Méthodologie	52

5.2.1.	Introduction	52
5.2.2.	Découpage en secteurs homogènes	53
5.2.3.	Propagation des états de mer	54
5.2.4.	Calcul des débits de franchissement	58
5.2.5.	Modèle d'écoulement (TELEMAC)	61
6.	Caractérisation de l'aléa inondation	64
6.1.	Calibration de la chaîne de modélisation	64
6.1.1.	Données disponibles	64
6.1.2.	Résultats de la calibration	65
6.2.	Résultats de modélisation	66
6.3.	Analyse des résultats	69
7.	Analyse des solutions d'aménagements	70
7.1.	Solutions d'aménagements envisageables.....	70
7.1.1.	Ouvrage de protection en enrochements.....	70
7.1.2.	Solutions pour les accès à la plage.....	72
7.1.3.	Limiter les entrées d'eau par les accès terrestres.....	74
7.2.	Modélisation de la solution d'aménagements	76
7.2.1.	Résultats de modélisation	76
7.2.2.	Analyse des résultats.....	79
7.3.	Préconisations d'intervention	81
7.3.1.	Réponse à l'objectif de projet	81
7.3.2.	Réponse à plus long terme (hors objectif)	82
8.	Système d'endiguement potentiel.....	85
8.1.	Rappel réglementaire sur la définition des systèmes d'endiguement et la notion de digue	85
8.2.	Cas de l'ouvrage en enrochements de Saint-Martin de Bréhal.....	86
8.3.	Caractérisation de la dangerosité des écoulements en zone urbaine.....	87
8.3.1.	Méthodologie.....	87
8.3.2.	Vitesse de remplissage et hauteur d'eau	88
8.3.3.	Emprise au sol et dangerosité	89
8.3.4.	Enjeux humains	90
9.	Conclusion.....	92
	Bibliographie	94

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Localisation des ouvrages soumis aux franchissements par paquets de mer	11
Figure 2. Localisation de la zone d'étude et des différentes parties d'intérêt (Fond de plan : Google Earth, 2022 - Source des données : GTM).	13
Figure 3. Formations géologiques présentes au Nord de la Point du Roc (Fond de carte : InfoTerre, BRGM).	14
Figure 4. Formations géologiques présentes au Sud de la Pointe du Roc (Fond de carte : InfoTerre, BRGM).	15
Figure 5. Carte biomorphosédimentaire de la zone intertidale et sa légende. Extrait de la carte au 1/25 000ème de la carte bio-morphosédimentaire de la zone intertidale de Granville (Ifremer, 1987).....	17
Figure 6. Carte de la Nature des fonds au Nord de la zone d'étude (Fond de plan : Google Earth, 2022).	18
Figure 7. Carte de la Nature des fonds au Sud de la zone d'étude (Fond de plan : Google Earth, 2022).	19
Figure 8. Transports littoraux longitudinaux (OBSCAT, 2017).	20
Figure 9. Orientation et intensité du transit sédimentaire sur le littoral de Bricqueville-sur-Mer à Granville, adaptée des travaux de Levoy et Larssonneur (1993).	21
Figure 10. Illustration (Enracinement de la flèche sableuse du havre de la Vanlée) de l'évolution de la position du trait de côte (localisation des transects espacés de 50m) utilisés pour l'analyse de l'évolution (Fond de plan : Google Earth, 2022).	22
Figure 11. Variation des taux d'évolutions du trait de côte de la sous-cellule de Bricqueville – Bréhal sur les périodes 1947-1977, 1977-1982 et 1982-1992 (avancée en rouge / recul en bleu). Les traits jaunes schématisent les limites communales et les traits noirs les ouvrages transversaux au trait de côte.	24
Figure 12. Variation des taux d'évolutions du trait de côte de la sous-cellule de Bricqueville – Bréhal sur les périodes 1992-2001, 2001-2010 et 2010-2020 (avancée en rouge / recul en bleu). Les traits jaunes schématisent les limites communales et les traits noirs les ouvrages transversaux au trait de côte.	25
Figure 13. Variation des taux d'évolutions du trait de côte de la sous-cellule de Bréville – Donville sur les périodes 1947-1977, 1977-1982 et 1982-1992 (avancée en rouge / recul en bleu). Les traits jaunes schématisent les limites communales et les traits noirs les ouvrages transversaux au trait de côte.	26
Figure 14. Variation des taux d'évolutions du trait de côte de la sous-cellule de Bréville – Donville sur les périodes 1992-2001, 2001-2010 et 2010-2020 (avancée en rouge / recul en bleu). Les traits jaunes schématisent les limites communales et les traits noirs les ouvrages transversaux au trait de côte.	27
Figure 15. Coupe-type de l'ouvrage construit en 1970.	28
Figure 16. Reprise de la crête de la digue en 2000-2001.	28
Figure 17. Photographie de la protection en enrochements (02/2021, CASAGEC Ingénierie).	29
Figure 18. Photographie du cordon en enrochements au Sud de la protection en enrochements (11/2022, CASAGEC Ingénierie).	29
Figure 19. Exemple de localisation des stations de suivi du littoral de Saint-Martin-de-Bréhal et de Coudeville-sur-Mer (Fond de plan : Google Earth, 2019).	30
Figure 20. Evolution du trait de côte (en haut) et de la hauteur de plage (en bas) au niveau de la station SW79 (CASAGEC INGENIERIE, d'après les données du CD 50).	31
Figure 21. Evolution du profil de plage au niveau de l'ouvrage de protection du littoral de Saint-Martin-de-Bréhal et d Coudeville-sur-Mer (CASAGEC INGENIERIE, d'après les données du CD 50).	32

Figure 22. Carte de différentiel altimétrique 2016-2011 (à gauche) et 2020-2016 sur le secteur de Bricqueville-sur-Mer et Saint-Martin-de-Bréhal.	36
Figure 23. Carte de différentiel altimétrique 2016-2011 (à gauche) et 2020-2016 sur le secteur de Coudeville-sur-Mer, Bréville-sur-Mer et Donville-les-Bains.	36
Figure 24. Variation des volumes de sable sur les périodes 2011-2016 et 2016-2020 pour la sous-cellule de Bricqueville – Bréhal (gain en rouge / perte en bleu). Les traits jaunes schématisent les limites communales et les traites noirs, les ouvrages transversaux au trait de côte.	38
Figure 25. Rose des vents au point W de coordonnées WGS 84 Latitude : 49,14°N et longitude : 1,77°W (en degrés décimaux).	39
Figure 26. Fréquence de dépassement des vitesses, toutes provenances confondues.	39
Figure 27. Rose des vents au large de Gouville, données ECMWF-ERASLand sur la période 1981-2020 (ACRI-IN / Antea, janvier 2022).	40
Figure 28. Cartes de niveaux d'eau extrêmes centennaux en m NGF (marée + surcotes) – Estimation faite en 2008 à gauche, et en 2012 à droite.	41
Figure 29. Evolution globale du niveau moyen des mers entre 1900 et 2010 (IPCC, 2015).	42
Figure 30. Evolution récente du niveau moyen des mers mesurée par altimétrie satellitale (https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/ , sources CNES/LEGOS/CLS).	42
Figure 31. élévation relative du niveau moyen de la mer à Cherbourg (période 1975-2017) et à Saint-Malo (période 1995-2017) – Franck LEVOY, 2018, données SONEL.	42
Figure 32. élévation du niveau moyen de la mer selon différents scénarios (https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool).	44
Figure 33. Localisation du point ANEMOC coast 1046.	45
Figure 34. Localisation des points d'extraction.	45
Figure 35. Roses des houles aux trois points d'extraction définis a) Point HOMERE 69116, b) Point 2 HOMERE 68713, c) Point 3 HOMERE 69116.	46
Figure 36. Corrélogramme hauteur de houle Hs (m) en fonction de la période de pic Tp (s) au point Nord.	46
Figure 37. Emprise du modèle et des trois grilles emboîtées.	47
Figure 38. Résultats de la modélisation des mers de vent générées par un vent de 20m/s. De gauche à droite et de haut en bas : vent de secteur 210°N, 230°N, 250°N, 270°N.	48
Figure 39. Résultat de la modélisation de la propagation d'une houle extrême centennale par le modèle Swan (vent du secteur 270°N, 20m/s ; Hs = 14 m ; Tp = 18 s).	49
Figure 40. Résultat de la modélisation de la propagation d'une houle extrême centennale par le modèle Swan (vent de secteur 270°N 20 m/s ; Hs = 14 m ; Tp= 18 s) combiné à l'action d'un vent fort de secteur 270°N et de vitesse 20m/s.	49
Figure 41. Probabilité conjointe des événements extrêmes d'états de mer et de niveaux marins au niveau de Granville.	50
Figure 42. Approches de calcul modélisées.	51
Figure 43. Chaîne de modélisation mise en œuvre.	52
Figure 44. Secteurs homogènes considérés.	53
Figure 45. Secteurs homogènes.	55

Figure 46. Vue en plan illustrant les profils considérés pour la définition des profils de référence au niveau du secteur 3.	55
Figure 47. Graphique illustrant la définition des profils de référence au niveau du secteur 3 (PT : Profil Théorique / PTa : Profil Théorique abaissé).	56
Figure 48. Graphique illustrant les Profils Types (PT).	56
Figure 49. Débits de franchissements pour le cas 1 à Pleine Mer de la protection en enrochements.	59
Figure 50. Débits de franchissements pour le cas 1 à Pleine Mer des escaliers.	59
Figure 51. MNT considéré.	62
Figure 52. Points d'injection.	63
Figure 53. Exemple de chronique de franchissement pour un point d'injection (zone 2, protection en enrochements).	63
Figure 54. Franchissements au niveau de la protection en enrochements (Captures vidéo : Commune de Saint-Martin-de-Bréhal / YouTube).	64
Figure 55. Submersion au niveau de la cale de la Vigie (Capture vidéo : YouTube).	64
Figure 56. Hauteurs d'eau maximales pour le cas 1.	65
Figure 57. Volumes de submersion par zone et par cas.	66
Figure 58. Hauteurs d'eau maximales pour les cas 1, 2 et 2a actuels.	67
Figure 59. Hauteurs d'eau maximales pour les cas 3, 4 et 4a actuels.	68
Figure 60. Volumes de submersion par zone et par cas.	69
Figure 61. Dispositions constructives permettant de limiter les franchissements par paquets de mer.	70
Figure 62. Variation des franchissements par paquets de mer au niveau de la protection en enrochements (zone 3) en fonction de la hauteur du mur.	70
Figure 63. Variation des franchissements par paquets de mer au niveau de la protection en enrochements (zone 3) en fonction de l'augmentation de la largeur en crête.	71
Figure 64. Variation des franchissements par paquets de mer au niveau de la protection en enrochements (zone 3) en fonction de l'adoucissement de la pente de talus ($\tan \alpha$).	71
Figure 65. Exemple d'intégration schématique de la solution « muret + batardeau » au niveau de la zone 3 (Source : Youtube©).	72
Figure 66. Blocs béton mis en place au niveau de la cale Nord (gauche) et de la cale de la Vigie (Droite) (Source : Google Street View).	73
Figure 67. Vue de la cale de la Vigie (Date : 15/11/2022).	73
Figure 68. Vue de la cale de Coudeville (Source : Google Street View).	73
Figure 69. Hétérogénéité de protection des habitations de premier rang au niveau des zones 2 et 3 (date : 25/02/2021).	74
Figure 70. Vue des accès vulnérables en zone 1 et 2.	74
Figure 71. Dune au niveau de la zone 5 (date : 15/11/2022).	75
Figure 72. Volumes de submersion par zone et par cas avec la solution d'aménagements.	76
Figure 73. Hauteurs d'eau maximales pour les différents cas 1, 2 et 2a avec aménagements.	77

Figure 74. Hauteurs d'eau maximales pour les différents cas 3, 4 et 4a avec aménagements.	78
Figure 75. Emprises de submersion pour le cas 1 actuel et le cas 2 avec aménagements.	79
Figure 76. Volumes de submersion pour les cas 1 et 2 actuels et le cas 2 avec aménagements.	79
Figure 77. Volumes de submersion pour les cas 2a, 3, 4 et 4a actuels et avec aménagements.....	80
Figure 78. Coupe de principe pour la mise en œuvre d'un muret en haut de protection en enrochements.	81
Figure 79. Préconisations d'interventions prioritaires et réflexions à moyen et long terme.	84
Figure 80. Schéma de la structure d'une digue (Sce. France Digue).	85
Figure 81. Coupes types de l'ouvrage et du terrain naturel à l'arrière au niveau des profils de l'Observatoire du littoral Manchois (SW80, SW81, SW82 et SW83).	86
Figure 82. Coupe longitudinale de l'ouvrage au niveau de la crête (ligne verte), au niveau du terrain naturel en arrière (ligne noire), et position potentiel du terrain naturel en cas de digue anti-submersion (ligne en tiret rouge).	87
Figure 83. Vitesses de remplissage et hauteurs maximales atteintes sur 4 points sensibles pour le cas 1 (bleu), le cas 2 sans aménagement (orange), et le cas 2 avec aménagements (rouge pointillé).....	89
Figure 84. Cartes des venues d'eau pour les simulations de cas 1, et de cas 2 avec et sans aménagement.	89
Figure 85. Analyse statistique de la couverture des différentes catégories d'aléa pour les 5 zones du site d'étude.	90
Figure 86. Cartographies des enjeux impactés pour les 3 cas de simulation.....	91

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Valeurs moyennes par station du taux d'évolution du trait de côte (TDC=trait de côte) et de la hauteur de sable (HDP=Hauteur de plage) au niveau du littoral de Bricqueville-sur-Mer (CASAGEC INGENIERIE, d'après données CREC-Unicaen).....	33
Tableau 2. Valeurs moyennes par station du taux d'évolution du trait de côte (TDC=trait de côte) et de la hauteur de sable (HDP=Hauteur de plage) au niveau du littoral de Saint-Martin-de-Bréhal et de Coudeville-sur-Mer (CASAGEC INGENIERIE, d'après données CREC-Unicaen).	34
Tableau 3. Valeurs moyennes par station du taux d'évolution du trait de côte (TDC=trait de côte) et de la hauteur de sable (HDP=Hauteur de plage) au niveau du littoral de Bréville-sur-Mer et de Donville-les-Bains (CASAGEC INGENIERIE, d'après données CREC-Unicaen).	35
Tableau 4. Vitesse des vents moyens extrêmes au large de Gouville (ANTEA GROUP / ACRI-IN, 2022).	40
Tableau 5. Niveaux marins caractéristiques à proximité de la zone d'étude (SHOM-RAM 2022).....	40
Tableau 6. Surcote de tempêtes estimées à Saint-Malo par la loi exponentielle (CEREMA, 2018).	41
Tableau 7. Élévation du niveau moyen de la mer comparé à la période 1995-2014 pour le port de Saint-Malo (https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool).	43
Tableau 8. Élévation du niveau de la mer actuel et prédiction à +100 (PPRL) et élévation maximum à +100 (GIEC) de l'élévation.....	44
Tableau 9. Houle extrême (SOGREAH 2009 / INVIVO, 2019).....	45
Tableau 10. Conditions de houle au large, propagée avec le modèle SWAN2D.....	54
Tableau 11. Conditions de houle à Pleine Mer en entrée de profil de chaque zone.	57
Tableau 12. Hauteur significative Hm0 en pied d'ouvrage en enrochements au moment de la Pleine Mer.	57
Tableau 13. Caractéristiques géométriques des ouvrages considérées pour le calcul des débits de franchissements.....	59
Tableau 14. Débits de franchissements pour le cas 1 à Pleine Mer des cales.	60
Tableau 15. Estimation financière des interventions prioritaires.....	82
Tableau 16. Estimation financière des interventions hors objectifs de projet – Interventions conséquentes à plus long terme.....	83
Tableau 17. Classes de systèmes d'endiguement selon la population à protéger (d'après l'article R214-113 (CE) modifié par le décret n°2019-895 du 28 aout 2019-art.2).....	85
Tableau 18. Catégorisation de l'aléa inondation.	88

1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

1.1. CONTEXTE GENERAL

A la suite des lois MAPTAM du 27 janvier 2014 puis NOTRe (Nouvelle Organisation Territoriale de la République) du 7 août 2015, la compétence GEMAPI (Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations) est aujourd'hui attribuée aux EPCI.

Le « décret digues » (décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques) modifie le Code de l'environnement :

- Il précise la nouvelle réglementation en matière de prévention contre les inondations ;
- Il donne les notions de système d'endiguement et d'aménagement hydraulique (à la différence des classements par ouvrages décidés par l'Etat) ;
- Il modifie le système de classement en se basant exclusivement sur la population protégée résidant ou travaillant dans la zone protégée ;
- Il spécifie les éléments relatifs aux études de dangers et aux règles de conception et d'exploitation des ouvrages.

La réglementation précise que le système d'endiguement comme l'aménagement hydraulique sont soumis à une autorisation préfectorale (en application des articles L.214-3 et R. 214-1). S'il repose sur des digues établies avant 2015 et bénéficiant d'une autorisation, la demande d'autorisation du système d'endiguement ou de l'aménagement hydraulique (procédure simplifiée : sans enquête publique) comprend les éléments prévus au II et aux 1°, 2°, 5° et 6° du VI de l'article R. 214-6. Le système d'endiguement est dans ce cas autorisé par un arrêté complémentaire pris en application de l'article R. 214-18.

A ce jour, et bien que le littoral de la communauté de communes de Granville Terre et Mer soit soumis aux aléas de submersion marine, le territoire ne comprend aucune digue classée, ni aucun système d'endiguement autorisé. Une grande majorité du littoral étant urbanisée, la gestion du risque est aujourd'hui essentielle sur le territoire pour préserver la sécurité des biens et des personnes.

C'est dans ce contexte que la Communauté de communes Granville Terre et Mer a mené une étude de préfiguration des systèmes d'endiguement sur son secteur. Outre l'identification de systèmes d'endiguement potentiels, l'étude a également souligné la nécessité d'études complémentaires concernant plusieurs secteurs d'ouvrages soumis au franchissement par paquets de mer (localisés en Figure 1) :

- Sur la commune de Saint-Martin-de-Bréhal (Tranche ferme) : tronçon d'environ 300 m, au niveau duquel des intrusions d'eau ont été constatées au niveau des accès, et pouvant atteindre les zones plus basses en arrière ;
- Sur la commune de Granville :
 - La promenade du Plat Gousset (Tranche optionnelle 1), environ 700 m ;
 - Le secteur de Saint Nicolas Plage (Tranche optionnelle 2), environ 370 m ;
- Sur la commune de Carolles (Tranche optionnelle 3) : au niveau de l'accès donnant sur l'Avenue de la Mer.

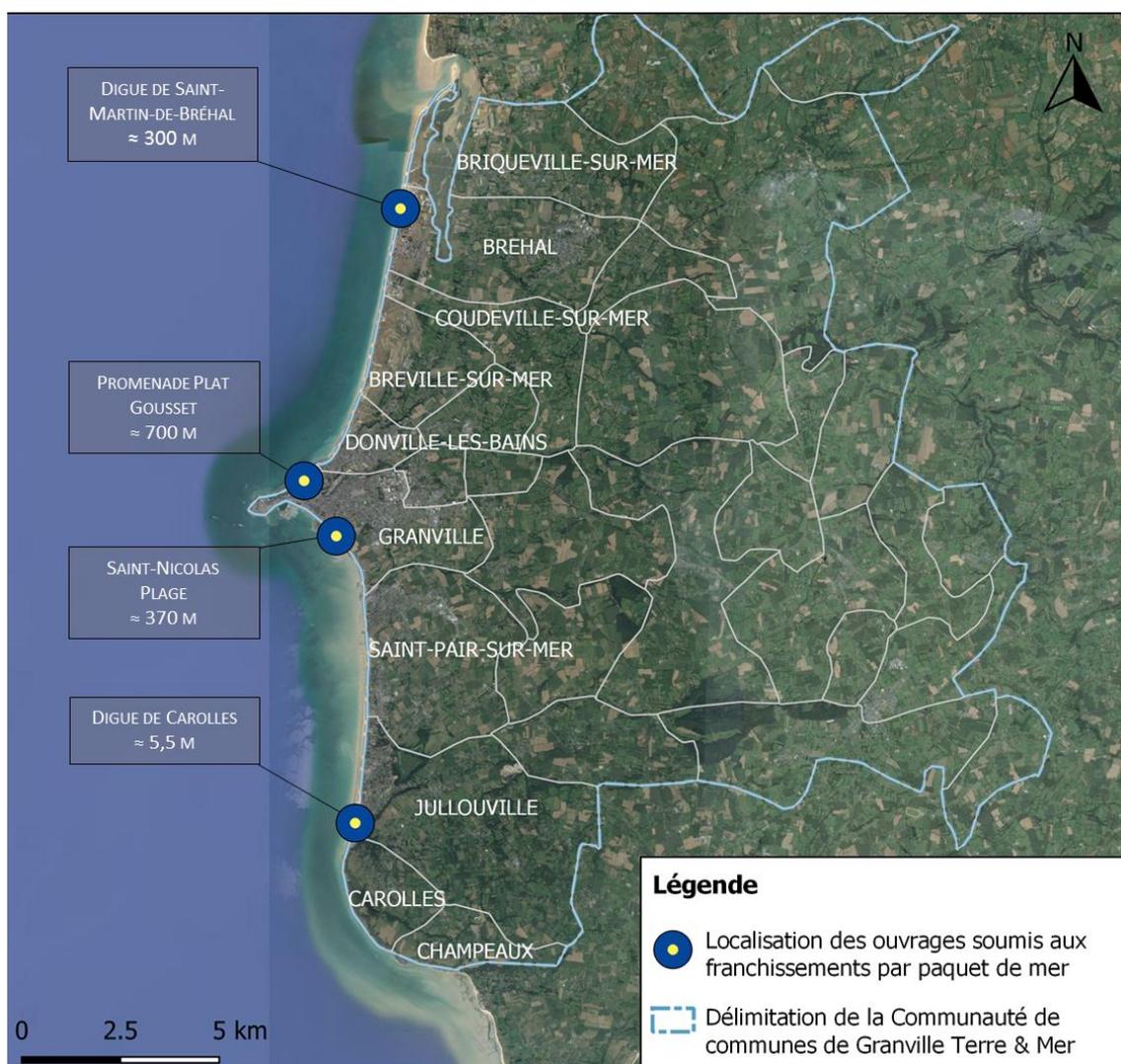


Figure 1: Localisation des ouvrages soumis aux franchissements par paquets de mer

Il a été acté au cours du COPIL de démarrage (31/05/2022) qu'aucune des tranches optionnelles ne seraient affermées à ce stade de l'étude. Ainsi il est décidé de ne réaliser l'étude que pour le secteur de Saint-Martin-de-Bréhal.

1.2. ORGANISATION DE L'ÉTUDE

Les objectifs de la présente étude sont donc :

- D'apporter une **aide à la décision dans la poursuite de définition de systèmes d'endiguement sur le territoire**, en définissant les aléas submersion et risques associés. Les secteurs protégés par ces systèmes d'endiguement seront également prédéfinis. Sur les secteurs les plus sensibles localisés en figure précédente, il s'agira de caractériser le risque de franchissement par paquet de mer (règle Eurotop 2018), et d'identifier les potentielles conséquences de ces écoulements en arrière. Cette partie de l'étude se basera notamment sur les relevés topographiques existants, sur la mise en place de modèles hydrodynamiques, et sur les différents référentiels en vigueur pour le calcul des franchissements et la définition des aléas submersion,
- De **préconiser des solutions techniques destinées à limiter les franchissements par paquets de mer sur les secteurs sensibles**. Il s'agira notamment d'étudier les solutions suivantes :
 - En priorité, la pertinence de modifier l'altimétrie de la crête d'ouvrage, en précisant la hauteur retenue,

- La mise en place de batardeaux, de protections individuelles des enjeux bâtis, de systèmes de collecte ou d'évacuation des eaux.

Elle est phasée de la manière suivante :

- Phase 1 : Recueil et analyse des données d'entrée ;
- Phase 2 : Étude et caractérisation de l'environnement naturel et de l'aléa inondation ;
- Phase 3 : Systèmes d'endiguement potentiels et alternatives.

Le présent rapport porte sur les phases 2 et 3.

Les premières sections du rapport sont consacrées à la caractérisation de l'environnement naturel et de l'aléa inondation via une description globale du site d'étude, une analyse de l'évolution du littoral à différentes échelles spatiales, et analyse des différents forçages océaniques et météo-marin au droit de l'ouvrage en enrochement.

Sur la base de ces résultats, les différents cas de calculs et les objectifs de l'étude sont définis, et la suite de calcul des franchissements par paquet de mer est présentée. Ces éléments permettent de réaliser l'étude et la caractérisation de l'aléa inondation et in fine de définir les aménagements susceptibles de limiter de manière significatif les franchissements par paquet de mer au regard des objectifs fixés.

La dernière partie est consacrée à la définition du rôle de l'ouvrage et à la caractérisation de la dangerosité des écoulements dans le tissu urbain.

2. DESCRIPTION GENERAL DU LITTORAL

2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE

Le Littoral Ouest Manchois s'étend du Cap de Carteret au Nord, à la pointe du Roc (Granville-sur-Mer) au Sud.

Il est caractérisé par de grandes plages sableuses, prolongées par un large estran, entrecoupées de huit havres dont la taille est plus ou moins importante. Leur formation est due au cheminement de petits fleuves côtiers, dessinant ainsi des embouchures particulières, lieux d'accumulations sédimentaires marines et exutoires des eaux continentales.

La présente étude se situe au niveau du territoire de la communauté de commune de Granville Terre et Mer. Elle s'étend du Havre de la Vanlée, jusqu'à la commune de Carolles. Sur le territoire, 4 sous-cellules ont été délimitées :

- Bricqueville - Bréhal : Délimitée par le havre de la Vanlée, au Nord, et par la limite communale avec Bréville-sur-Mer au Sud. Elle est caractérisée par le cordon dunaire bien préservé de Bricqueville-sur-Mer et le littoral urbanisé de Saint-Martin-de-Bréhal et Coudeville-sur-Mer,
- Bréville - Donville : elle se caractérise par les dunes préservées de Bréville-sur-Mer et de la zone urbanisée de Donville-les-Bains,
- Granville : Elle correspond aux falaises littorales et à la zone urbanisée de Granville,
- Saint-Pair – Jullouville : elle regroupe le littoral des communes de Saint-Pair-sur-Mer et de Jullouville, particulièrement anthropisé.

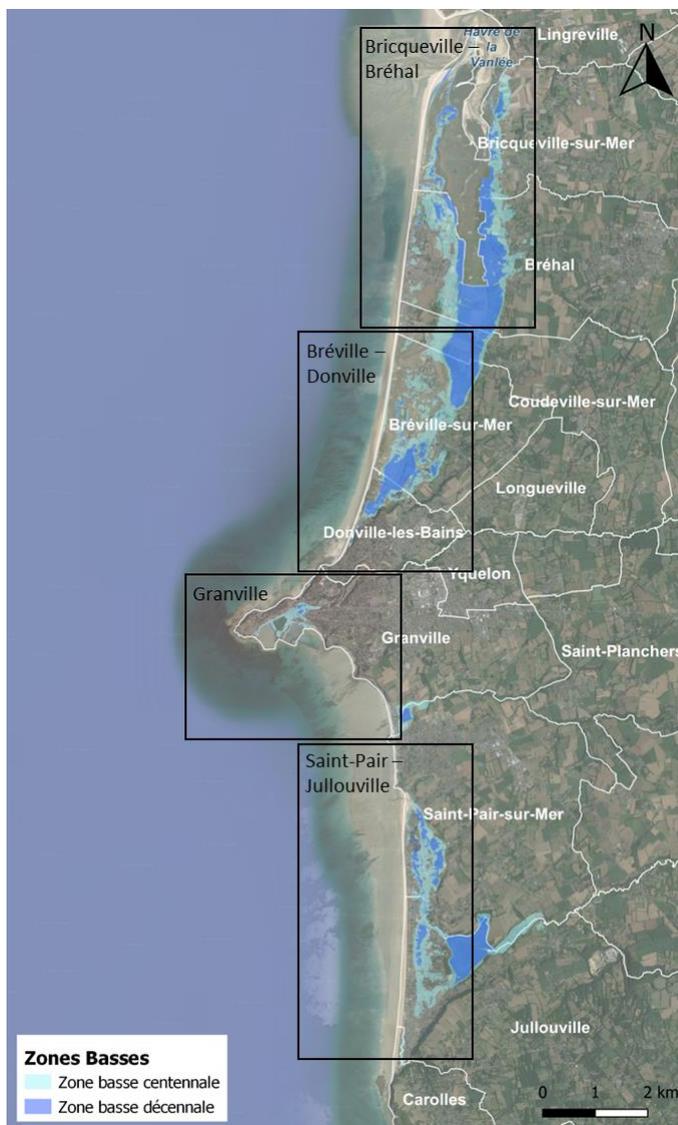


Figure 2. Localisation de la zone d'étude et des différentes parties d'intérêt (Fond de plan : Google Earth, 2022 - Source des données : GTM).

2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

La côte Ouest du Cotentin appartient géologiquement au Massif armoricain dont il constitue la terminaison Nord-Est. La majeure partie de la côte Ouest du Cotentin est essentiellement constituée de dunes sableuses quaternaires mises en place au cours de la transgression flandrienne (amorcée il y a 10 000 ans environ à la suite du dernier épisode glaciaire du Würm).

En arrière littoral, la zone d'étude est caractérisée par l'alternance de différentes formations du Briovérien inférieur et supérieur (Figure 3 et Figure 4) regroupant un ensemble de terrain surtout sédimentaire de part et d'autre de la formation de Granville (Tilloïde du Briovérien supérieur). Des bandes de flysch schisteux caractéristique de différentes formations propres au territoire (Formation de Lingreville et de Saint-Pair) se retrouvent au Nord de la Pointe du Roc, tandis que des flysch gréseux caractéristiques des formations d'Hacqueville (Briovérien inférieur) et du Thar (Briovérien supérieur) sont retrouvées au Sud.

Au niveau de la frange littorale, la côte s'organise autour de l'éperon rocheux de Granville :

- Au Nord, une longue et large flèche sableuse récente (poste 13^{ème} siècle) se forme jusqu'au Havre de la Vanlée, complétée par la présence de sable éolien (Weichsélien) sur la frange littorale. Un platier rocheux est présent au droit du littoral de Bricqueville-sur-Mer et de Saint-Martin-de-Bréhal. Constitué de flysch schisteux (Formation de Saint-Pair et de Lingreville), il est réduit à quelques îlots éloignés du rivage, découverts à marée basse.
- Au Sud, (à partir de Saint-Nicolas-Plage) les falaises laissent la place, à une étroite langue de sable dunaire récente (poste 13^{ème} siècle), le platier rocheux, proche de la côte, est ici bien développé et quasi continu jusqu'à Jullouville. Il est constitué, de la même manière que le plateau continental, de flysch gréseux et schisteux.

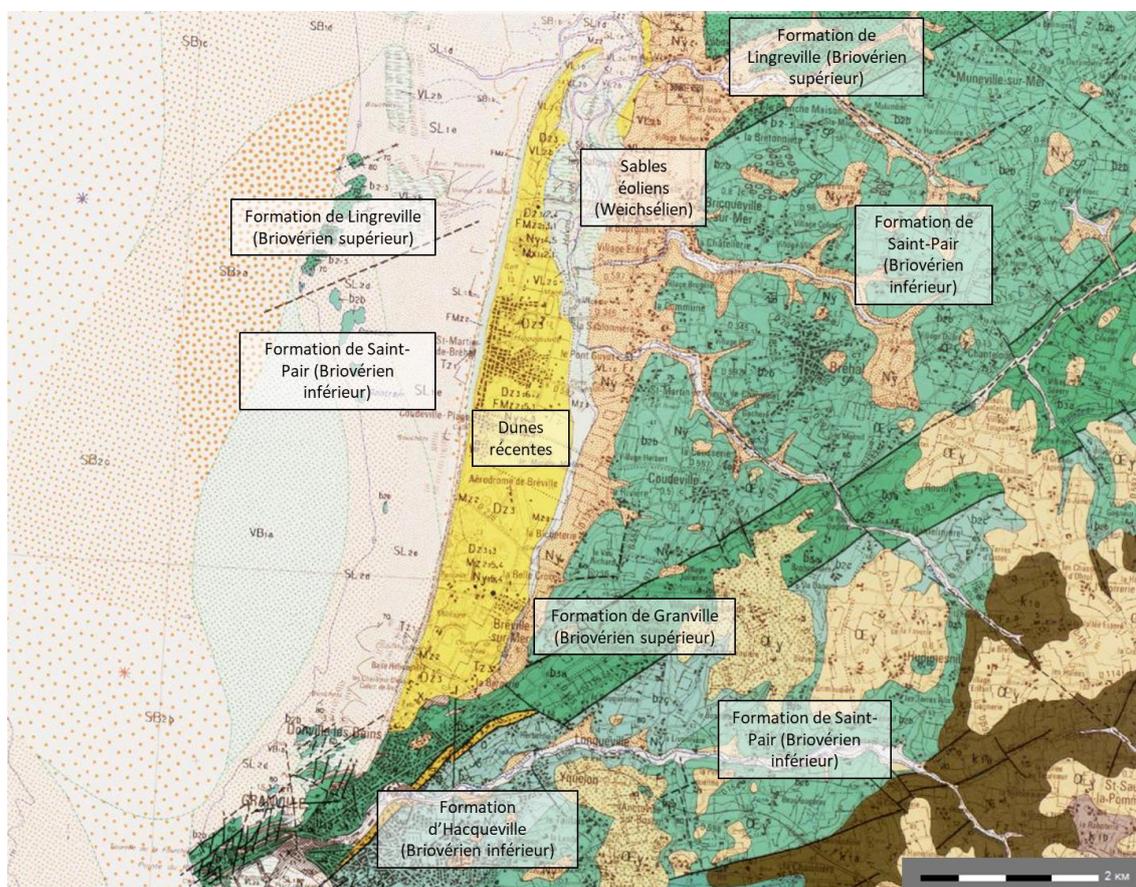


Figure 3. Formations géologiques présentes au Nord de la Pointe du Roc (Fond de carte : InfoTerre, BRGM).

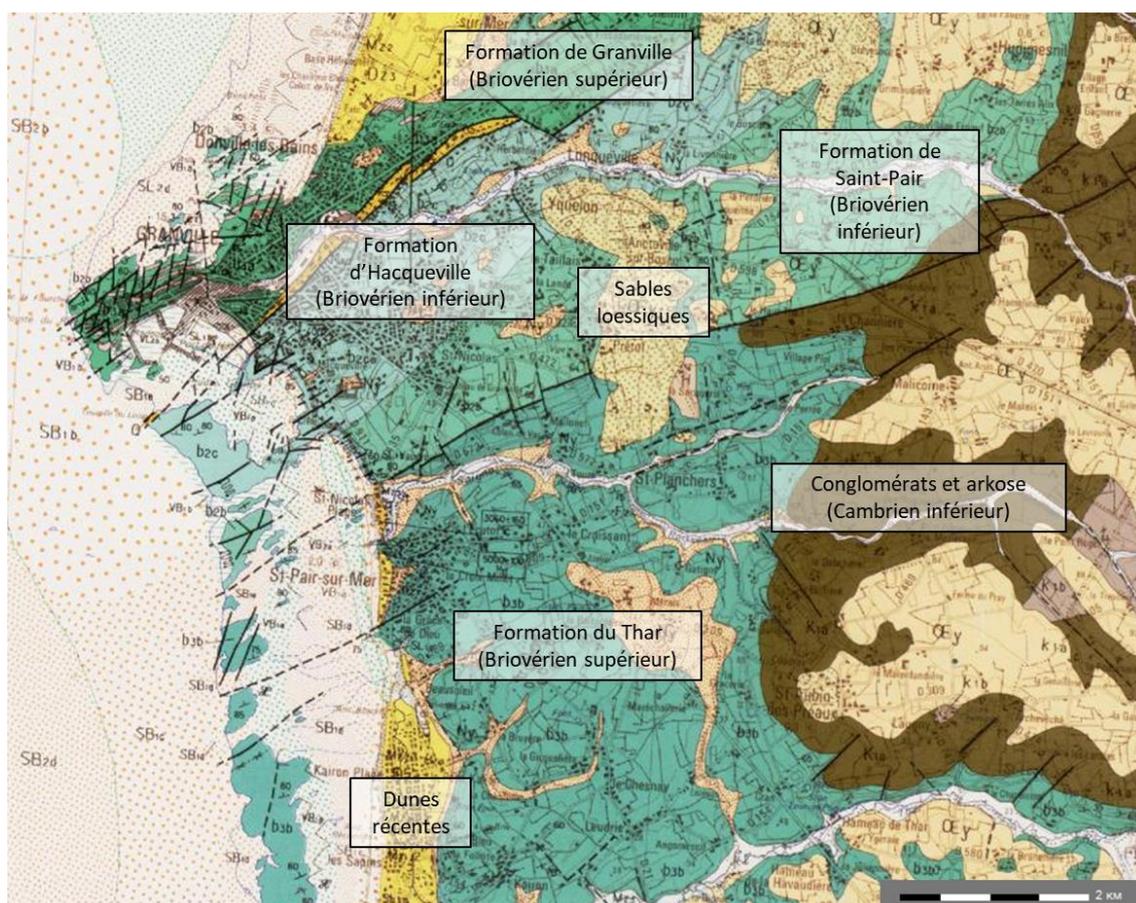


Figure 4. Formations géologiques présentes au Sud de la Pointe du Roc (Fond de carte : InfoTerre, BRGM).

2.3. GEOMORPHOLOGIE

La côte Ouest du Cotentin est caractérisée par la présence de cordons dunaires sableux plus ou moins bien développés, fréquemment surmontés de massifs dunaires localement interrompus par l'embouchure des havres. Ces cordons et massifs dunaires qui s'étendent sur plus de 65 km entre le Cap de Carteret au Nord et la Pointe du Roc (Granville) au Sud, se sont constitués sur la partie avancée d'une vaste plaine alluviale, limitée vers l'Est par une falaise morte parallèle à la côte, d'âge éémien (interglaciaire Riss-Würm, 120 000 ans BP¹ environ) recouverte de dépôts de solifluxion quaternaires (le head). Au-delà, le sédiment change peu à peu, lié à la présence de la baie du Mont-Saint-Michel et au changement des conditions dynamiques.

La frange littorale de la zone d'étude est essentiellement composée de sables fins à moyens (Figure 5). Elle est caractérisée par l'étendue de son estran, dû à une faible pente de la zone tidale, expliquant, entre autres, les forts marnages s'y appliquant, la présence de nombreuses concessions conchylicoles et ostréicole impactant les mouvements sédimentaires sur l'estran et la présence des havres, spécifique à la côte occidentale du Cotentin.

Les spécificités de la zone d'étude sont listées ci-après :

- Sous-cellule de Bricqueville - Bréhal : Très peu urbanisé, le littoral de Bricqueville est constitué d'un cordon dunaire sableux naturel largement développé. Il est bordé au Nord par le Havre de la Vanlée qui, malgré sa grande taille, n'est pas en relation avec un cours d'eau important mais avec une zone marécageuse. Sa flèche sableuse est orientée du Sud vers le Nord avec une évolution significative à

¹ BP : before present, l'année de référence étant l'année 1950

la fermeture et une tendance érosive marquée. Les zones basses susceptibles d'être immergées se situent en bord du havre non aménagé.

Le littoral de Saint-Martin-de-Bréhal et Coudeville, relativement bien urbanisé, est protégé par un ouvrage long de 2150 m. Une zone érosive se situe au Nord de la zone, semblant être apparue suite à la construction de l'épi augmentant le risque de submersion des parties basses retro-littorales. Le trait de côte est rectiligne jusqu'à Donville.

L'éventail deltaïque de la Vanlée n'est pas suffisamment puissant pour recouvrir les îlots rocheux présents au large de la rive.

- Sous-cellule de Bréville – Donville : Le littoral de Bréville y est relativement peu urbanisé, il est constitué d'un cordon dunaire bien développé. Seul un ouvrage en enrochement y est présent protégeant les 250 m de linéaire du Camping « L'Oasis de la Plage ».

Le cordon dunaire de Donville est, quant à lui, entrecoupé d'ouvrages enrochés protégeant les différents aménagements en arrière littoral. Des zones basses sont situées entre le Sud de Bréville et le Nord de Donville. D'après NLPD, le cordon dunaire à lui seul ne permettrait pas de protéger l'arrière-dune face à une tempête centennale.

- Sous-cellule de Granville : Le littoral devient rocheux à l'approche du Cap de Granville. La largeur de la zone intertidale se réduit à environ 1km et il n'affleure que quelques sables et sables vaseux entre les blocs de roches. La côte y est très stable du fait de la présence des roches qui la compose (Schistes et grés).
- Sous-cellule Saint-Pair – Jullouville : Au niveau de Saint-Nicolas plage, le littoral redevient sableux. Cependant, l'évolution sédimentaire, est fixée par la forte urbanisation de la zone. La plupart du linéaire côtier est, en effet, protégé par des ouvrages. Seule l'embouchure du Thar n'est pas enrochée et conserve une certaine liberté à l'origine de ses nombreuses divagations. Les apports terrestres provenant du cours d'eau restent anecdotiques.

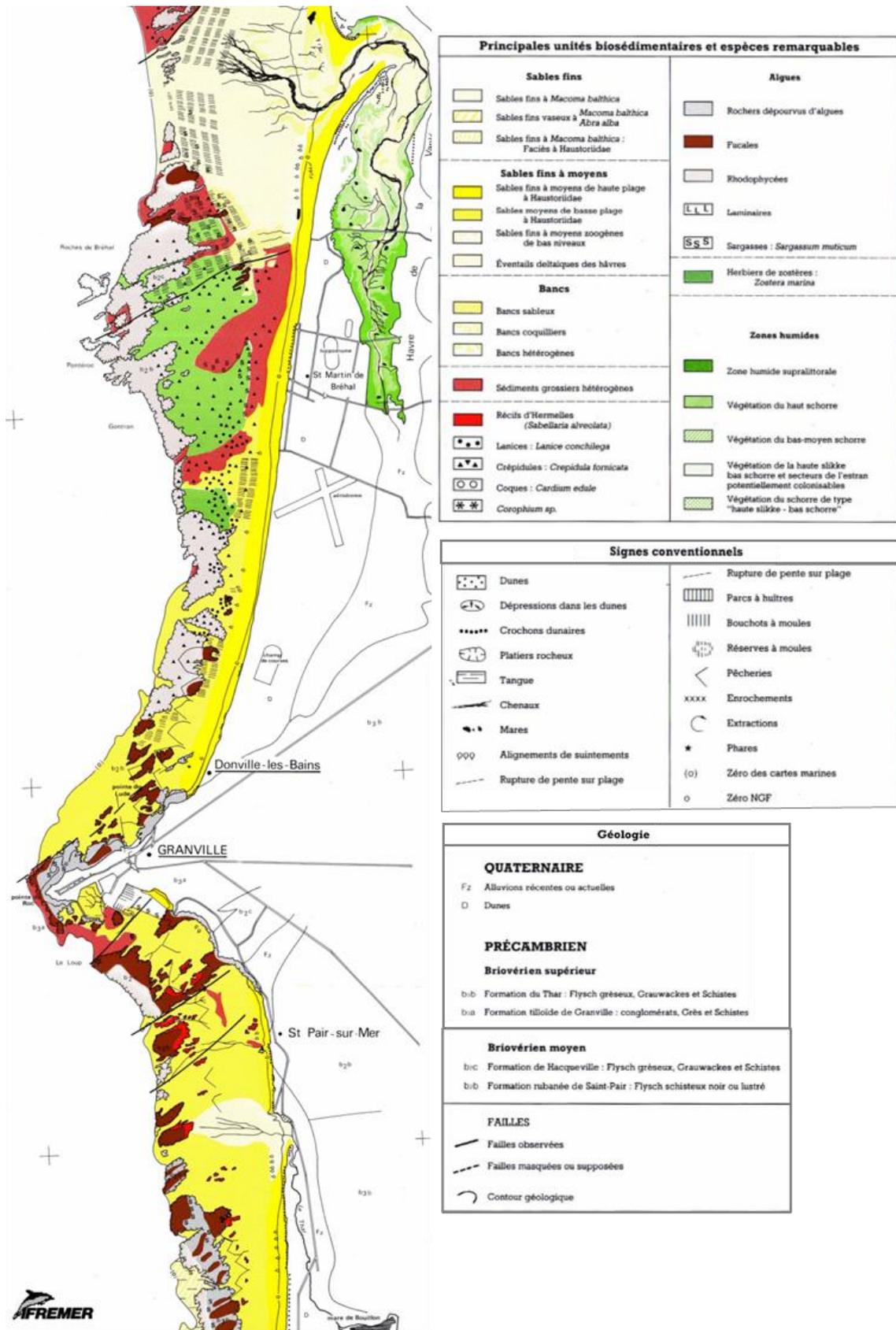


Figure 5. Carte biomorphosédimentaire de la zone intertidale et sa légende. Extrait de la carte au 1/25 000ème de la carte biomorphosédimentaire de la zone intertidale de Granville (Ifremer, 1987)

2.4. CONTEXTE SEDIMENTAIRE

La nature et la répartition des sédiments superficiels sur les estrans et les petits fonds sont directement liés aux conditions hydrodynamiques (houles et courants notamment). La zone d'étude est particulièrement bien protégée par les îles Anglo-Normandes et les hauts-fonds formant d'obstacles ou de freins à la propagation des houles. A l'inverse, il existe des couloirs qu'emprunteront préférentiellement les courants en emportant avec eux les particules les moins grossières. La complexité des conditions hydrodynamiques du site est à l'origine de la mosaïque de faciès sédimentaires qui peut s'observer au large de la zone d'étude.

Selon la carte de nature des fonds du SHOM (Figure 6 et Figure 7), le littoral de la zone d'étude est constitué essentiellement de sables fins. La présence des affleurements rocheux proches de la côte, explique les cailloutis et graviers pouvant se retrouver en haut de plage. Au niveau des zones les plus abritées de la vase peut y être retrouvée (Havre de la Vanlée, platier rocheux, port de Granville).

La zone de Granville marque la fin de la Côte du Cotentin et de ses grandes étendues de sable. La présence, plus au Sud, de la baie du Mont-Saint-Michel impacte la dynamique sédimentaire. Un changement de la composition sédimentaire est alors peu à peu perceptible traduit par la présence de sables vaseux en bas estrans.

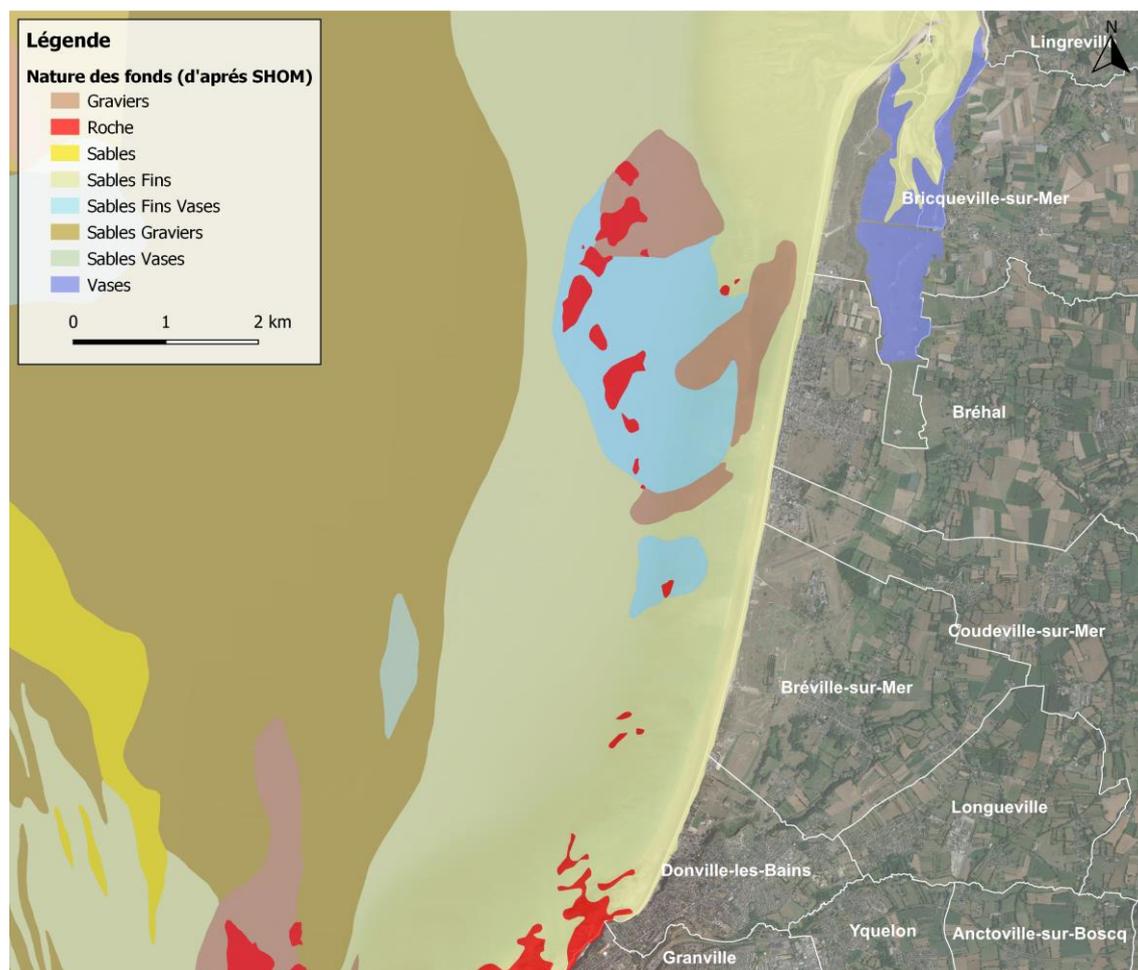


Figure 6. Carte de la Nature des fonds au Nord de la zone d'étude (Fond de plan : Google Earth, 2022).

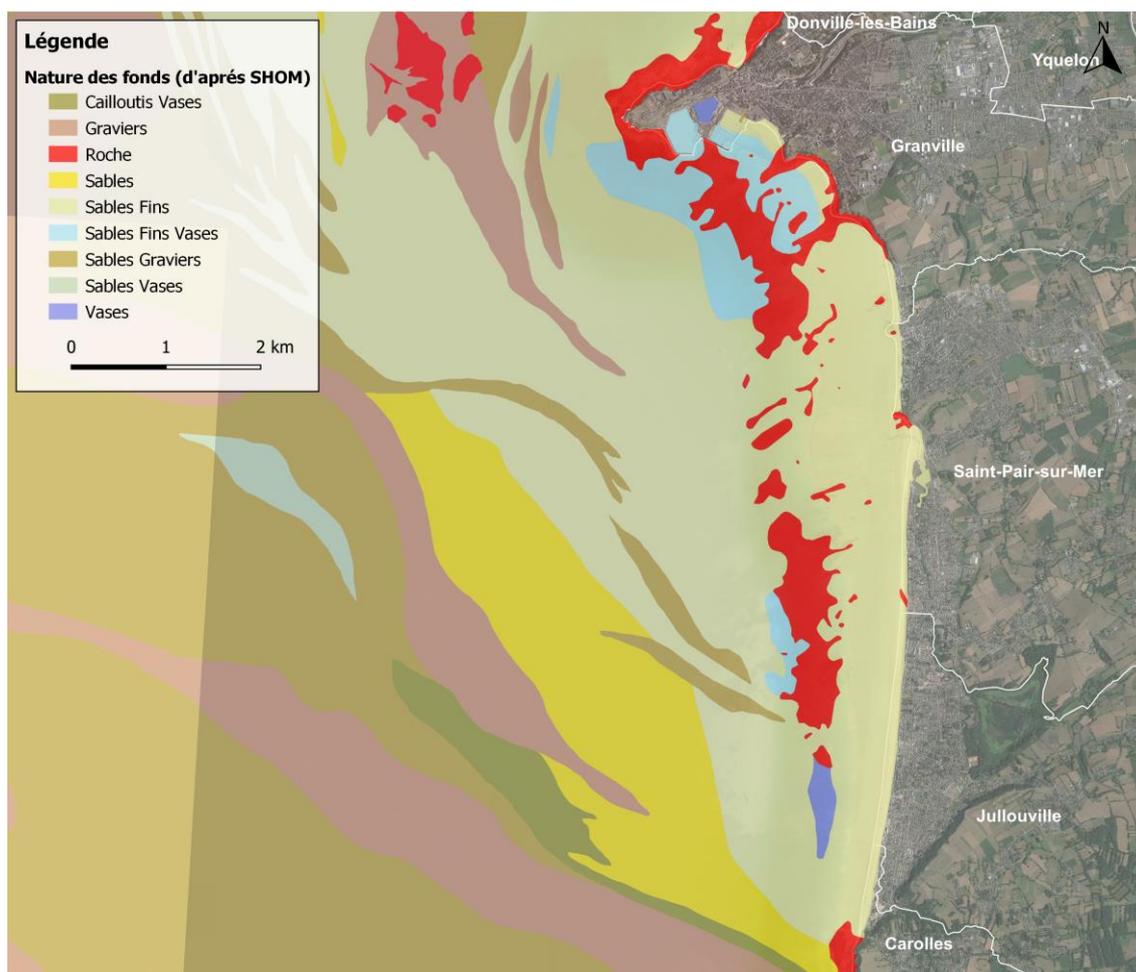


Figure 7. Carte de la Nature des fonds au Sud de la zone d'étude (Fond de plan : Google Earth, 2022).

2.5. MOUVEMENTS SEDIMENTAIRES

LEVOY et LARSONNEUR (1993) ont modélisé les conditions hydrodynamiques au droit de la côte Ouest du Cotentin, sur la base de données acquises sur le terrain dans le cadre de l'Étude Globale concernant la Défense Contre la Mer du Département de la Manche. Le modèle utilisé (HISWA) a été alimenté pour le secteur étudié à l'aide de données d'agitation acquises sur les sites des Trois Grunes et des Nattes (à l'Ouest de Carteret et de Blainville-sur-Mer), et sur le plateau des Minquiers (à l'Ouest-Nord-Ouest de Chausey).

D'après ce modèle, les houles atteignent le littoral de la zone d'étude avec une incidence le plus souvent orientée vers le Sud. Cette incidence oblique, de la houle déferlante, est à l'origine d'un courant résiduel orienté parallèlement au rivage : le courant de dérive littorale, globalement dirigé sur la zone d'étude du Nord vers le Sud. Ce courant est le principal agent de transport sur les estrans et en particulier les hauts estrans du littoral Ouest du Cotentin, en dehors des courants de remplissage et de vidange des havres. L'action de ces derniers est, en effet, essentielle dans la dynamique sédimentaire locale (contrairement au débit fluvial stricto sensu, relativement faible). Les courants de marée, dont l'influence est prédominante sur celle de l'agitation au-delà de la profondeur de fermeture (en domaine subtidal), peuvent cependant contribuer dans certaines conditions à transporter le sédiment remis en suspension par le déferlement de la houle sur l'estran.

Le courant de la dérive littorale agit en « dents de scie » (Figure 8) : les matériaux mis en suspension dans le déferlement sont transportés vers le haut estran avec une obliquité proche de celle des vagues incidentes (dans le « jet de rive », aussi appelé « uprush » ou « swash »), mais redescendent avec la « nappe de retrait » ou « backwash » selon une direction contrôlée par la gravité, c'est-à-dire selon la plus grande pente, le plus souvent perpendiculaire au trait de côte.

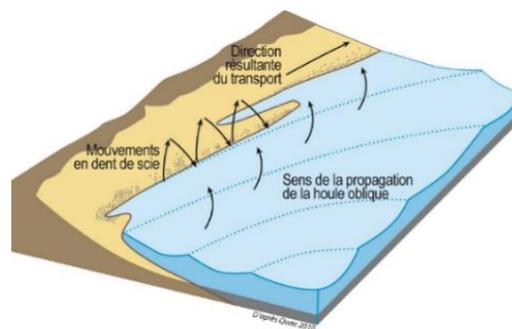


Figure 8. Transports littoraux longitudinaux (OBSCAT, 2017).

Intégrant les résultats de cette modélisation, ainsi que diverses données courantologiques, sédimentologiques et topométriques acquises *in situ*, LEVOY et LARSONNEUR (1993) ont modélisé les transports sédimentaires sur les plages de la côte Ouest du Cotentin. Sur la base des observations de terrain et des données récentes, CASAGEC a pu adapter le schéma des transits sédimentaires dressé par Levoy et Larsonneur, tel que proposé à la Figure 9. Seules les données disponibles pour la partie située entre le havre de Vanlée et Granville sont traitées dans la suite de cette section.

Contrairement au reste du territoire, la zone d'étude est soumise à un transit essentiellement orienté du Sud vers le Nord. Cette différence est, en partie due à la protection, des plateaux du Minquier et de Chausey dissipant la force de la houle et uniformisant les conditions au niveau de la côte. Les principaux éléments à retenir sont les suivants :

- Il y a convergence sédimentaire au niveau du Havre de la Vanlée avec un apport provenant du Sud beaucoup plus important (43 000 m³/an) que l'apport provenant du Nord (26 000 m³/an). Cette différence tend à déplacer la flèche sableuse de Bricqueville vers l'Ouest entraînant la fermeture progressive du havre.
- Le transit sédimentaire, orienté vers le Nord, est particulièrement important (43 000 m³/an) au droit du littoral de Saint-Martin-de-Bréhal au niveau du platier rocheux
- Ce dernier tend à diminuer et se stabiliser au niveau du littoral de Coudeville-sur-Mer et Bréville-sur-Mer dont le littoral est rectiligne et homogène.
- Puis le transport sédimentaire diverge pour s'orienter vers le Sud à au niveau de Donville les-Bains atteignant un apport de 11 000 m³/an.
- En se rapprochant du Cap de Granville, la dérive littorale retrouve une orientation Sud-Nord à raison de 8 000 m³/an.

Le secteur côtier de Saint-Martin-de-Bréhal à Donville-les-Bains a considérablement évolué depuis les années 1990, date de réalisation de ces études. La tendance à l'érosion et au recul du trait de côte observée jusqu'alors s'est inversée. La haute et la moyenne plage se sont fortement engraisées et le trait de côte a progressé sur plusieurs dizaines de mètres.

Outre la morphologie du littoral, il est possible que le régime général de l'agitation ait évolué au cours de ces vingt dernières années et soit sensiblement différent de celui correspondant aux données d'entrée du modèle hydrodynamique mis en œuvre en 1992. L'intensité et le sens du transit, ainsi que la localisation des points de convergence / divergence ont, eux aussi, pu évoluer. Les ouvrages transversaux de haute plage, observés en octobre 2016 entre Saint-Martin-de-Bréhal et Donville-les-Bains, ne présentaient pas d'accumulation sédimentaire notable, que ce soit sur leur flanc nord ou sur leur flanc sud. Les premiers signes d'érosion, avec abaissement du niveau de haute plage et microfaisle d'érosion dans la dune, n'ont été constatés qu'aux abords de la cale nord de Saint-Martin-de-Bréhal, et notamment au Nord de l'épi mis en place au niveau de la zone naturelle non défendue. Seule la cale de Donville-les-Bains présente

une légère accumulation sur son flanc sud, qui peut laisser penser à un transit modéré sud-Nord. Quoiqu'il en soit, le niveau de la haute plage reste élevé jusqu'aux falaises de la Pointe du Lude vers Granville.

En conclusion, les évaluations de transit sédimentaire (sens et intensité) présentées dans l'Etude Globale de Défense contre la Mer de la Côte ouest du Cotentin s'appliquent au contexte des années 1990, contexte qui a considérablement évolué pour le secteur côtier de la zone d'étude.

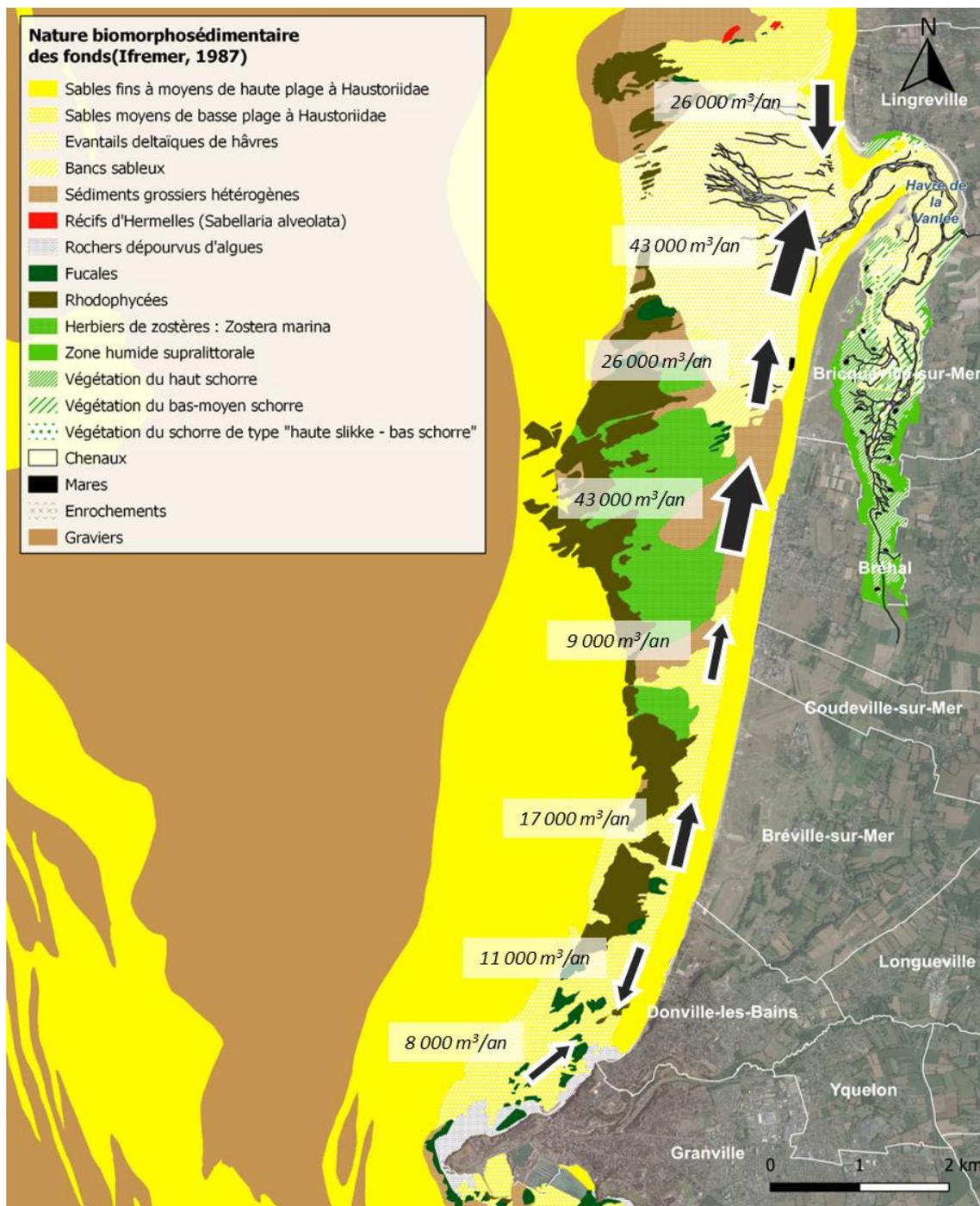


Figure 9. Orientation et intensité du transit sédimentaire sur le littoral de Bricqueville-sur-Mer à Granville, adaptée des travaux de Levoy et Larsonneur (1993).

3. ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DU LITTORAL

Conformément à la tanche ferme, la suite de l'étude repose sur l'analyse du littoral compris entre le havre de Vanlée et Granville. Ne sont donc pas traité ici les données pour le littoral de Granville, St-pair-sur-Mer et Jullouville.

3.1. ÉVOLUTION HISTORIQUE DU TRAIT DE CÔTE

Afin d'analyser, de manière exhaustive, les évolutions sur long-terme du trait de côte entre le havre de Vanlée et Granville, deux sources de données ont été utilisées () :

- Les traits de côte 1947 / 1977 / 1982 / 1992 / 2001 / 2010 du réseau d'observation du littoral de Normandie-Hauts de France (ROL NHF). Ces traits de côte correspondent ici à la limite de la végétation, assimilable à la crête de dune,
- Le trait de côte 2020 issu de la digitalisation, par CASAGEC INGENIERIE, de l'orthophotographie 2020 du ROLNHF.

Sur la base de ces données, des taux d'évolutions de proche en proche ont pu être calculés au niveau de transects régulièrement espacés de 50 m. Ces taux d'évolution, exprimés en m/an, ont par la suite été représentés sous forme de diagramme (en bleu les secteurs en érosion et en rouge les secteurs en accrétion), pour les 6 périodes temporelles suivantes : 1947 – 1977 / 1977 – 1982 / 1982 – 1992 / 1992 – 2001 / 2001 – 2010 / 2010 – 2020. Sur ces diagrammes, les limites communales sont représentées par des barres jaunes et les ouvrages transversaux au trait de côte sont représentés par des barres noires.

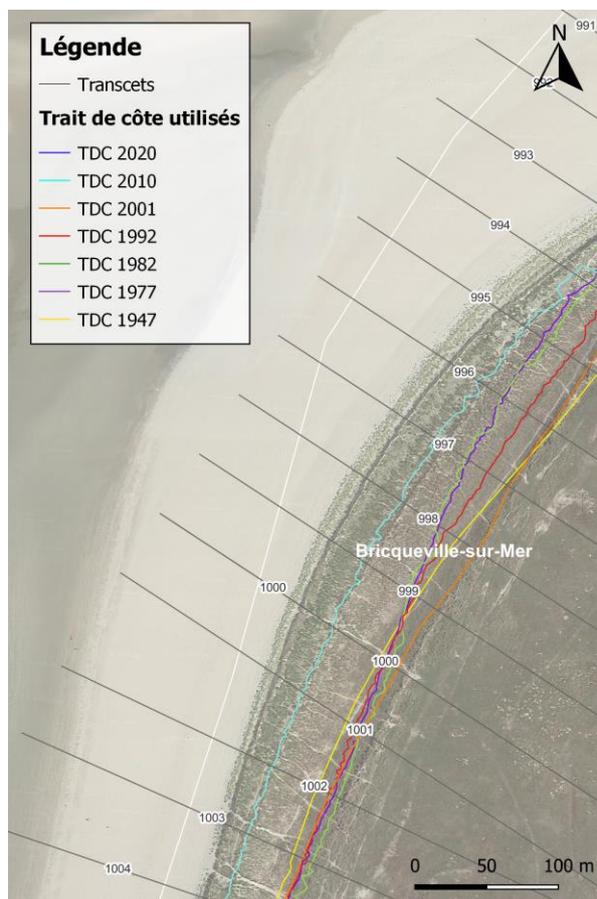


Figure 10. Illustration (Enracinement de la flèche sableuse du havre de la Vanlée) de l'évolution de la position du trait de côte (localisation des transects espacés de 50m) utilisés pour l'analyse de l'évolution (Fond de plan : Google Earth, 2022).

3.1.1. Analyse diachronique de la sous-cellule Bricqueville – Bréhal

Dans un premier temps, la Figure 11 met en évidence les évolutions du littoral sur les périodes 1947-1977, 1977-1982 et 1982-1992 pour chacun des transects créés sur la zone concernées. Puis dans un second temps, la Figure 12 illustre les évolutions sur les trois périodes 1992-2001, 2001-2010 et 2010-2020. D'après ces analyses, les points suivants sont à noter :

- La flèche sableuse du havre de la Vanlée : une évolution bimodale est observée avec d'une part une migration globale de la flèche sableuse vers l'Est (-8 m/an atteint en 2010-2020), et d'autre part, un engraissement de l'enracinement de la flèche avec un maximum de $+7$ m/an entre 2002 et 2010,
- Le cordon dunaire de Bricqueville jusqu'à l'ouvrage de Saint-Martin-de-Bréhal : Mise à part une période de fortes évolutions autour des années 1982, les évolutions sont peu significatives sur le secteur, avec une alternance du taux d'avancée et de recul de faibles amplitudes (comprise entre $+2$ et -1 m/an).

A noter en revanche, les taux de recul (environ -1,5m/an au maximum) plus significatifs au Nord de l'épi, visible sur la période 2010-2020 et à l'origine de la formation de l'encoche sédimentaire,

- Bréhal et Coudeville : La grande majorité du littoral de ces deux communes est fixée par un ouvrage en enrochements. Le trait de côte n'a donc pas évolué sur cette partie.

3.1.2. Analyse diachronique de la sous-cellule Bréville – Donville

La Figure 13 présente les résultats d'évolution du trait de côte de la sous-cellule Bréville – Donville sur les périodes 1947-1977, 1977-1982 et 1982-1992. La Figure 14 présente ces mêmes résultats sur la période 1992-2001, 2001-2010 et 2010-2020. Les points suivants sont à retenir :

- Une forte tendance au recul du trait de côte de 1947 à 1992 avec des reculs maximaux de -4,5 m/an atteint entre 1977 et 1982,
- La tendance s'inverse à partir de 1992 avec un engraissement généralisé jusqu'en 2010 (taux d'évolution compris entre +2 et +4 m/an),
- A partir de 2010, l'ensemble de la zone subit un recul du trait de côte de l'ordre de -1m/an environ.
- Au Sud de cette zone, le littoral est en grande majorité protégé par des ouvrages fixant le trait de côte.

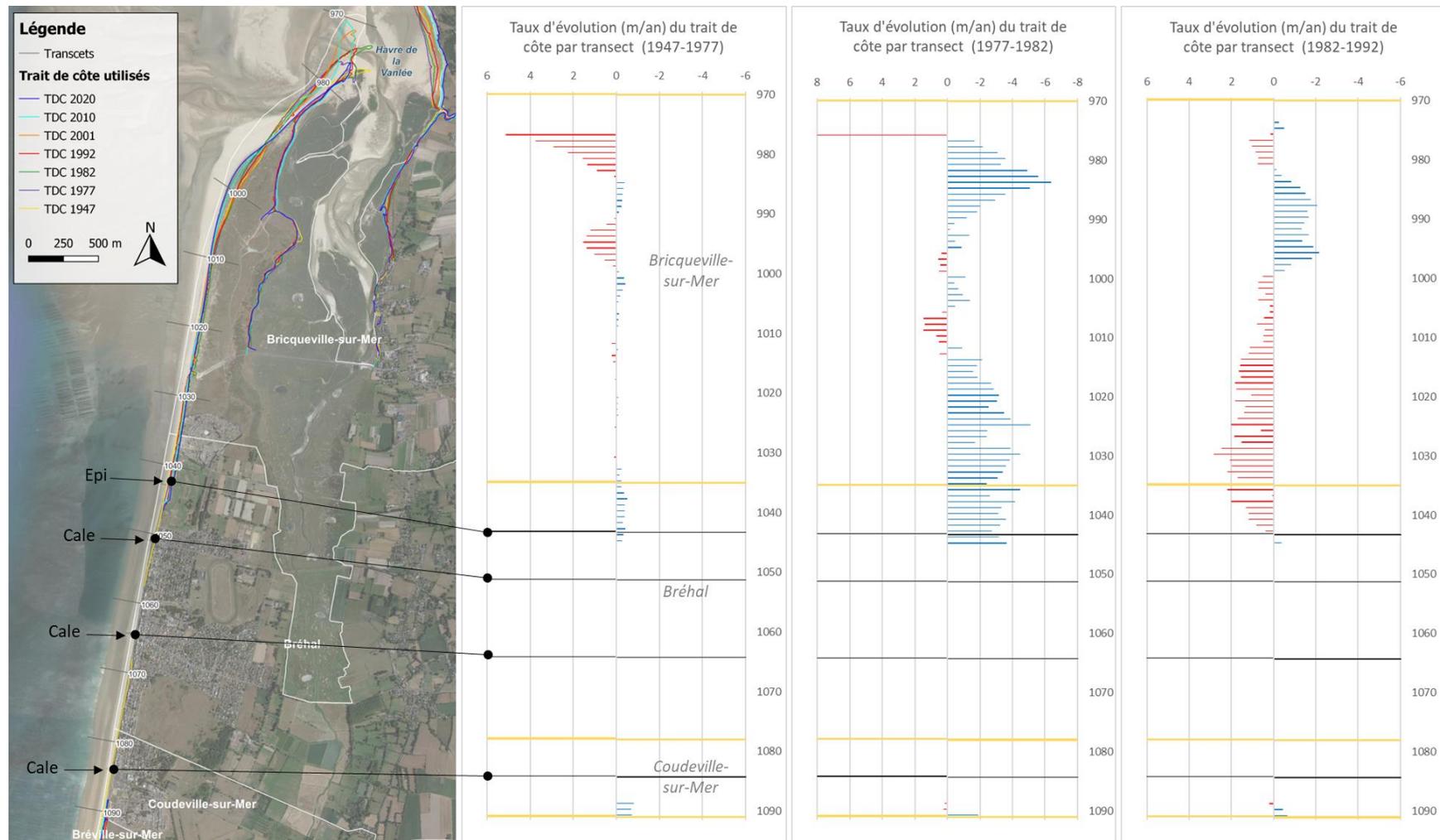


Figure 11. Variation des taux d'évolutions du trait de côte de la sous-cellule de Bricqueville – Bréhal sur les périodes 1947-1977, 1977-1982 et 1982-1992 (avancée en rouge / recul en bleu). Les traits jaunes schématisent les limites communales et les traits noirs les ouvrages transversaux au trait de côte.

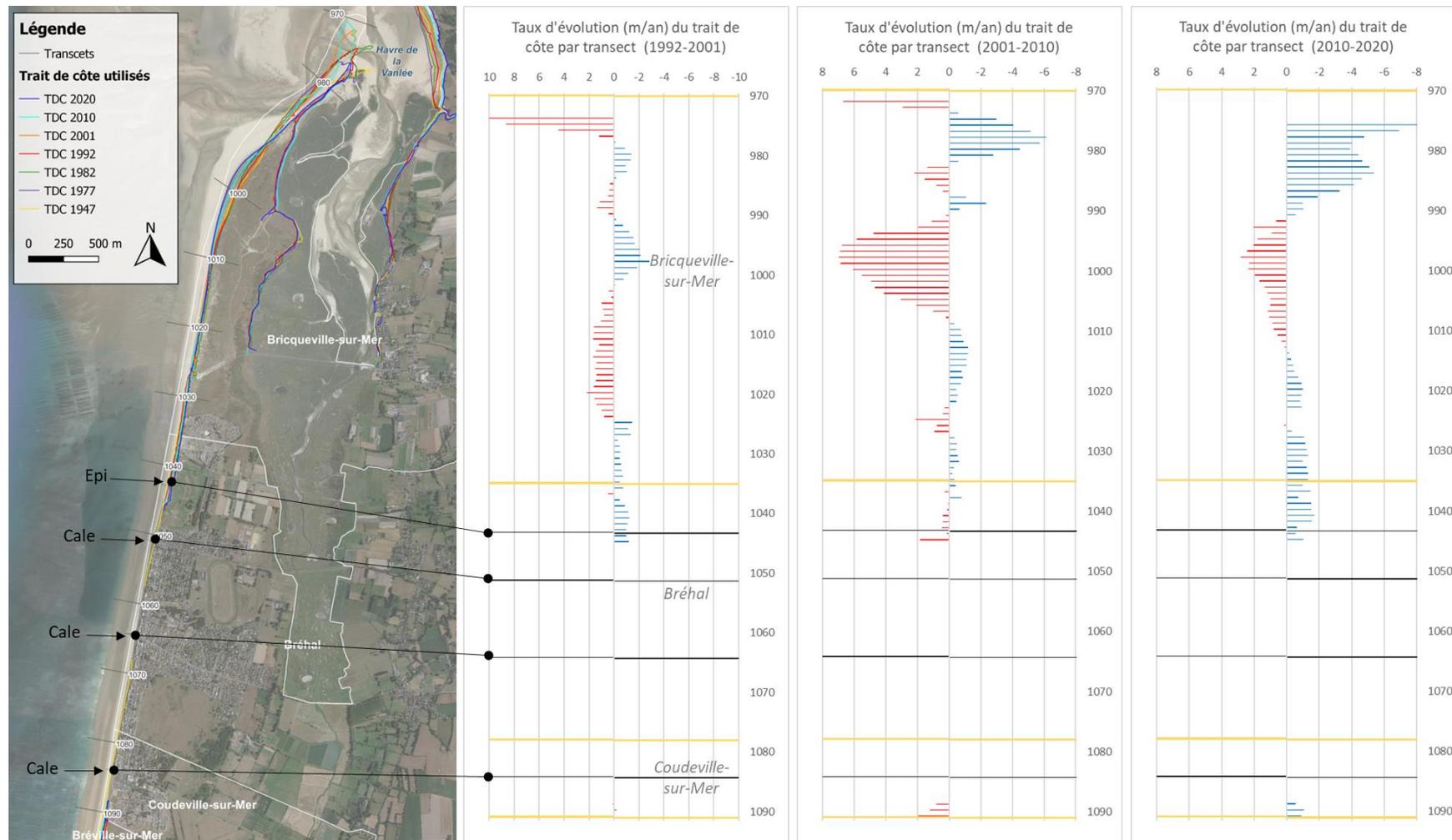


Figure 12. Variation des taux d'évolutions du trait de côte de la sous-cellule de Bricqueville – Bréhal sur les périodes 1992-2001, 2001-2010 et 2010-2020 (avancée en rouge / recul en bleu). Les traits jaunes schématisent les limites communales et les traits noirs les ouvrages transversaux au trait de côte.

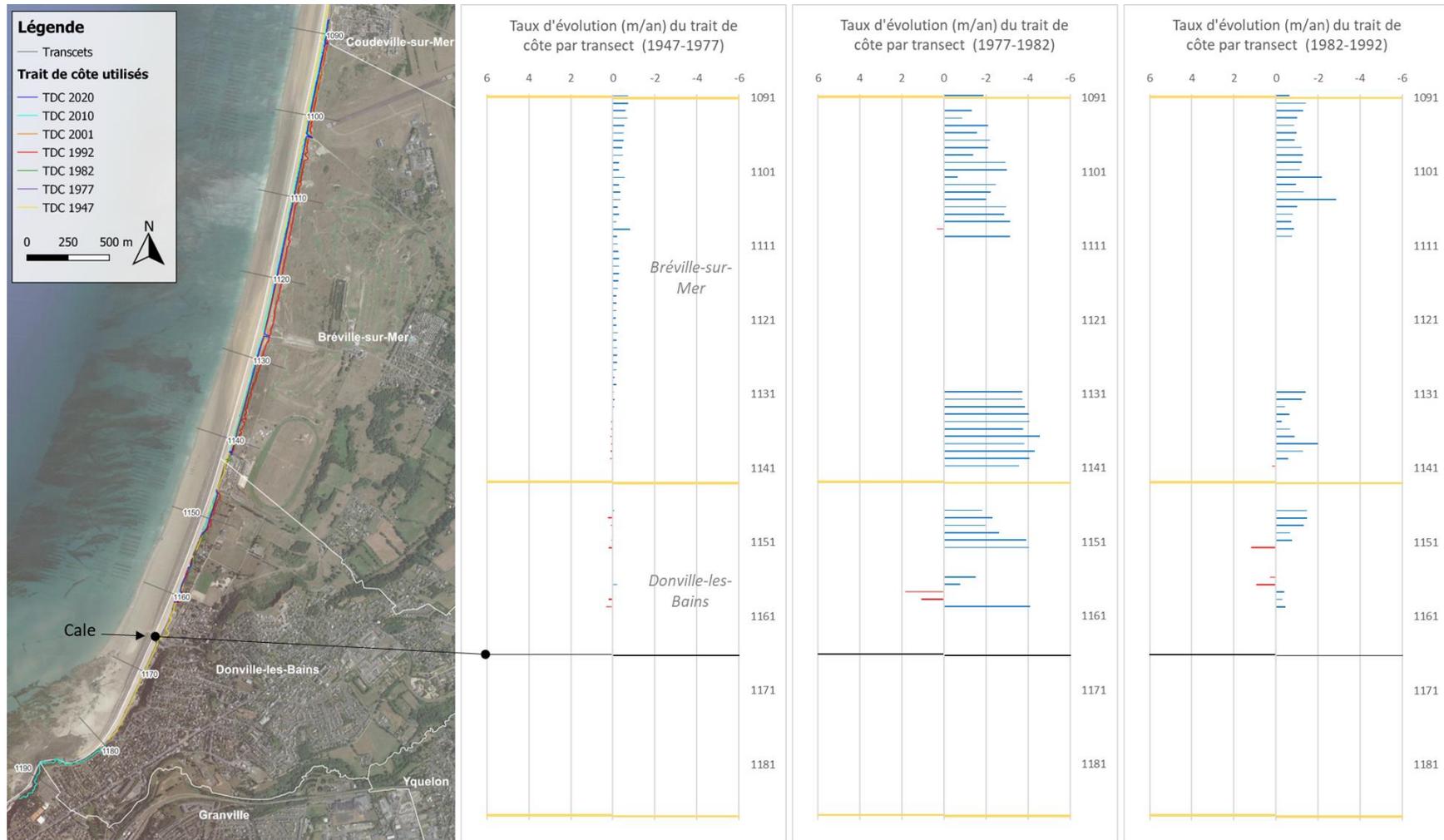


Figure 13. Variation des taux d'évolutions du trait de côte de la sous-cellule de Bréville – Donville sur les périodes 1947-1977, 1977-1982 et 1982-1992 (avancée en rouge / recul en bleu). Les traits jaunes schématisent les limites communales et les traits noirs les ouvrages transversaux au trait de côte.

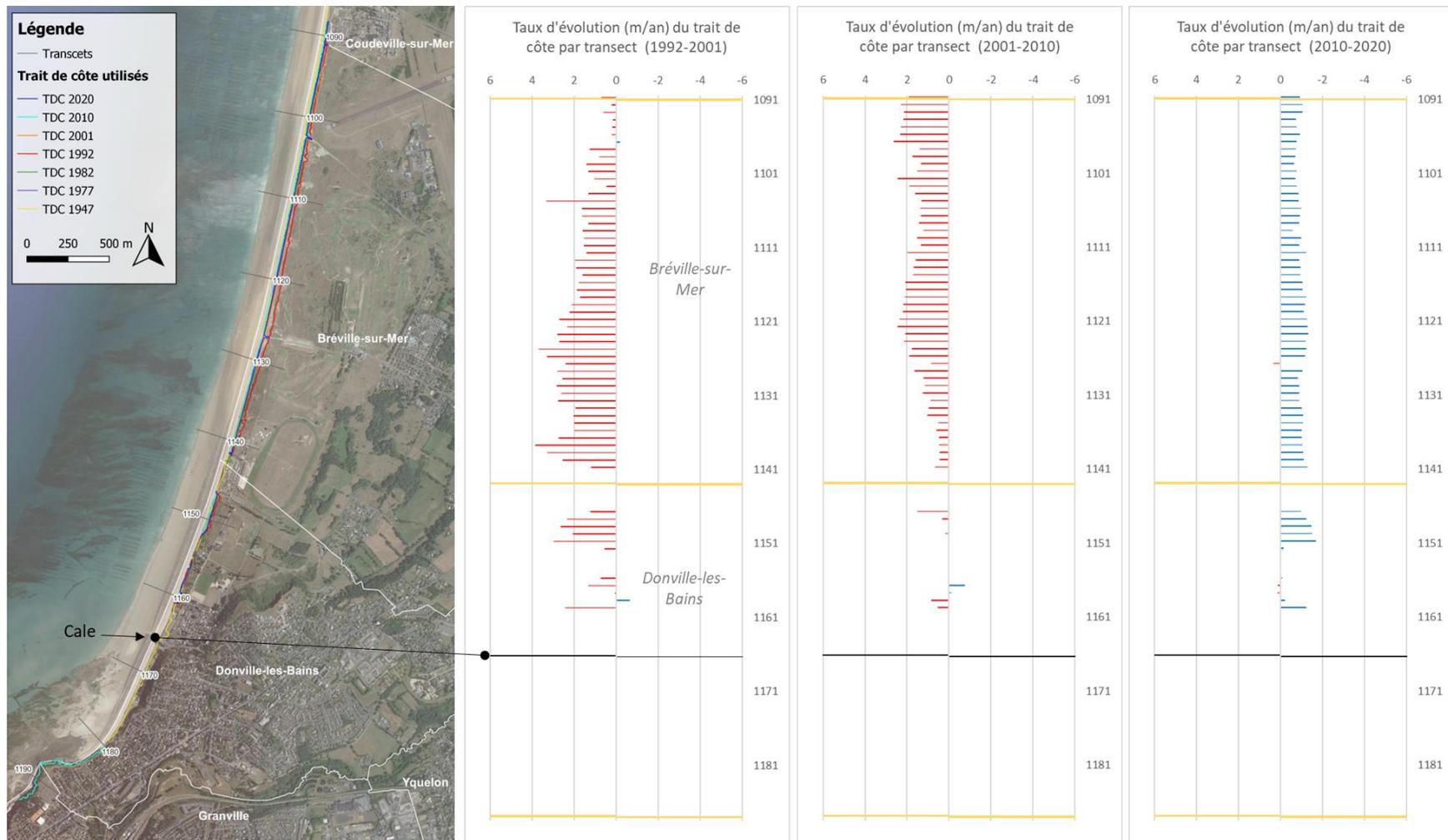


Figure 14. Variation des taux d'évolutions du trait de côte de la sous-cellule de Bréville – Donville sur les périodes 1992-2001, 2001-2010 et 2010-2020 (avancée en rouge / recul en bleu). Les traits jaunes schématisent les limites communales et les traits noirs les ouvrages transversaux au trait de côte.

3.2. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE DE PROTECTION DE BREHAL- COUDEVILLE

A l'instar des autres communes de la Côte du Cotentin, le littoral de Saint-Martin-de-Bréhal et de Coudeville-sur-Mer, constitué de substrat sableux, est soumis à l'érosion depuis les dernières décennies mettant en péril les aménagements arrière-littoraux.

Ce constat a été à l'origine de la construction, en 1970, d'une digue en enrochement protégeant la grande majorité du littoral de Saint-Martin-de-Bréhal et de Coudeville-sur-Mer. Des travaux de confortement et de réhausse de la crête ont été réalisés en 2000-2001.

L'ouvrage couvre actuellement un linéaire de 2 150 m pour superficie totale estimée à environ 33 000 m². Sur la base du levé topographique drone de mai 2022 et des coupes types historiques (Figure 15 et Figure 16), les caractéristiques principales de cette carapace en enrochements sont détaillées en suivant :

- Niveau de crête : + 10,30 m NGF ;
- Pente de talus variable : 3H / 2V à 2H / 1V (Horizontal / Vertical) ;
- Carapace en enrochements :
 - Blocométrie : 0,5 - 4,0 t (blocométrie initiale de 0,5 - 2 t et reprise de la crête avec des blocs plus conséquents de l'ordre de 4 t)
 - Epaisseur variable : 1,5 à 2,5 m (1 à 2 couches d'enrochements) ;
- Sous-couche constituée de moellons de 100 - 400 mm ;
- Couche filtre composée de matériaux fortement argileux ;
- Niveau de pied d'ouvrage : + 3,00 m NGF (pas de butée de pied).

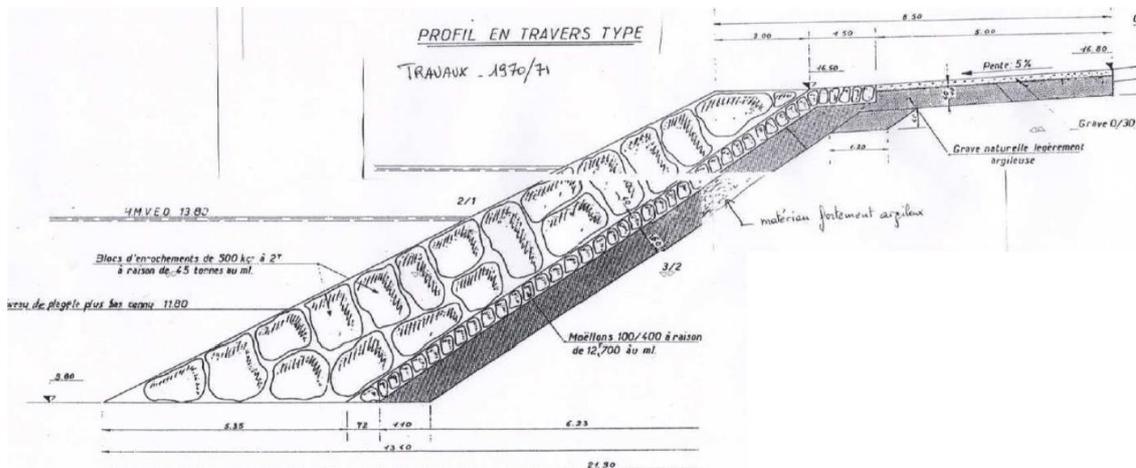


Figure 15. Coupe-type de l'ouvrage construit en 1970.

Le long du linéaire enroché, 11 escaliers permettent l'accès à la plage et 4 cales de mise à l'eau permettent l'accès à l'estran.

L'ouvrage est prolongé au Sud par un cordon en enrochement en pied de dune sableuse sur environ 140 m.

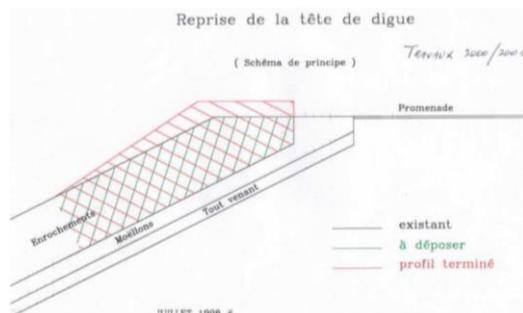


Figure 16. Reprise de la crête de la digue en 2000-2001.



Figure 17. Photographie de la protection en enrochements (02/2021, CASAGEC Ingénierie).



Figure 18. Photographie du cordon en enrochements au Sud de la protection en enrochements (11/2022, CASAGEC Ingénierie).

3.3. ÉVOLUTION RECENTE DU TRAIT DE CÔTE

3.3.1. Suivi du trait de côte, hauteur de sable et profil de plage

Le conseil départemental de la Manche (CD 50) assure un suivi de l'évolution du littoral Ouest du Cotentin depuis le début des années 1990. Les suivis ont été réalisés par des moyens terrestres entre 1992 et 2008 (trois levés annuels), au droit d'un réseau de bornes régulièrement implantées sur les hauts estrans (Figure 19), puis par laser aéroporté entre 2009 et 2021 (dix levés au total).

Au niveau de chacune de ces stations², 3 types d'informations peuvent être appréhendés :

- Profils de plage ;
- Trait de côte ;
- Hauteurs de sable (mesurées à une vingtaine de mètres du trait de côte).

Dans le cadre de la présente étude, l'ensemble de ces données a été analysé par CASAGEC INGENIERIE et des planches synthétiques reprenant l'ensemble des évolutions par station ont été produites et fournies au Conseil Départemental de la Manche.



Figure 19. Exemple de localisation des stations de suivi du littoral de Saint-Martin-de-Bréhal et de Coudeville-sur-Mer (Fond de plan : Google Earth, 2019).

La compilation des données et leur représentation au travers de graphique unique par station permettent de disposer, d'une vision d'ensemble des évolutions passées au niveau de chacune d'entre elles, et cela, sur l'ensemble de la période de suivi.

La Figure 20 illustre les graphiques obtenus pour l'évolution du trait de côte et la hauteur de plage sur la période 1992 à 2022.

Sur la base de ces données, une valeur moyenne de taux de recul (en m/an) et d'évolution de la hauteur de sable (en m/an) a été calculée au niveau de chacune des stations, sur la base de la comparaison entre la donnée la plus ancienne d'une part et la plus récente d'autre part. Ces valeurs sont présentées dans les parties suivantes au sein des différents tableaux, associées à un commentaire expliquant brièvement les tendances mises en évidence sur chacune des stations.

² Aucune information de trait de côte n'est disponible au niveau des stations localisées au droit d'ouvrage longitudinal. Le trait de côte étant ici fixé, il n'évolue pas dans le temps.

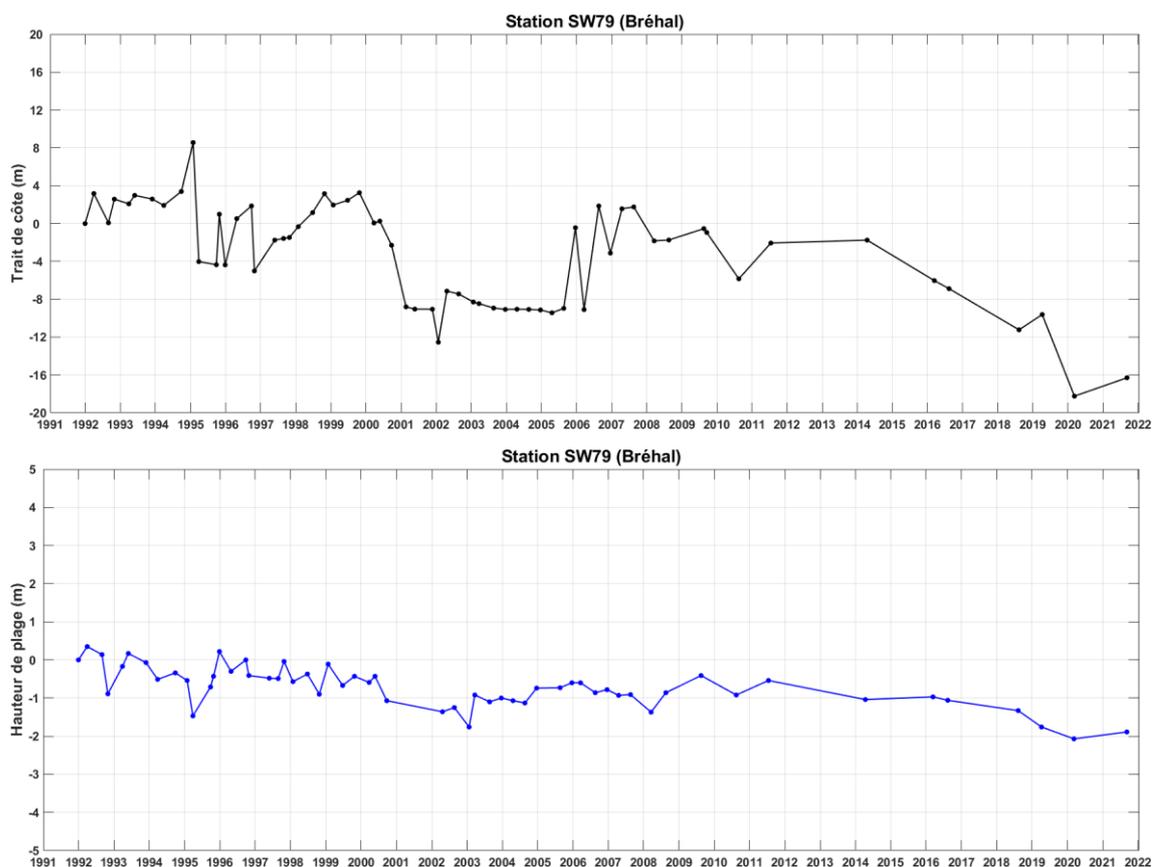


Figure 20. Evolution du trait de côte (en haut) et de la hauteur de plage (en bas) au niveau de la station SW79 (CASAGEC INGENIERIE, d'après les données du CD 50).

3.3.1.1. Sous-cellule de Briqueville-Bréhal

Les résultats de suivis pour le littoral de Briqueville-sur-Mer, Bréhal et de Coudeville-sur-Mer sont présentés dans le Tableau 1 et le Tableau 2. Les différents points suivants sont à noter :

- La flèche sableuse au Sud du havre de la Vanlée subit un recul du trait de côte important ($-1,3$ m/an) forçant le débouché du havre à évoluer vers l'Est,
- Le trait de côte du reste du littoral de Briqueville montre une tendance à l'avancée ($+2,7$ m/an) avec une légère diminution au Sud de la commune ($+0,2$ m/an),
- Le trait de côte au Nord de l'ouvrage de protection de Bréhal – Coudeville et de l'épi recul à hauteur de $-0,55$ m/an depuis 1992. Une intensification du phénomène est visible depuis 2014,
- Le reste du linéaire côtier de la sous-cellule est ici fixé par la digue en enrochement. Tout de fois, il est à noter un abaissement du niveau de sable en pied d'ouvrage :
 - Le nord de l'ouvrage (station SW80 et SW81) subit un abaissement généralisé depuis 1993 à raison de -5 à -4 cm/an sur la période d'étude,
 - Le Sud de l'ouvrage (stations SW82 et SW83) à subit une inversion de tendance. Depuis 2017, la hauteur de plage diminue de manière importante traduit par un taux d'abaissement de -3 à -2 cm/an.

La Figure 21 illustre l'évolution des profils de plage pour les 4 stations, SW80, SW81, SW82, SW83 situées sur les communes de Bréhal et Coudeville-sur-Mer au droit de l'ouvrage de protection. Les derniers profils en date (2021) semblent correspondre à l'enveloppe basse indiquée sur chaque graphique par la courbe rouge.

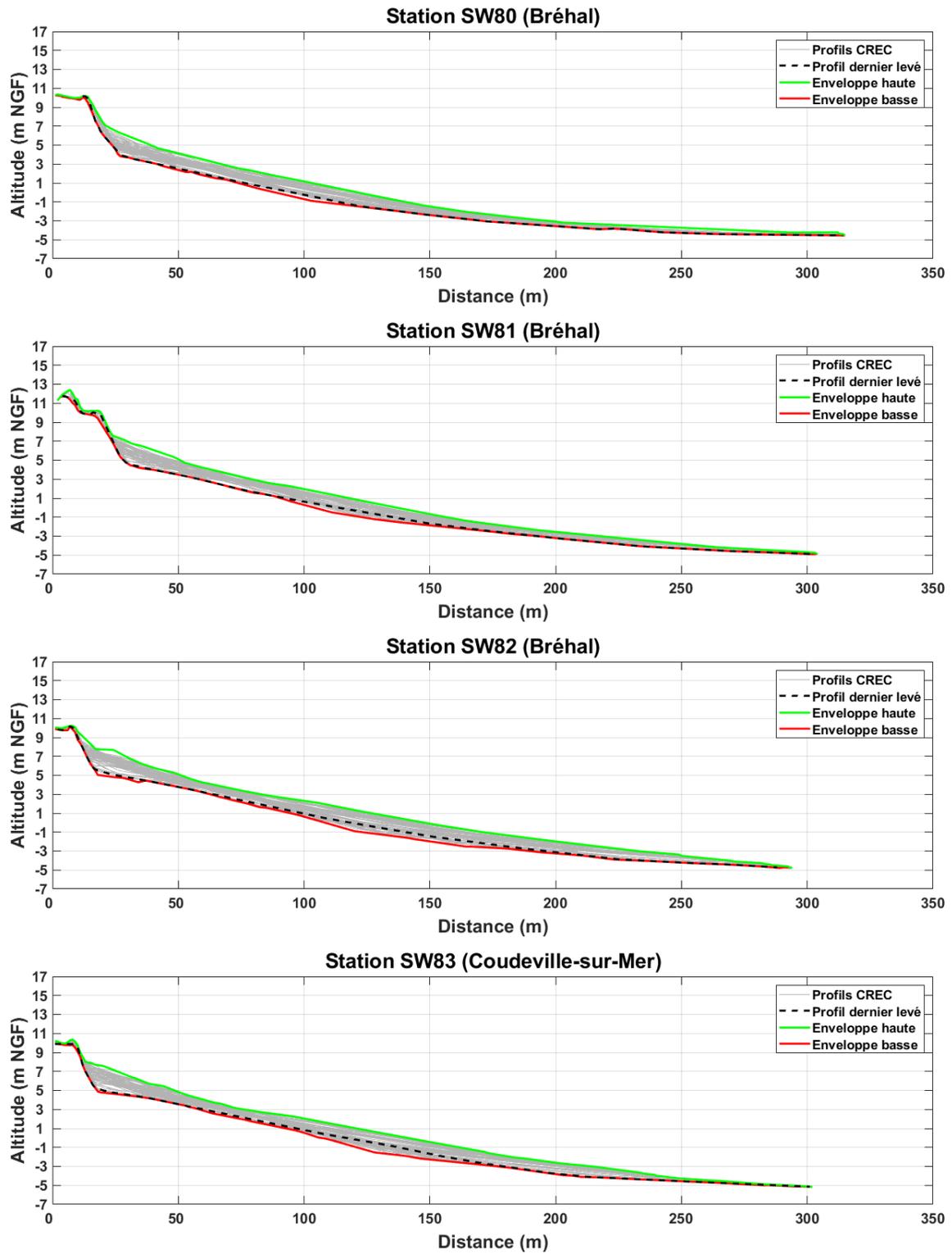


Figure 21. Evolution du profil de plage au niveau de l'ouvrage de protection du littoral de Saint-Martin-de-Bréhal et d Coudeville-sur-Mer (CASAGEC INGENIERIE, d'après les données du CD 50).

Tableau 1. Valeurs moyennes par station du taux d'évolution du trait de côte (TDC=trait de côte) et de la hauteur de sable (HDP=Hauteur de plage) au niveau du littoral de Briqueville-sur-Mer (CASAGEC INGENIERIE, d'après données CREC-Unicaen).

Station	TDC (m/an)	HDP (m/an)	Commentaires – Evolution 1992/2021	Localisation des stations
SW75	-1,29	-0,03	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : forte érosion ○ HDP : abaissement de 3 cm/an ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : érosion depuis 1998 ○ HDP : alternance perte/gain avec tendance à la diminution depuis 2011 	
SW76	2,72	0,03	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : forte accrétion ○ HDP : augmentation de 3 cm/an ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : accrétion depuis 2000 ○ HDP : stable 	
SW77	0,61	0,05	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : faible accrétion ○ HDP : augmentation de 5 cm/an ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : stable ○ HDP : stable 	
SW78	0,23	-0,01	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : faible érosion ○ HDP : abaissement de 1 cm/an ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : stable avec une tendance à la diminution depuis 2012 ○ HDP : alternance perte/gain avec une tendance à la diminution depuis 2014 	

Tableau 2. Valeurs moyennes par station du taux d'évolution du trait de côte (TDC=trait de côte) et de la hauteur de sable (HDP=Hauteur de plage) au niveau du littoral de Saint-Martin-de-Bréhal et de Coudeville-sur-Mer (CASAGEC INGENIERIE, d'après données CREC-Unicaen).

Station	TDC (m/an)	HDP (m/an)	Commentaires – Evolution 1992/2021	Localisation des stations
SW79	-0,55	-0,06	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : érosion moyenne ○ HDP : abaissement de 6 cm/an ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : alternance perte/gain avec une tendance à l'érosion depuis 2011 ○ HDP : stable avec une tendance à la diminution depuis 2012 	
SW80		-0,05	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : pas d'évolution car fixé ○ HDP : abaissement de 5 cm/an ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : tendance à la diminution depuis 1993 	
SW81		-0,04	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : pas d'évolution car fixé ○ HDP : augmentation de 4 cm/an ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : pas d'évolution car fixé ○ HDP : alternance perte/gain avec un abaissement depuis 2017 	
SW82		-0,03	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : pas d'évolution car fixé ○ HDP : abaissement de 1 cm/an ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : pas d'évolution car fixé ○ HDP : alternance perte/gain avec un abaissement depuis 2017 	
SW83		-0,02	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : pas d'évolution car fixé ○ HDP : abaissement de 2 cm/an ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : pas d'évolution car fixé ○ HDP : alternance perte/gain avec un abaissement depuis 2017 	

3.3.1.2. Sous-cellule de Bréville – Donville

Les résultats de suivis pour le littoral de Bréville-sur-Mer et de Donville-les-Bains sont présentés dans le Tableau 3. Sur cette partie, 2 zones peuvent être différenciées :

- Au Nord, où le littoral évolue naturellement, la tendance est à l'avancée généralisée du trait de côte (taux maximum de +83 cm/an). Aucune tendance n'est généralisable concernant la hauteur de sable, les résultats fluctuent entre abaissement et augmentation selon les stations,
- Au Sud, le littoral est majoritairement protégé par des ouvrages fixant le trait de côte. La hauteur de plage reste ici stable.

Tableau 3. Valeurs moyennes par station du taux d'évolution du trait de côte (TDC=trait de côte) et de la hauteur de sable (HDP=Hauteur de plage) au niveau du littoral de Bréville-sur-Mer et de Donville-les-Bains (CASAGEC INGENIERIE, d'après données CREC-Unicaen).

Station	TDC (m/an)	HDP (m/an)	Commentaires – Evolution 1992/2021	Localisation des stations
SW84	0,66	-0,06	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : accrétion moyenne ○ HDP : abaissement de 6 cm/an ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : accrétion jusqu'en 2006 puis stabilisation ○ HDP : abaissement depuis 2002 s'accroissant depuis 2019 	
SW85	0,83	0,04	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : accrétion moyenne ○ HDP : augmentation de 4 cm/an ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : stable avec une tendance à l'accrétion depuis 2000 ○ HDP : stable avec une tendance à l'augmentation depuis 2001 	
SW86	0,55	-0,03	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : accrétion moyenne ○ HDP : abaissement de 3 cm/an ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : accrétion jusqu'en 1997 puis stable ○ HDP : alternance perte/gain , fort abaissement en 2019 	
SW87		0,08	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : pas d'évolution car fixé ○ HDP : augmentation de 8 cm/an ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : pas d'évolution car fixé ○ HDP : alternance perte/gain, tendance à l'augmentation (données manquantes sur 2008) 	
SW88	0,19	0,00	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : faible accrétion ○ HDP : stable ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : stable ○ HDP : alternance perte/gain stable 	
SW89		0,00	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comparaison situation 1992 / 2021 : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : pas d'évolution car fixé ○ HDP : stable ■ Evolutions générales : <ul style="list-style-type: none"> ○ TDC : pas d'évolution car fixé ○ HDP : alternance perte/gain stable 	

3.3.2. Données altimétriques

3.3.2.1. Description des données disponibles

La comparaison de proche en proche de jeux de données altimétriques permet de connaître les évolutions des stocks sédimentaires sur la zone d'étude.

Sur le secteur d'étude, deux levés altimétriques hautes résolutions sont disponibles et recouvrent l'ensemble de la zone, à savoir :

- RGEalti® (IGN) dont le levé date de 2011,
- Litto3D® (SHOM/ROLNP) dont les levés datent de 2016 et 2020.

Dans le cadre du projet « Notre Littoral pour Demain », ANTEA a procédé au différentiel altimétrique par superposition des MNT entre les données de 2011 et 2016. CASAGEC, dans le cadre de la présente étude, a actualisé ce travail et a produit des cartes de différentiel altimétrique entre les levés 2016-2020. Le périmètre du projet s'est arrêté au Sud de Granville. Les cartes de différentiel sont reprises au travers de la Figure 22 et la Figure 23.

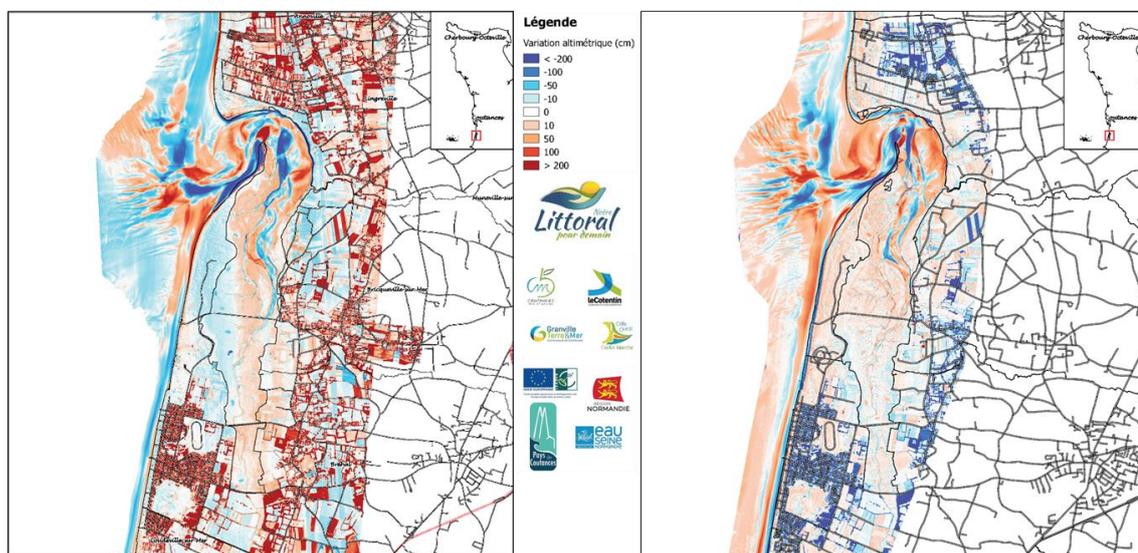


Figure 22. Carte de différentiel altimétrique 2016-2011 (à gauche) et 2020-2016 sur le secteur de Bricqueville-sur-Mer et Saint-Martin-de-Bréhal.

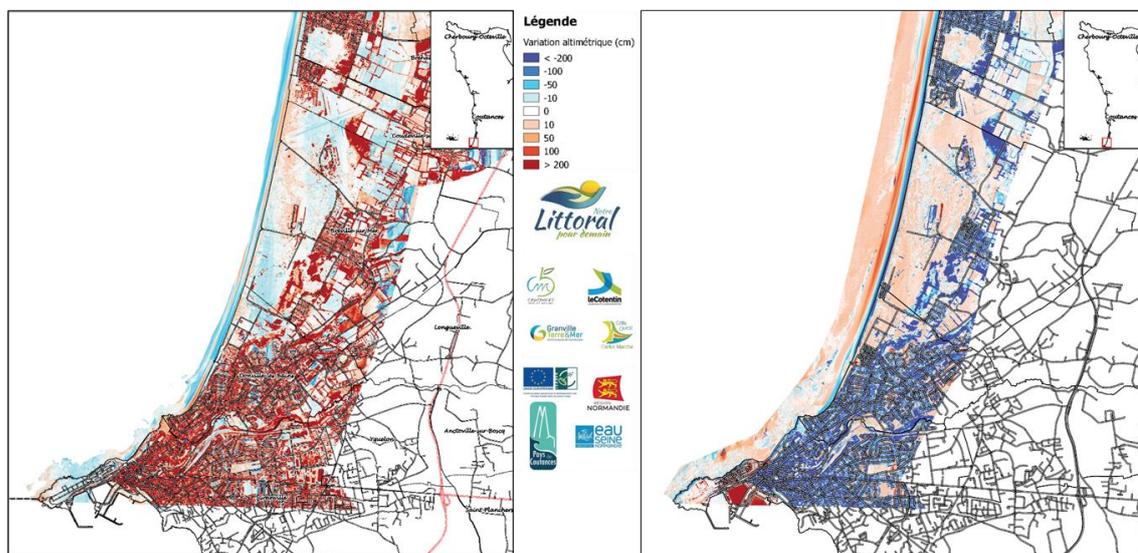


Figure 23. Carte de différentiel altimétrique 2016-2011 (à gauche) et 2020-2016 sur le secteur de Coudeville-sur-Mer, Bréville-sur-Mer et Donville-les-Bains.

La comparaison du Litto3D® 2016 / RGEalti® 2011 fait notamment ressortir, à l'intérieur des terres, plusieurs parcelles, quelques bâtis et différents aménagements comme étant en accrétion. Il s'agit d'un artefact lié à la différence de traitement des deux types de données : sur le RGEalti®, la donnée a fait l'objet d'un filtrage plus poussé de la part de l'IGN avec suppression à grande échelle de la végétation, du bâti, de certaines digues littorales, etc. Sur la donnée Litto3D® 2016 du ROL, seuls les bâtis les plus proches du littoral ont été filtrés (d'après une communication de la DDTM50).

Sur la base de ces données, CASAGEC INGENIERIE a ensuite pu réaliser différents bilans volumétriques pour les deux périodes disponibles (2016-2011 et 2020-2016), pour le littoral de Bricqueville-sur-Mer jusqu'à Donville-les-Bains.

Ces bilans sont présentés au travers des sections suivantes.

3.3.2.2. *Bilan volumétrique des plages de Bricqueville-sur-Mer, Saint-Martin-de-Bréhal et Coudeville-sur-Mer*

Afin d'identifier les évolutions volumétriques des plages du secteur Bricqueville-sur-Mer, Saint-Martin-de-Bréhal et Coudeville-sur-Mer, des box d'environ 20 000 m² (100 m x 200 m) ont préalablement été définies sur l'ensemble du littoral. Les limites de ces box ont été définies sur la base des transects précédemment utilisés pour déterminer les évolutions diachroniques du trait de côte (cf. section 3.1).

In fine, ce travail a permis la réalisation des graphiques d'évolution des bilans volumétriques en sables en m³ du littoral de Bricqueville-sur-Mer, Saint-Martin-de-Bréhal et de Coudeville-sur-Mer, illustrés en Figure 24 pour les périodes 2011-2016 et 2016-2020.

De manière générale, les évolutions volumétriques sont similaires sur les deux périodes :

- La pointe de sable au Sud du havre de la Vanlée est en déficit sédimentaire entre 2011 et 2020, avec un total d'environ -410 000 m³ sur l'ensemble de la zone. En parallèle, et au même titre que l'analyse diachronique (section 3.1.1), l'enracinement de la flèche sableuse s'engraisse à raison d'un gain de 180 000 m³ sur l'ensemble de la période,
- Au Nord de la commune de Bréhal le littoral non protégé est globalement en déficit sédimentaire. A noter des valeurs plus importantes au Nord de l'épi, avec une perte totale de l'ordre de -72 000 m³ entre 2011 et 2020, correspondant à la formation d'une encoche d'érosion,
- Le reste du littoral, protégé par un ouvrage en enrochements, est quant à lui en faible déficit avec une perte totale de -92 000 m³ sur l'ensemble de la zone.

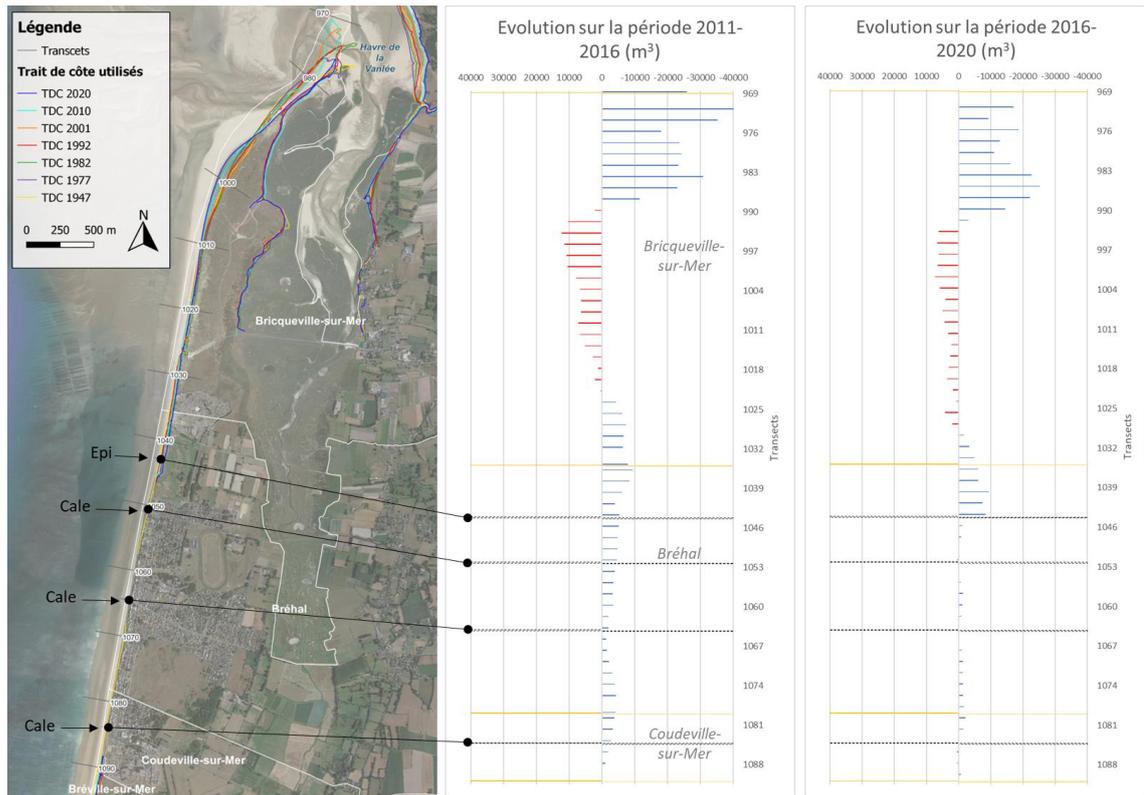


Figure 24. Variation des volumes de sable sur les périodes 2011-2016 et 2016-2020 pour la sous-cellule de Bricqueville – Bréhal (gain en rouge / perte en bleu). Les traits jaunes schématisent les limites communales et les traits noirs, les ouvrages transversaux au trait de côte.

4. FORÇAGES OCEANIQUES ET METEO-MARIN

4.1. VENTS

Les vents au large de la zone d'étude ont été extraits de la base de données associée au modèle COPERNICUS MERCATOR et couvrent la période 1992 – 2018 (26 années). La rose des vents obtenue pour un point W situé à 53 MN à l'Ouest de Pirou et 17 MN au Nord de Bréhat est présentée par la Figure 25.

Elle fait ressortir les deux directions de provenance des vents prédominants en fréquence : secteur Ouest-Sud-Ouest d'une part (principalement) et Est-Nord-Est d'autre part.

Les vents les plus puissants proviennent du quadrant Ouest, principalement du secteur Sud-Ouest à Ouest, accessoirement de l'Ouest-Nord-Ouest.

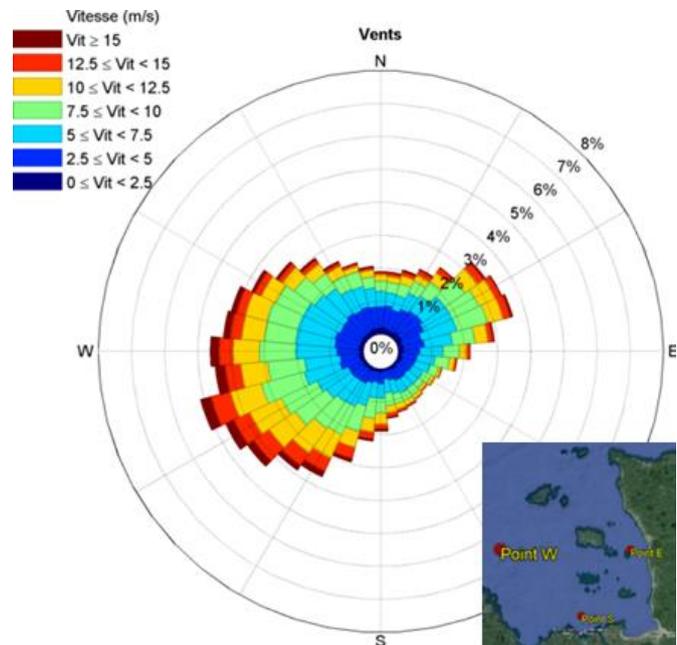


Figure 25. Rose des vents au point W de coordonnées WGS 84 Latitude : 49,14°N et longitude : 1,77°W (en degrés décimaux).

Les vents extrêmes de ce secteur peuvent excéder les 20 m/s. Les vents de secteur Nord-Est dépassent en revanche rarement les 15 m/s.

La Figure 26 illustre la fréquence de dépassement des vitesses de provenance des vents tous secteurs confondus. Il ressort que la moitié des vents ont une vitesse inférieure à 7 m/s, à peine plus de 15 % des vents ont une vitesse supérieure à 15 m/s et seulement 0,3 % ont une vitesse supérieure à 20 m/s. En complément, des éléments statistiques et extrêmes sont disponibles en proche côtier au niveau de Gouville-sur-Mer.

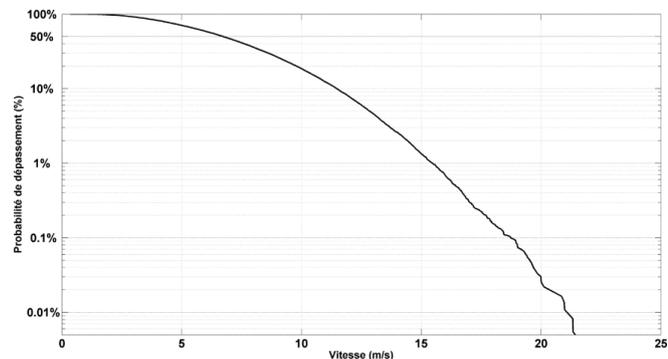


Figure 26. Fréquence de dépassement des vitesses, toutes provenances confondues.

Les statistiques de vent présentées à la Figure 27 sont extraites de la base de données ECMWF-ERASLand sur la période 1981-2020 (ACRI-IN / Antea, janvier 2022).

Cette figure montre une cohérence vis-à-vis des données disponibles au large en faisant là aussi ressortir les deux directions de provenance des vents prédominants en fréquence : secteur Ouest à Ouest-Sud-Ouest d'une part (principalement) et Est-Nord-Est d'autre part. Les vents les plus puissants proviennent majoritairement des secteurs Ouest à Sud-Ouest.

Les vents les plus puissants proviennent du quadrant Ouest, principalement du secteur Sud-Ouest à Ouest, et les valeurs sont légèrement plus faibles qu'au large.

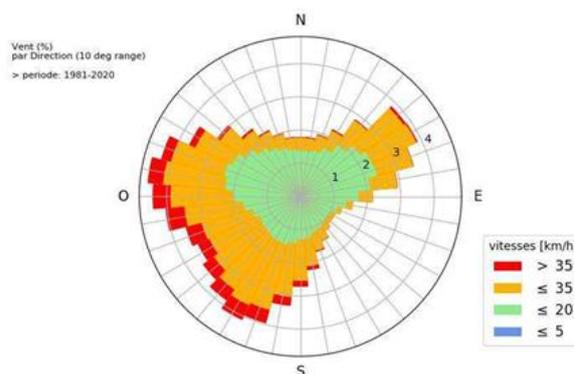


Figure 27. Rose des vents au large de Gouville, données ECMWF-ERASLand sur la période 1981-2020 (ACRI-IN / Antea, janvier 2022).

Cette même étude détaille également les valeurs extrêmes de vent. Celles-ci ont été définies en réalisant une extrapolation qui s'appuie sur une distribution GEV à l'aide d'une méthode de maximum de vraisemblance. Le Tableau 4 présente les valeurs de vitesse de vent associées à différentes périodes de retour au niveau de Gouville.

Tableau 4. Vitesse des vents moyens extrêmes au large de Gouville (ANTEA GROUP / ACRI-IN, 2022).

Période de retour (ans)	1	2	5	10	20	50	100
Vitesse des vents moyens en m/s	16,5	17,3	18,2	18,8	19,4	20,1	20,5

4.2. NIVEAU D'EAU

4.2.1. Marée astronomique

Les niveaux de la marée astronomique au niveau de la Côte Ouest du Cotentin présentent de fortes différences entre le sud et le Nord. Le Tableau 5 reporte ces niveaux pour 4 observatoires secondaires à proximité de la zone d'étude, Saint-Germain-sur-Ay et Le Sénéquet au Nord, Granville au centre et Saint-Malo au Sud. Les données sont extraites de l'édition 2022 des références altimétriques maritimes du SHOM (SHOM-RAM, 2022). Ces niveaux sont exprimés en mètre cotes marines. Une différence de marnage de plus de 1.1 m est observée entre Saint-Germain-sur-Ay et Granville pour le niveau PHMA.

Tableau 5. Niveaux marins caractéristiques à proximité de la zone d'étude (SHOM-RAM 2022).

		PHMA	PMVE	PMME	NM	BMME	BMVE	PBMA	ZH/Ref
St-Germain	m CM	13.09	11.7	8.9	6.42	4	1.35	0	-5.89
Le Sénéquet	m CM	13.39	12	9.15	6.65	4.25	1.45	0.07	-6.04
Granville	m CM	14.26	12.85	9.8	7.1	4.55	1.5	-0.13	-6.62
Saint-Malo	m CM	13.59	12.2	9.3	6.78	4.3	1.5	0.01	-6.289

NGF : nivellement général de la France. Le zéro NGF (ou IGN69) se situe 5,739 mètres au-dessus du zéro des cartes marines (zéro CM) / PHMA = Plus haute mer astronomique / PMVE = Pleine mer moyenne de vive-eau / PMME = Pleine mer moyenne de morte-eau / NM = Niveau moyen / BMME = Basse mer moyenne de morte-eau / BMVE = Basse mer moyenne de vive-eau / PBMA = plus basse mer astronomique

4.2.2. Surcote

Le niveau d'eau lié à la marée peut être également augmenté par une surcote de tempête. En effet, les dépressions atmosphériques et le vent peuvent localement générer une augmentation (ou une diminution) du niveau d'eau. Les surcotes de tempêtes de périodes de retour quinquennales à centennales à Saint-Malo, issues des travaux du CEREMA (2018), sont données au Tableau 6.

Tableau 6. Surcote de tempêtes estimées à Saint-Malo par la loi exponentielle (CEREMA, 2018).

Période de retour (ans)	5	10	20	50	100
Surcote de Pleine mer (cm)	77	85	92	105	113
Intervalle de confiance à 70% (cm)	70 - 84	77 - 93	84 - 103	93 - 116	100 - 126

Ainsi, la surcote décennale à Saint-Malo atteint 0.85 m, et la surcote centennale 1.13 m.

4.2.3. Surcote liée à l'action des vagues (wave setup)

En proche côtier, le déferlement des vagues engendre une surélévation du niveau d'eau moyen (wave setup). Cette composante locale du niveau d'eau peut-être à prendre en considération vis-à-vis du dimensionnement des ouvrages ou des problématiques de submersion et érosion. La définition de cette élévation est directement liée à l'action des vagues, elle est donc estimée par la modélisation de la propagation des vagues et sera abordée dans la section 5.2.2.

4.2.4. Niveaux extrêmes

Les niveaux extrêmes de pleine mer ont été estimés par le CETMEF et le SHOM en 2008 et 2012. Ces niveaux combinent le niveau associé à la marée ainsi que les surcotes météorologiques. Au niveau du secteur d'étude, il ressort que les valeurs de 2008 sont plus défavorables que celles de 2012 (Figure 28) et sont plus cohérentes avec les valeurs obtenues dans le cadre du travail réalisé en 2018 par le CEREMA au niveau des Ports de référence métropolitains.

Concernant la zone d'étude, le niveau marin extrême de période de retour 100 ans est estimé à 8.10 m NGF soit 14.7 m CM.

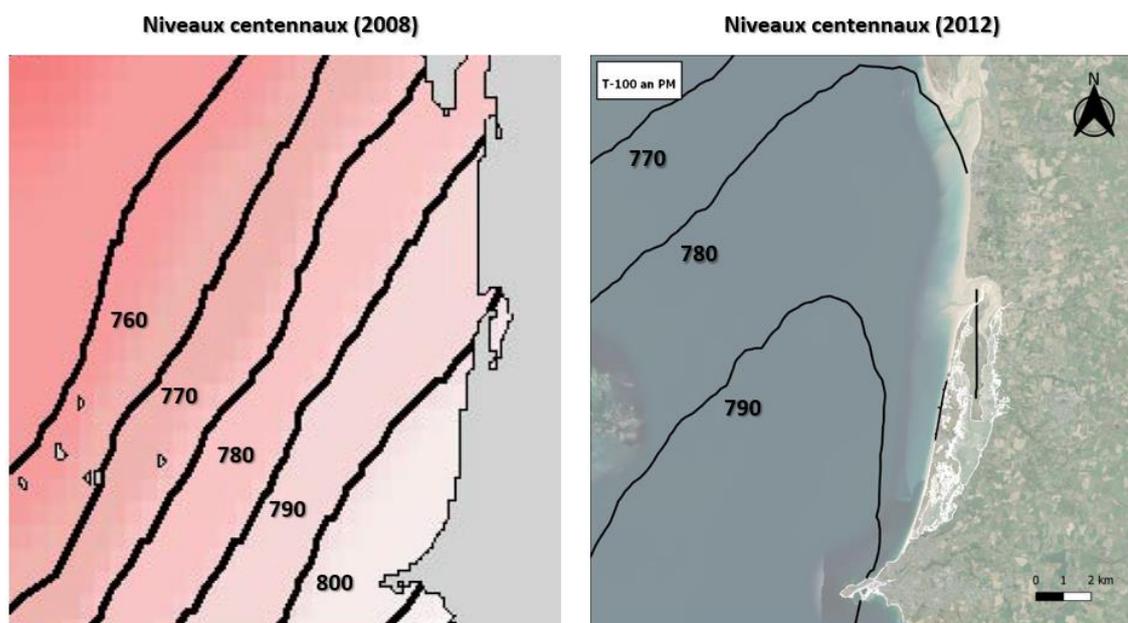


Figure 28. Cartes de niveaux d'eau extrêmes centennaux en m NGF (marée + surcotes) – Estimation faite en 2008 à gauche, et en 2012 à droite.

4.2.5. Changement climatique

4.2.5.1. Évolution historique du niveau marin

Dans un contexte de réchauffement climatique aujourd’hui avéré, l’élévation du niveau marin doit être prise en compte dans l’évaluation des niveaux marins extrêmes pour des échéances plus ou moins proches, conformément au guide d’élaboration des plans de prévention des risques littoraux (MEDDE/DGPR, 2014).

Selon les dernières données du GIEC (Groupe d’experts inter-gouvernemental sur l’évolution du climat) diffusées par l’ONERC (Observatoire national sur les effets du réchauffement), le niveau moyen des mers a augmenté sur le plan mondial de 19 cm (Figure 29) au cours de la seule période du 20^{ème} siècle (entre 1901 et 2010, taux moyen de 1.7 mm/an). Ce taux se rapproche de celui calculé pour le site de Brest sur la période 1960-2013 (1.63 mm/an, F. LEVOY, 2018, d’après les données SONEL).

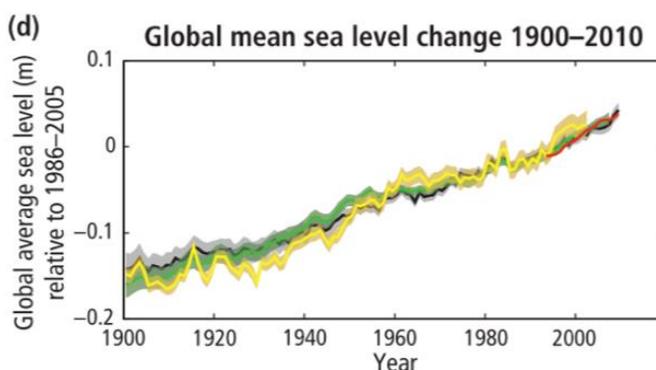


Figure 29. Evolution globale du niveau moyen des mers entre 1900 et 2010 (IPCC, 2015).

Pour la période la plus récente, le niveau moyen des mers est suivi régulièrement par satellite depuis 1992 (satellite Topex/Poséidon). Les résultats de cette altimétrie par satellite (Figure 30) tendent à confirmer cette accélération de la remontée, avec un taux moyen évalué à 3.7 mm/an entre 1993 et 2019 (contre 3.2 mm/an pour la période 1993-2010).



Figure 30. Evolution récente du niveau moyen des mers mesurée par altimétrie satellitale (<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/>, sources CNES/LEGOS/CLS).

Pour ce qui concerne plus spécifiquement la côte Ouest du Cotentin, la tendance récente (de 1975 ou 1995 à 2017) a été étudiée par Franck LEVOY (2018) sur la base des données SONEL.

Avec une élévation relative de 1.3 mm/an à Cherbourg et de 1.72 mm/an à Saint-Malo (Figure 31), mais des affaissements du sol évalués respectivement à 0.2 mm/an et 0.63 mm/an, l’élévation absolue de la mer applicable à la côte Ouest du Cotentin serait actuellement de +1.1 mm/an, valeur qui s’avère inférieure au taux mondial récent mentionné ci-dessus.

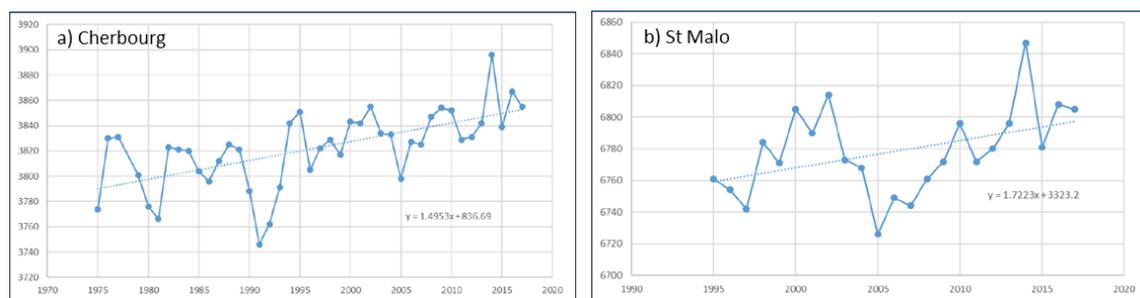


Figure 31. Élévation relative du niveau moyen de la mer à Cherbourg (période 1975-2017) et à Saint-Malo (période 1995-2017) – Franck LEVOY, 2018, données SONEL.

4.2.5.2. Prédiction de l'élévation du niveau marin

L'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) a publié en février 2010 des recommandations pour la prise en compte du changement climatique pour les projets de France métropolitaine. Elles sont reprises dans la circulaire du 27 juillet 2011 du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux et dans le guide méthodologique pour les plans de prévention des risques littoraux établi par le MEDDE en mai 2014.

Ces recommandations sont basées sur les travaux du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) et peuvent être actualisées au regard des nouvelles tendances données par le sixième rapport d'évaluation du GIEC en 2021-2022. Dans ce nouveau rapport, les tendances à venir sont estimées sur la base de plusieurs scénarios SSP (Shared Socioeconomic Pathway) qui décrivent des évolutions possibles des émissions et concentrations des gaz à effets de serre, des émissions de polluants et d'usages des terres au cours du 21^{ème} siècle. Les cinq scénarios sont décrits en suivant :

- **SSP1-1.9 : Scénario très ambitieux pour se conforter aux objectifs de l'Accord de Paris.** Il s'agit du scénario le plus optimiste pour lequel les émissions mondiales de CO₂ tombent à zéro à horizon 2050. L'objectif étant de contenir le réchauffement climatique à + 1.5°C d'ici à 2100 par rapport aux températures de l'ère préindustrielle (1850-1900),
- **SSP1-2.6 : Scénario de développement durable.** Les émissions mondiales de CO₂ sont fortement réduites mais moins rapidement et l'objectif de zéro émission est atteint après 2050. Dans ce scénario le réchauffement se limite à + 2.0°C d'ici 2100 par rapport à 1850-1900,
- **SSP2-4.5 : Scénario intermédiaire.** Les émissions de CO₂ sont dans la continuité des niveaux actuels avant de commencer à diminuer au milieu du siècle. Dans ce scénario, les températures augmentent de + 2.7°C d'ici la fin du siècle,
- **SSP3-7.0 : Scénario de rivalité régionale.** Les pays sont guidés par des préoccupations en matière de sécurité et de compétitivité. Ils se concentrent sur les problèmes nationaux (voire régionaux) et sur les enjeux de sécurité alimentaire et énergétique. Les émissions de gaz à effet de serre et les températures augmentent donc régulièrement et les températures moyennes augmentent de + 3.6°C d'ici 2100,
- **SSP5-8.5 : Développement basé sur les énergies fossiles.** Il s'agit d'un scénario à très forte augmentation des émissions de gaz à effet de serre (émissions de CO₂ quasiment doublées d'ici à 2050). L'économie mondiale croît rapidement mais cette croissance est alimentée par l'exploitation des combustibles fossiles et des modes de vie très gourmands en énergie. En 2100, la température moyenne de la planète aura augmenté de + 4.4°C.

Sur la base de ces scénarios, les dernières estimations d'élévation du niveau de la mer, jusqu'à horizon 2150, comparées à la période de 1995-2014, sont présentées dans le Tableau 7 et la Figure 32 pour trois scénarios caractéristiques (SSP1-2.6, SSP2-4.5 et SSP5-8.5).

Tableau 7. Élévation du niveau moyen de la mer comparé à la période 1995-2014 pour le port de Saint-Malo (<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>).

Date	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
2070	+ 0.29 m [+ 0.18 ; + 0.43]	+ 0.33 m [+ 0.21 ; + 0.48]	+ 0.39 m [+ 0.26 ; + 0.55]
2100	+ 0.41 m [+ 0.24 ; + 0.63]	+ 0.53 m [+ 0.36 ; + 0.77]	+ 0.73 m [+ 0.51 ; + 1.03]
2120	+ 0.48 m [+ 0.25 ; + 0.77]	+ 0.65 m [+ 0.39 ; + 0.98]	+ 0.90 m [+ 0.57 ; + 1.34]

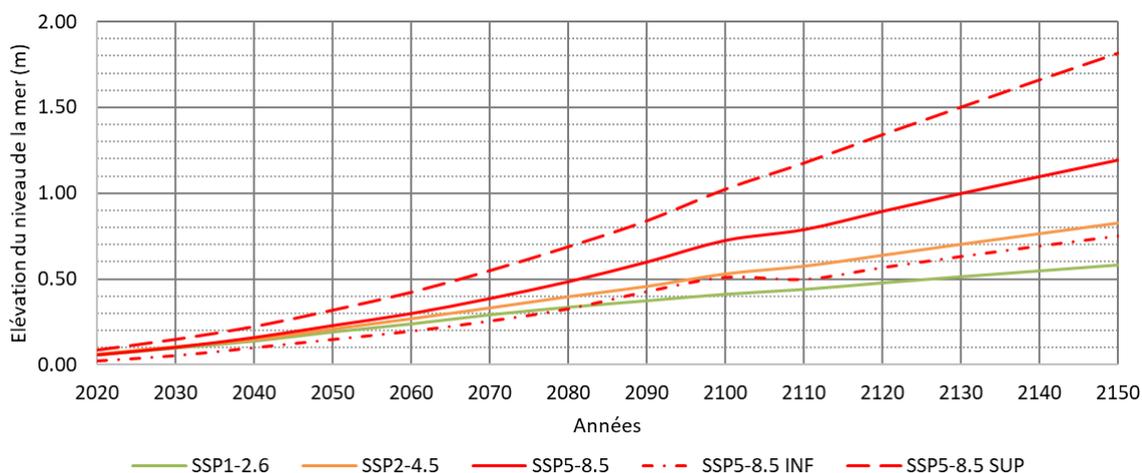


Figure 32. Élévation du niveau moyen de la mer selon différents scénarios (<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>).

Sur la base des estimations les plus pessimistes, une élévation du niveau moyen des océans de + 0,50 m à horizon 2070 et de + 1,00 m à horizon 2100 seront considérées dans la suite de l'étude.

Dans les PPRL (Plan de Prévention des Risques Littoraux), la prise en considération d'une élévation de 1.0 m du niveau de la mer en lien avec le changement climatique à horizon 2100 est de plus en plus répandue et fait globalement consensus au niveau de la zone d'étude. Cette valeur est souvent associée à la valeur jusqu'alors appliquée à savoir 0.6 m.

Le Tableau 8 reprend les valeurs d'élévation du niveau de la mer retenues dans le cadre de cette étude.

Tableau 8. Élévation du niveau de la mer actuel et prédiction à +100 (PPRL) et élévation maximum à+100 (GIEC) de l'élévation.

	Actuel	100 ans (PPRL)	100 ans max (GIEC)
Élévation du niveau de la mer (en m)	+0.2m	+0,6m	+1,0m

4.3. ÉTAT DE MER

Afin de définir les extrêmes, au droit de la zone d'étude, l'approche qui a été mise en œuvre a consisté à propager les houles depuis le large jusqu'à la côte en y associant l'effet du vent permettant ainsi de disposer des composantes houles et mer de vent.

4.3.1. Généralité sur les houles océaniques

Les conditions extrêmes de houle considérées comme données d'entrée proviennent d'une extrapolation réalisée par SOGREAH dans le cadre d'une étude de 2009 au niveau du point ANEMOC COAST_1046 (Figure 33). Les résultats de cette étude ont été présentés dans le cadre d'une étude d'impact d'INVIVO de 2019.

Les vents de même période de retour ont été associés sur la base des valeurs apparaissant dans la Section 4.1 provenant de la base de données ECMWF-ERASLand sur la période 1981-2020 (ACRI-IN / Antea, janvier 2022.)

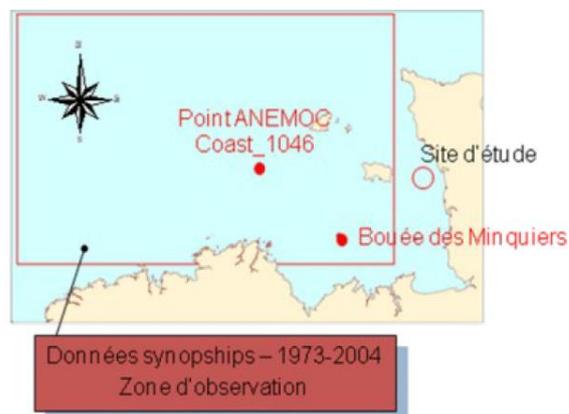


Figure 33. Localisation du point ANEMOC coast 1046.

Les valeurs retenues pour le forçage du modèle de propagation sont répertoriées dans le Tableau 9.

Tableau 9. Houle extrême (SOGREAH 2009 / INVIVO, 2019).

Période de retour (ans)	1	5	10	20	50	100
Hauteur significative Hs (m)	8,9	11,0	11,9	12,8	13,9	14,7
Vitesse de vents moyens (m/s)	16,5	18,2	18,8	19,4	20,1	20,5

4.3.2. Analyses statistiques de états de mer

L'analyse statistique de la houle au droit du site d'étude est réalisée à partir de la base de données HOMERE, mise en œuvre par l'IFREMER à l'aide d'une configuration haute résolution du modèle de vagues WAVEWATCH III, sur une grille déstructurée couvrant la zone Manche - Golfe de Gascogne. Les données utilisées couvrent la période 2008-2018 (10 ans).

Trois points d'extraction ont été définis (Figure 34) pour la construction des roses de houle, le long d'une ligne s'étendant du Nord du Havre de la Vanlée au Sud de la commune de Bréville-sur-Mer. Le point le plus au Sud est localisé à l'arrière des Iles Chausey.

Les roses des houles ont été établie pour les trois points (Figure 35). La rose des houles du point sud confirme l'abri que constitue les Ile Chausey pour la partie Sud de littoral, au niveau de la commune de Donville et de Granville.

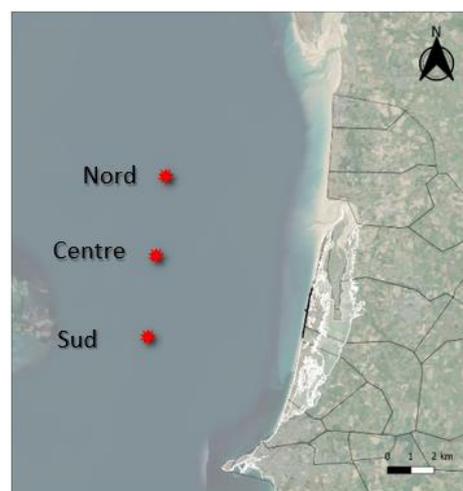


Figure 34. Localisation des points d'extraction.

L’agitation en ce point présente un taux d’amortissement significatif par rapport aux deux points extrêmes. Le point Nord et Centre subissent l’influence d’une agitation de secteur Ouest-Nord-Ouest.

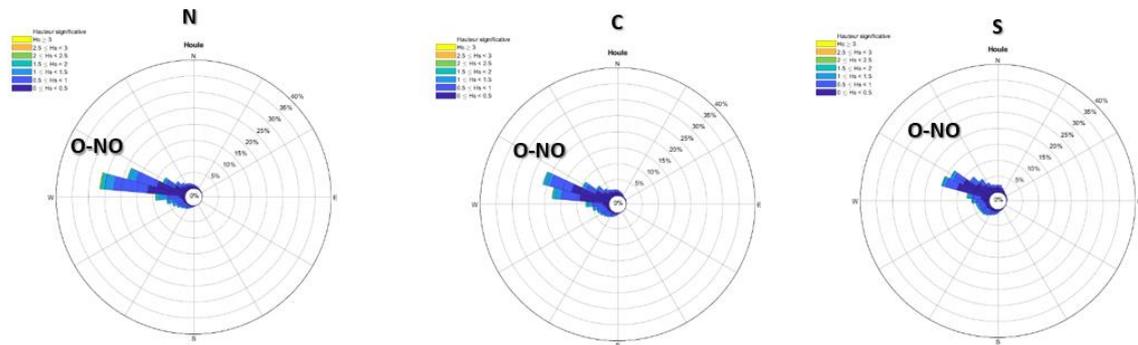


Figure 35. Roses des houles aux trois points d'extraction définis a) Point HOMERE 69116, b) Point 2 HOMERE 68713, c) Point 3 HOMERE 69116.

Au niveau du point Nord, l’analyse du corrélogramme (Figure 36) montre que les périodes de pic des vagues au droit du site présentent un fort étalement. Deux intervalles de temps ressortent plus particulièrement :

- 27% des vagues ont une période comprise entre 3 et 5 s,
- 51% ont une période comprise entre 9 et 14 s.

L’étalement de la période de pic est lié à la présence de deux types d’agitation :

- Des mers de vent de période de pic T_p comprise entre 4 et 6 secondes ;
- Des houles de période de pic comprise entre 10 et 14 secondes

De manière générale, les vagues ont une hauteur comprise entre 0 et 1m (82%). Cependant, elles peuvent présenter une hauteur significative H_s atteignant plus de 3 mètres (0,23%).

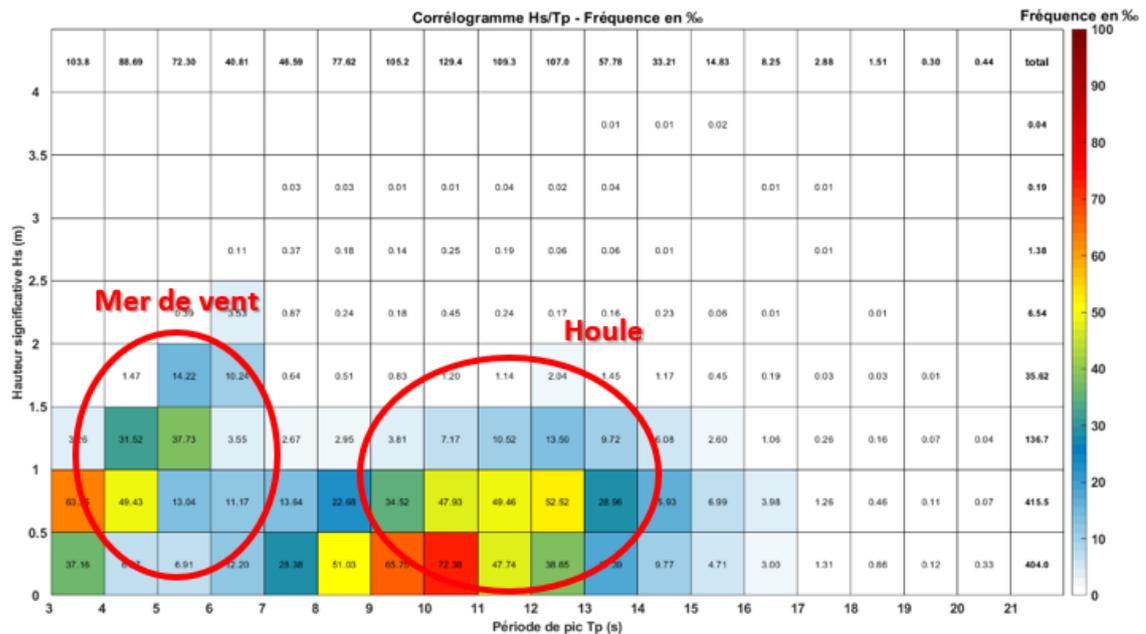


Figure 36. Corrélogramme hauteur de houle H_s (m) en fonction de la période de pic T_p (s) au point Nord.

4.3.3. Propagation à la côte

La propagation des houles incluant l'effet du vent est réalisée en utilisant le modèle SWAN (Simulating WAVes Nearshore). SWAN est un modèle de houle spectrale de 3^{ème} génération basé sur la conservation de la densité de l'action d'onde, développé par la Delft University of Technology (Pays Bas). Il simule la propagation des états de mer (mers de vent et houles océaniques) dans le domaine côtier.

Le modèle prend en compte les effets de réfraction et de shoaling liés aux variations de bathymétrie, la diffraction par les obstacles, la génération de la houle par action du vent, la dissipation de la houle par moutonnement, le déferlement bathymétrique ainsi que par frottement sur le fond. Il modélise également la surcote produite par la dissipation des vagues.

L'emprise du modèle a été définie suffisamment large (Figure 37) de sorte à prendre en compte les îles anglo-normandes, notamment celles de Jersey et de Guernesey, ainsi que les hauts-fonds rocheux et bancs sableux qui parsèment les fonds du secteur (Dirouilles, Ecrehou, Bancs Félés au Nord, Arconie, Chaussée des Bœufs, plateau des Minquiers au Sud, Iles Chausey).

Le modèle est constitué de trois grilles emboîtées afin de raffiner progressivement les résultats à l'approche du littoral du site d'étude (Figure 37). Pour la modélisation, le niveau d'eau a été considéré comme étant constant et fixé au niveau des plus hautes mers astronomiques (PMHA, soit 14.26 m CM).

En première approche, le plan d'eau est considéré comme exempt de houle incidente. Il est en revanche balayé par un fort vent de vitesse fixée à 20 m/s (force 8 B). La modélisation a été réalisée pour quatre secteurs de provenances de vent répartis entre l'azimut N210° (Sud-Ouest) et l'azimut N270° (Ouest). Les mers de vent générées par ces scénarios atteignent sur le littoral de Bréhal une hauteur significative H_s croissante au fur et à mesure que le vent vire du Sud-Ouest à l'Ouest, de 2.1 à 2.8 m.

La Figure 38 présente les résultats de la modélisation en fonction de la provenance du vent ainsi que la hauteur de vague en résultant.

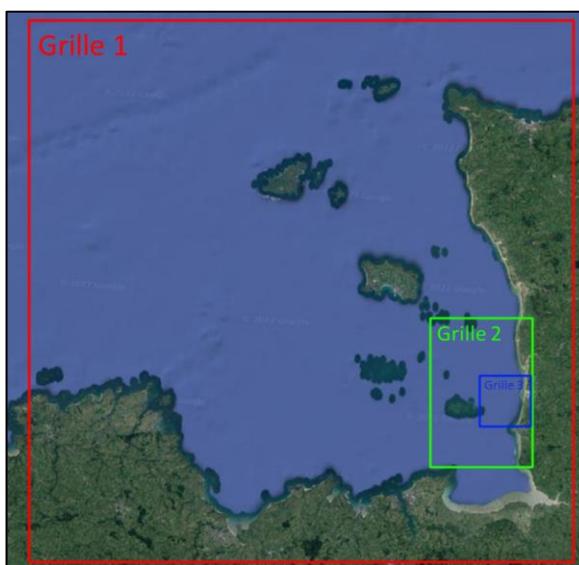


Figure 37. Emprise du modèle et des trois grilles emboîtées.

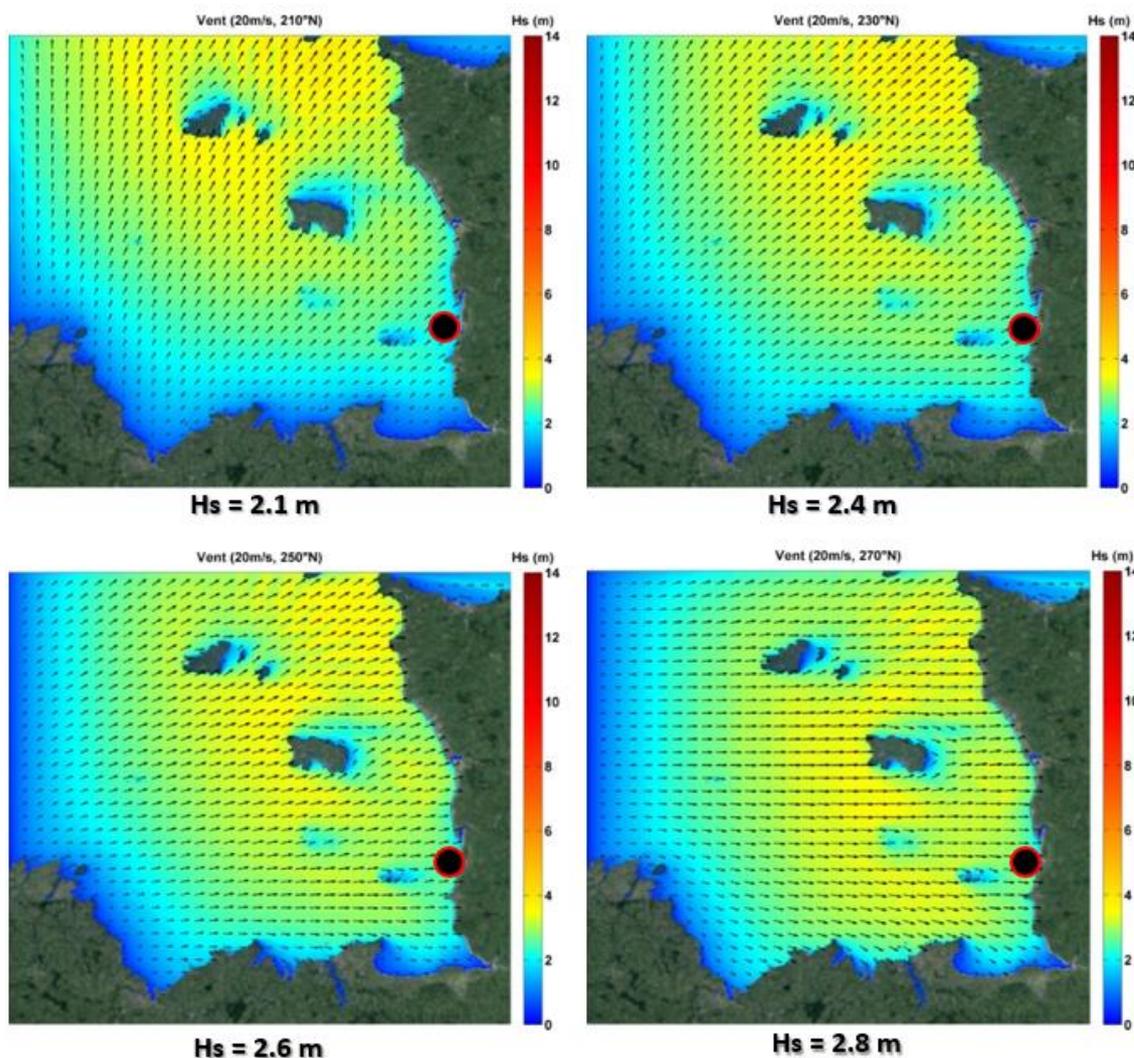


Figure 38. Résultats de la modélisation des mers de vent générées par un vent de 20m/s. De gauche à droite et de haut en bas : vent de secteur 210°N, 230°N, 250°N, 270°N.

En l'absence de vent local susceptible de lever une mer de vent, la modélisation, par le modèle Swan de la propagation d'une houle extrême centennale, intègre les caractéristiques suivantes :

- Hauteur significative H_s : 14 m ;
- Période de pic T_p : 18 s ;
- Direction : 270°N.

Le résultat présenté Figure 39 met en exergue les processus de diffraction autour des îles et de réfraction sur les hauts fonds qui se traduisent, au passage de chaque archipel, par une rotation des orthogonales de houle d'un azimut Est à un azimut Est-Sud-Est.

Le résultat confirme le rôle d'abri joué par les Iles Chausey, sur le littoral du Cotentin entre Donville et Saint-Pair-sur-Mer.

D'après le modèle SWAN et en l'absence de vent local, une houle d'Ouest présentant ces caractéristiques au large atteindra le littoral de Bréhal avec une hauteur significative H_s de 1.8 mètres.

Le modèle SWAN a également été utilisé pour modéliser l'action d'une houle extrême de caractéristiques identiques à la précédente (H_s : 14 m ; T_p : 18 s ; direction de provenance : 270°N), le scénario étant cette fois combiné à l'action d'un vent fort de secteur Ouest (270°N) et de vitesse 20 m/s (force 8 B).

Les mêmes tendances, que celles évoquées précédemment, se retrouvent sur le résultat de la modélisation présenté Figure 40, à la différence notable que l'agitation atteindra cette fois le littoral situé au Sud du havre de Portbail (et surtout du havre de Surville) avec une composante Ouest significativement plus marquée et avec une énergie accentuée.

D'après le modèle SWAN, une houle d'Ouest centennale arrivant du large, combinée à un fort vent de secteur Ouest de force 8 Beaufort (20 m/s), atteindra le littoral de Bréhal avec une hauteur significative H_s de l'ordre de 3.0 mètres, augmentée donc d'1,2 mètre par rapport au scénario précédent sans vent local.

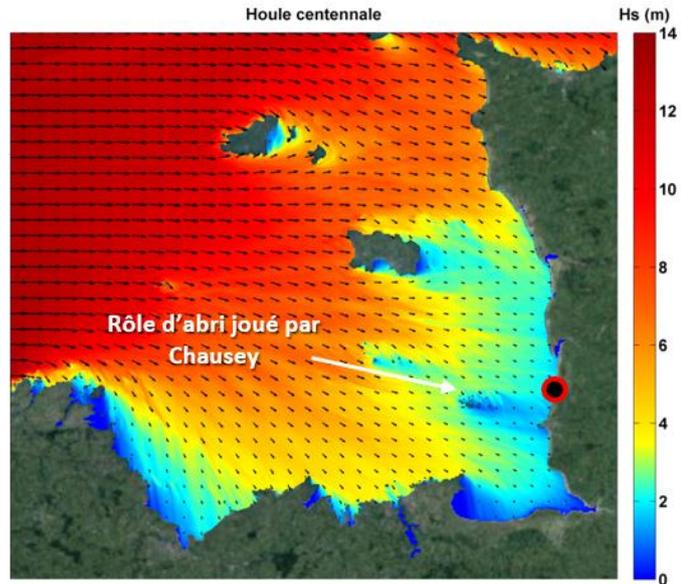


Figure 39. Résultat de la modélisation de la propagation d'une houle extrême centennale par le modèle Swan (vent du secteur 270°N, 20m/s ; H_s = 14 m ; T_p = 18 s).

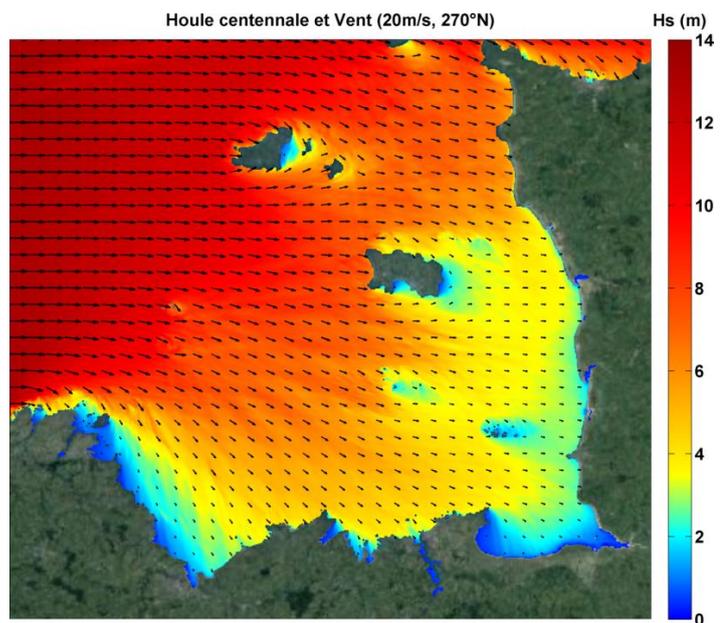


Figure 40. Résultat de la modélisation de la propagation d'une houle extrême centennale par le modèle Swan (vent de secteur 270°N 20 m/s ; H_s = 14 m ; T_p = 18 s) combiné à l'action d'un vent fort de secteur 270°N et de vitesse 20m/s.

4.4. PROBABILITE CONJOINTE DES EVENEMENTS EXTREMES D'ETATS DE MER ET DE NIVEAU MARIN

Le DEFRA (Department for Environment Food and Rural Affairs) a développé une méthode permettant de caractériser la probabilité conjointe d'un événement incluant deux variables statistiques connaissant les périodes de retours de chaque variable ainsi que leur dépendance.

Le CETMEF a calculé les coefficients de corrélation entre les hauteurs de vagues et les niveaux d'eau pour le littoral de la Mer du Nord, la Manche et l'Atlantique. Au niveau de Saint-Malo (port de référence le plus proche du site d'étude), la dépendance est considérée comme faible pour le couple hauteur significative / niveau d'eau.

La Figure 41 présente les différents couples hauteur de vagues / niveau d'eau pour différentes périodes de retour. Les hauteurs de vagues correspondent aux hauteurs de vagues au niveau du point ANEMOC 1046 et les niveaux d'eau sont ceux estimés au niveau du point secondaire de Granville.

Une même période de retour peut correspondre à un niveau marin élevé associé à une faible houle ou à une forte houle associée à un niveau marin faible.

La tempête Eleanor (mars 2018) a été représentée sur le graphique. Elle correspond à un événement de type vicennal.

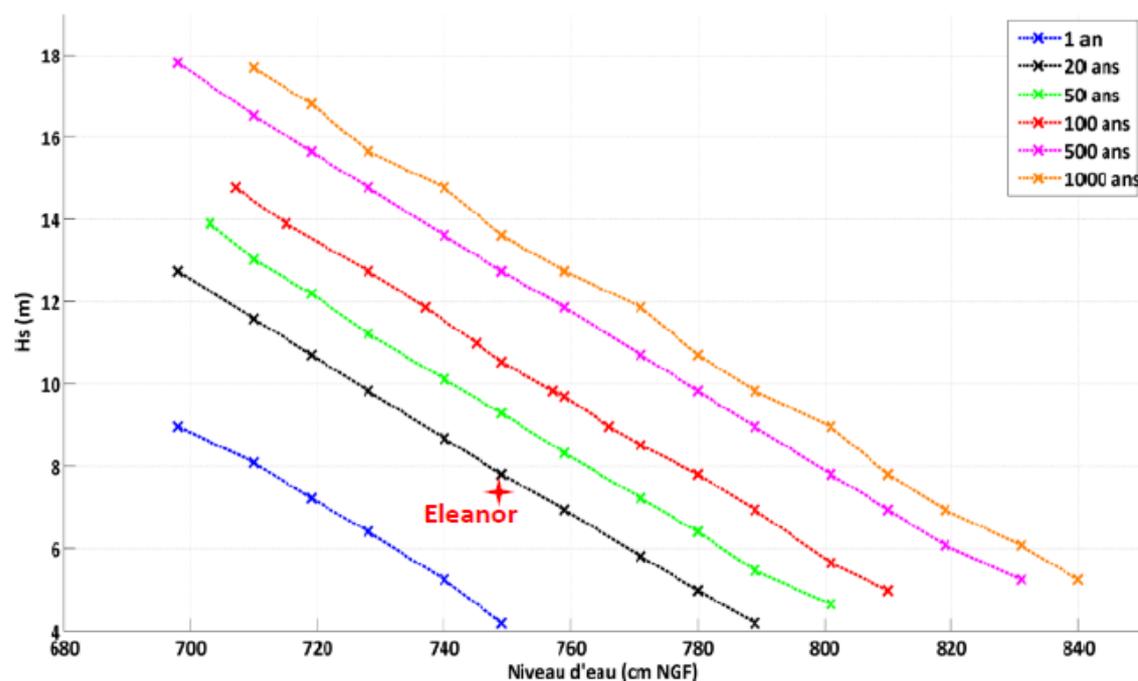


Figure 41. Probabilité conjointe des événements extrêmes d'états de mer et de niveaux marins au niveau de Granville.

5. HYPOTHESES DE TRAVAIL

5.1. DEFINITION DES OBJECTIFS DE PROJET

Les objectifs principaux de cette étude sont : (i) d'apporter une aide à la décision dans la poursuite de définition de systèmes d'endiguement sur le territoire et (ii) de préconiser des solutions techniques destinées à limiter les franchissements par paquets de mer sur les secteurs sensibles.

Pour les mener à bien, une chaîne de modélisation est mise en place afin d'analyser les impacts potentiels d'évènements marins extrêmes sur la submersion à Saint-Martin-de-Bréhal. Ces modélisations, qui permettent notamment de se projeter à plus long terme, serviront de base pour la définition de solutions d'aménagements les plus pertinentes possibles.

Deux approches de calcul sont modélisées :

- Approche Projet :
 - Cas 1 : Evènement Eleanor. Evènement de référence pour la commune de Saint-Martin-de-Bréhal en matière de risque submersion. Dans la mesure où cet évènement dispose de nombreux retours d'expérience, il servira de base à la calibration de la chaîne de modélisation.
 - Cas 2 : Evènement type « Eleanor » à horizon 2070. Evènement de période de retour 20 ans (Tr_{20ans}) projeté à horizon 2070.
- Approche Plan Prévention Risques Littoraux (PPRL) :
 - Cas 3 : Scénario de référence (Tr_{100ans}) à court terme ;
 - Cas 4 : Scénario de référence (Tr_{100ans}) à horizon 2100.

Selon l'échéance à laquelle l'on se projette, des niveaux de fond variables sont associés à ces évènements marins. Les différentes approches de calcul modélisées sont présentées de façon illustrative sur la Figure 42.

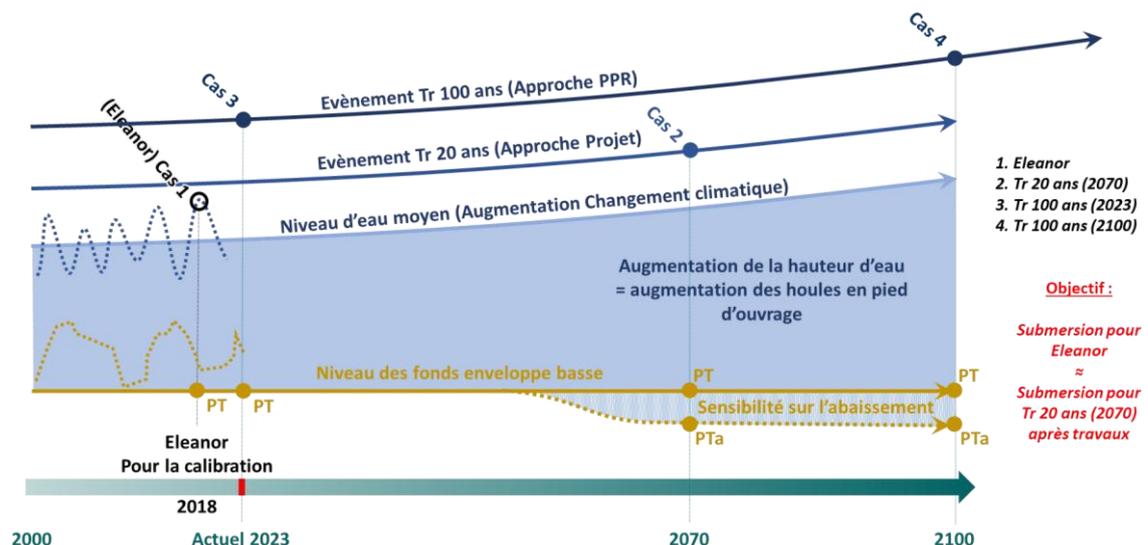


Figure 42. Approches de calcul modélisées.

Les cas définis pour l'approche de projet doivent permettre de répondre aux objectifs fixés par les membres du Comité de Pilotage :

Une fois les solutions d'aménagements mises en œuvre, l'objectif est d'obtenir pour le cas 2 (Tr_{20ans} / 2070) un niveau de submersion de l'ordre du niveau obtenu pour le cas 1 (Eleanor / 2018).

L'approche PPRL donne une indication pour ces évènements réglementaires de référence.

5.2. METHODOLOGIE

5.2.1. Introduction

La présente section vise à expliciter les choix considérés dans la chaîne de modélisation. La méthodologie mise en œuvre est la suivante :

- Propagation des états de mer du large jusqu'en pied d'ouvrage pour chaque cas de calcul (modèle SWAN2D puis SWAN1D) ;
- Calcul des débits de franchissements (analyse de différentes approches de calcul : formules de l'Eurotop II et outils de « réseau neuronal ») ;
- Injection de ces débits de franchissements dans le modèle d'écoulement TELEMAC permettant de qualifier le risque submersion.

La chaîne de modélisation détaillée dans cette section 5.2 est synthétisée dans la Figure 43.

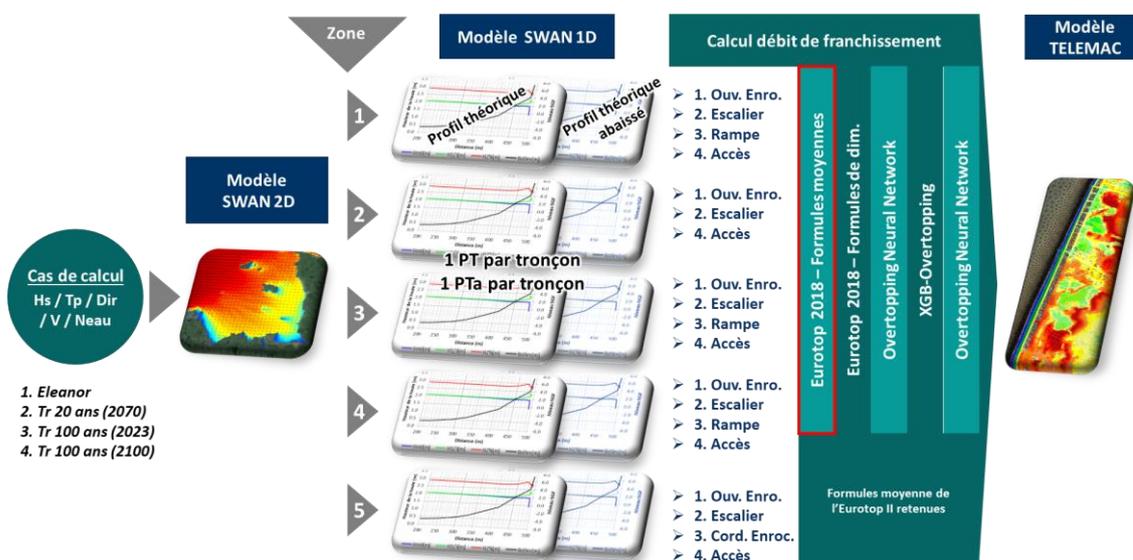


Figure 43. Chaîne de modélisation mise en œuvre.

Les résultats de cette chaîne de modélisation permettront de caractériser le risque submersion défini en section 6, pour les différents cas de calcul.

5.2.2. Découpage en secteurs homogènes

La méthodologie développée dans la suite de l'étude est basée sur la définition de cinq secteurs homogènes.

Ces secteurs sont représentatifs des variations morpho sédimentaires du site à l'étude. Ils sont définis sur la base des données détaillées dans l'analyse de l'évolution du littoral (section 3).

La Figure 54 illustre ces cinq secteurs homogènes, prolongés sur la partie terrestre.



Figure 44. Secteurs homogènes considérés.

5.2.3. Propagation des états de mer

5.2.3.1. Propagation du large à la côte (modèle SWAN2D)

Pour les différents cas de calcul évoqués précédemment, la propagation des conditions de houles depuis le large jusqu'à la côte est réalisée à l'aide du modèle SWAN 2D (décrit en section 0).

Niveaux d'eau

La modélisation de chacun de ces cas est effectuée pour trois moments de marée : PM³, PM+1h et PM+1,5h. Pour le niveau de Pleine Mer, les hypothèses suivantes sont retenues :

- Cas 1 : évènement Eleanor : le niveau d'eau relevé pour l'évènement Eleanor au port de Saint-Malo est de l'ordre de + 7,00 m NGF. En considérant une différence de surcote entre Saint-Malo et Saint-Martin-de-Bréhal, le niveau d'eau retenu dans le cadre de cette étude est de + 7,50 m NGF ;
- Cas 2 : évènement type Eleanor (Tr_{20ans}) : le niveau d'eau associé à un évènement de période de retour 20 ans se base sur le graphique des probabilités conjointes des événements extrêmes au niveau de Granville (Figure 41). Etant donné l'importance du niveau d'eau sur le calcul du débit de franchissements, un évènement associé à un niveau d'eau fort est retenu (+ 7,80 m NGF).
- Cas 3 et 4 : évènement type PPR (Tr_{100ans}) : l'approche PPR prend en compte un niveau d'eau de période de retour 100 ans (+ 8,10 m NGF, section 4.2.4) auquel on ajoute 25 cm d'incertitude.

Selon l'échéance à laquelle se projette chacun de ces cas, une élévation du niveau de la mer en lien avec le dérèglement climatique est considérée. L'approche PPR considère d'emblée une élévation à court terme de 20 cm (cas 3). Lorsque l'on se projette à plus long terme (cas 2 et cas 4), une élévation de + 0,50 m et + 1,00 m est considérée pour respectivement les horizons 2070 et 2100 (section 4.2.5.2).

Conditions de houle

Les houles associées à ces niveaux d'eau sont définies à partir des bases de données suivantes :

- Cas 1 : base de données HOMERE (point 67936) ;
- Cas 2, 3 et 4 : hauteur significative de houle associée à chacun des niveaux d'eau étudiés dans le graphique des probabilité conjointes de la Figure 41.

Synthèse

Le Tableau 10 propose une synthèse de ces conditions de houle propagées au large.

Tableau 10. Conditions de houle au large, propagée avec le modèle SWAN2D.

Cas de calcul	Niveau d'eau		Conditions de houle	
	Type	Valeur (m NGF)	Hs (m)	Tp (sec)
1 (Eleanor)	PM	+ 7,50	7,40	14,0
	PM + 1h	+ 6,55		
	PM + 1,5 h	+ 5,41		
2 (Tr _{20ans} - 2070)	PM	+ 8,30 (+ 7,80 + 0,50 m)	5,00	12,0
	PM + 1h	+ 7,35		
	PM + 1,5 h	+ 6,21		
3 (Tr _{100ans} - 2023)	PM	+ 8,55 (+ 8,10 + 0,25 + 0,20)	5,00	12,0
	PM + 1h	+ 7,60		
	PM + 1,5 h	+ 6,46		
4 (Tr _{20ans} - 2100)	PM	+ 9,35 (+ 8,10 + 0,25 + 1,00)	5,00	12,0
	PM + 1h	+ 8,40		
	PM + 1,5 h	+ 7,26		

³ PM : Pleine Mer.

5.2.3.2. Propagation de la houle en pied d’ouvrage

Une fois la houle propagée avec le modèle SWAN2D, les valeurs à la côte sont utilisées comme données d’entrée au modèle SWAN1D. Ce dernier permet la propagation et la définition des houles en pied d’ouvrage le long de profils de plage de manière plus fine.

Ces profils de plages doivent être représentatifs du contexte morfo sédimentaire du site à l’étude.

Ainsi, afin de tenir compte de ces évolutions morfo sédimentaires dans le temps et dans l’espace, cinq profils de plage associés aux cinq secteurs homogènes sont considérés. La définition des profils de plage est basée sur l’analyse des données issues du CREC (évolutions temporelles) et des levés topographiques LIDAR de 2017 et 2020 (évolutions spatiales, 1 profil tous les 50 m) (Figure 45).

Pour chaque secteur homogène, deux profils de plage d’une longueur de 500 m sont extraits :

- Profil théorique : il s’agit du niveau de sable représentatif de l’enveloppe basse de l’ensemble des profils étudiés ;
- Profil abaissé : ce profil tient compte d’un potentiel abaissement à long terme. Sur la base de l’analyse des évolutions morfo sédimentaires du site (section 3) et devant les nombreuses incertitudes à long terme (abaissement par cycle, évolutions à plus grande échelle relativement contradictoire, présence potentielle d’une couche de tange consolidée), il est considéré un abaissement homogène pour l’ensemble des secteurs de 1 m en pied d’ouvrage.



Figure 45. Secteurs homogènes.

Le Profil Théorique (PT) est considéré pour l’ensemble des cas de calcul. Une sensibilité est effectuée avec le Profil Théorique abaissé (PTa) sur les cas étudiés à plus long terme (cas 2 et 4).

Pour exemple, la vue en plan de la Figure 46 et le graphique de la Figure 47 présentent les résultats de cette analyse au niveau du secteur 3. On retrouve ainsi sur le graphique les enveloppes de sable maximum et minimum extraites de la compilation de 7 profils de plage LIDAR (profils 13 à 19) et de 59 profils de plage du CREC (profil SW81 sur les dates allant de 1992 à 2021).



Figure 46. Vue en plan illustrant les profils considérés pour la définition des profils de référence au niveau du secteur 3.

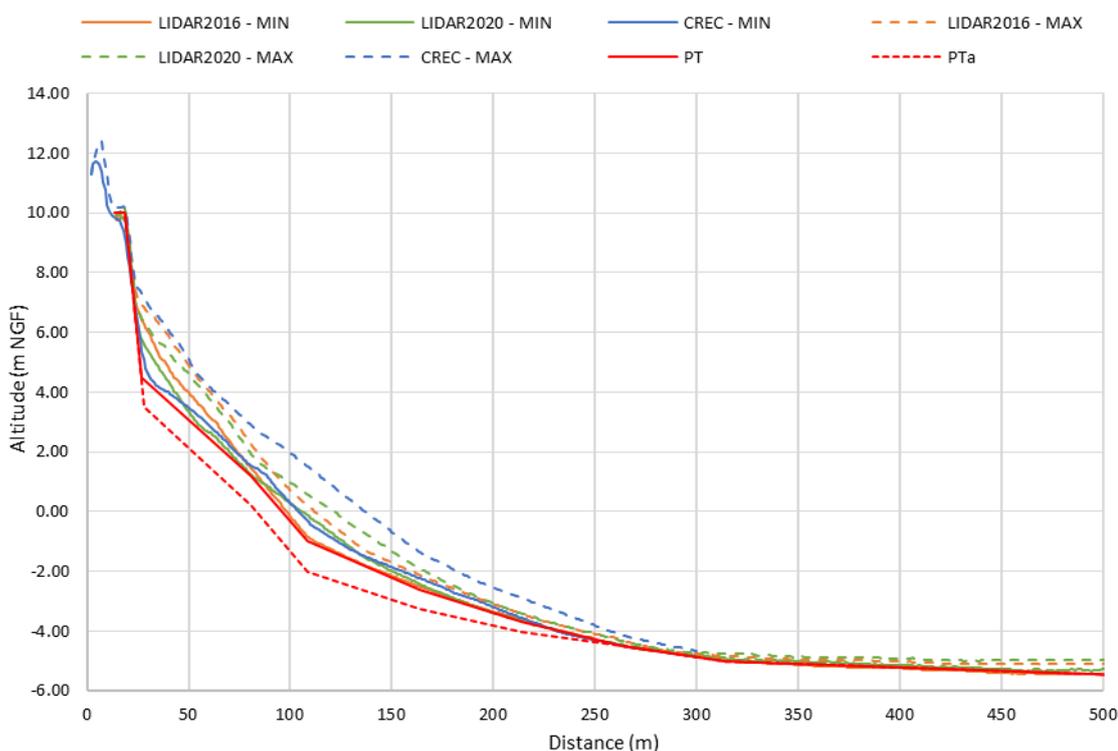


Figure 47. Graphique illustrant la définition des profils de référence au niveau du secteur 3 (PT : Profil Théorique / PTa : Profil Théorique abaissé).

L'ensemble des profils types sont présentés en Figure 48.

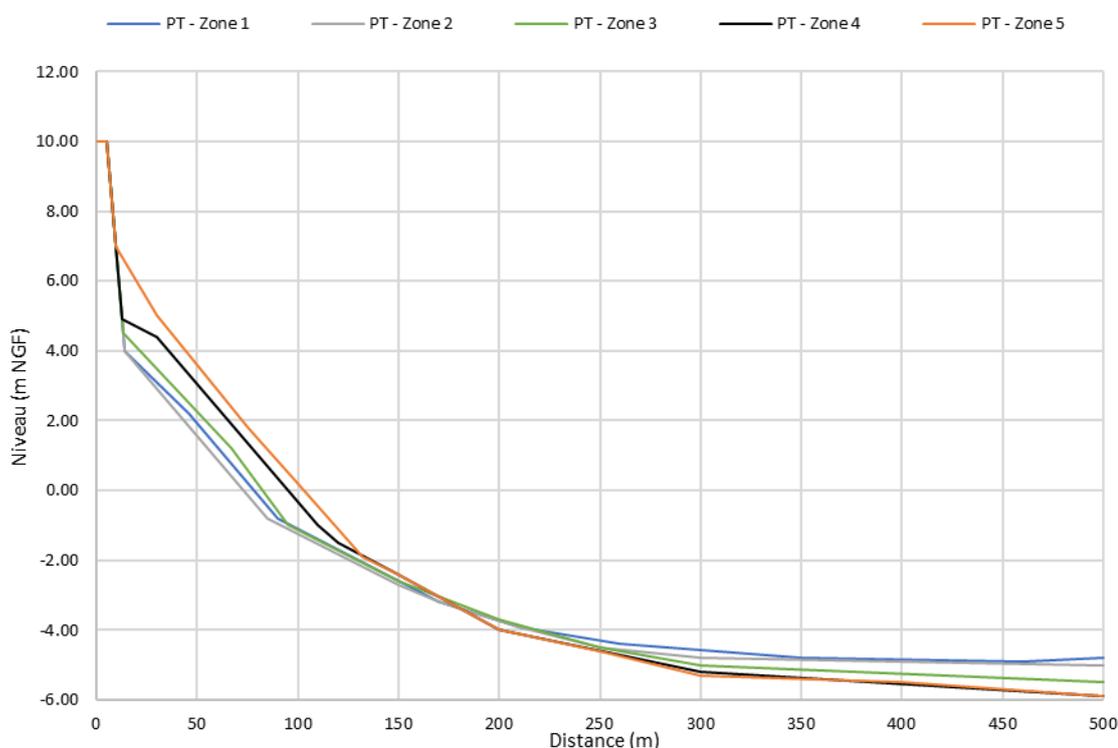


Figure 48. Graphique illustrant les Profils Types (PT).

La Figure 48 met en avant les différences de niveau de sable qu'il peut y avoir d'un bout à l'autre du secteur à l'étude. Les zones 1, 2 et 3 ayant des niveaux de sables plus faibles en pied d'ouvrage que les zones 4 et 5.

A Pleine Mer, les conditions de houle en entrée de chacun de ces profils à des profondeurs de l'ordre de - 10,00 m NGF sont détaillées dans le Tableau 11.

Tableau 11. Conditions de houle à Pleine Mer en entrée de profil de chaque zone.

Zone	Hs (m)			
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
1	2,43	2,47	2,50	2,57
2	2,44	2,48	2,51	2,58
3	2,40	2,44	2,46	2,54
4	2,42	2,46	2,49	2,56
5	2,42	2,46	2,48	2,56

En entrée de profil (500 m au large), la houle ayant été peu influencée par les fonds, des hauteurs significatives homogènes sont observées entre les différentes zones étudiées.

Une fois la houle propagée le long des profils de plage, les variations morpho sédimentaires à l'échelle du site se font ressentir.

Le Tableau 12 propose une synthèse des hauteurs de houles significatives H_{m0} en pied de protection en enrochements au moment de la Pleine Mer.

Tableau 12. Hauteur significative H_{m0} en pied d'ouvrage en enrochements au moment de la Pleine Mer.

Zone	H_{m0} (m)					
	Cas 1	Cas 2		Cas 3	Cas 4	
	PT*	PT	PTa	PT	PT	PTa
1	2,21	2,35	2,37	2,39	2,54	2,51
2	2,22	2,37	2,38	2,41	2,46	2,44
3	2,07	2,27	2,35	2,32	2,43	2,41
4	1,75	2,06	2,32	2,16	2,45	2,53
5	-	1,42	1,99	1,57	2,06	2,44

*PT : Profil Type / PTa : Profil Type abaissé

Sur la base des résultats de la propagation de la houle en pied d'ouvrage les observations suivantes peuvent être faites :

- Selon le niveau de sable et le moment de la marée, le pied d'ouvrage en enrochements n'est pas toujours en eau (exemple du cas 1, zone 5 à Pleine Mer) ;
- La houle est plus fortement écrêtée au niveau des zones 4 et 5 du fait des niveaux de sable plus important (Figure 48). Si l'on se projette dans le temps (élévation du niveau d'eau et abaissement du niveau de sable), cette distinction entre la moitié Nord et Sud du secteur à l'étude s'estompe ;
- A pleine mer, l'abaissement du niveau de sable engendre une augmentation de la houle en pied de protection en enrochements allant jusqu'à 40 % pour le cas 2 et jusqu'à 20 % pour le cas 4.

5.2.4. Calcul des débits de franchissement

Le modèle SWAN 1D a permis de caractériser les conditions de houle en pied d'ouvrage pour chaque cas étudié et pour les cinq secteurs homogènes. Il s'agit là des données d'entrée pour le calcul des débits de franchissements.

5.2.4.1. Formules et outils considérés

Une comparaison des différentes formulations et outils permettant le calcul des débits de franchissements est effectuée dans le cadre de cette étude. Ce sont les formulations de l'Eurotop II et différents outils de « réseau neuronal » qui sont analysés.

Les formules fournies par le manuel **Eurotop II** sont des formulations empiriques définies sur la base de nombreux essais en laboratoire et dépendent de la typologie d'ouvrage. Les formules suivantes sont retenues :

- Ouvrage de type escalier, cale : formules générales du chapitre 5 de l'Eurotop II ;
- Ouvrage de type protection en enrochements : formules du chapitre 6 de l'Eurotop II pour un ouvrage en enrochements à pente unique.

Pour chacun de ces calculs de franchissements, les approches moyennes et de dimensionnement sont considérées.

Les outils de « réseau neuronal » s'appuient également sur de nombreux essais en laboratoire mais avec pour objectifs de d'utiliser plus directement les résultats obtenus lors des essais. Ainsi l'outil va chercher la ou les configuration(s) la(es) plus proche(s) modélisée(s) en laboratoire et utilise le ou les résultat(s) qui lui(leurs) sont associés. Les différentes formes de l'outil disponibles et considérée dans le cadre de cette analyse sont les suivant :

- **Overtopping Neural Network** : c'est le premier outil développé par Deltares à partir de la base de données CLASH ;
- **XGB-Overtopping** : c'est le nouvel outil développé par Deltares en 2021. Il se veut plus précis que son prédécesseur, grâce à l'utilisation de nouvelles techniques et d'une base de données élargie ;
- **Bayonnet GPE** : c'est un outil développé par HR Wallingford en 2019. Initialement l'outil Bayonnet se basait lui aussi sur la méthode par réseau neuronal et sur le projet CLASH. Dans sa dernière version il utilise le métamodèle Processus Gaussien (Gaussian Process Emulator [GPE]) qui permet d'apporter une dimension « analyse statistique » aux résultats.

5.2.4.2. Comparaison des méthodes de calcul

Le calcul des débits de franchissements (en l/m/s) est réalisé au niveau de la promenade, en crête de la protection en enrochements. Les hypothèses suivantes sont retenues :

- Trois typologies d'ouvrages sont retenues : protection en enrochements, escalier, cale béton de mise à l'eau ;
- Pour chaque secteur homogène, les débits de franchissements sont considérés homogènes le long de la protection en enrochements ;
- Pour chaque typologie d'ouvrage et profil de plage considéré, un point d'extraction différent de la houle est considéré.

Les caractéristiques géométriques retenues sont détaillées dans le Tableau 13.

Tableau 13. Caractéristiques géométriques des ouvrages considérées pour le calcul des débits de franchissements.

Typologie d'ouvrage	Niveau de crête		Largeur crête	Coefficient rugosité	Pente de talus
	Enrochements	Route			
	Nr (m NGF)	Nw (m NGF)	Gc (m)	$\gamma_r (-)$	$\cot(\alpha_d) (-)$
Protection enrochements	+ 10,30	+ 9,80	2,40	0,55	1,75
Escalier	-	+ 9,80	-	0,70	2,00
Cale Nord	-	+ 10,00	-	1,00	6,00
Cale de la Vigie	-	+ 9,55	-	1,00	18,00*
Cale de Coudeville	-	+ 10,75	-	1,00	10,00

* Une pente fictive de 18H / 1V est donnée afin de rentrer dans le domaine de validité de l'outil BAYONNET GPE.

Afin de faciliter la lecture des résultats, les graphiques suivants illustrent les résultats du cas de calibration à Pleine Mer : l'évènement Eleanor (cas 1).

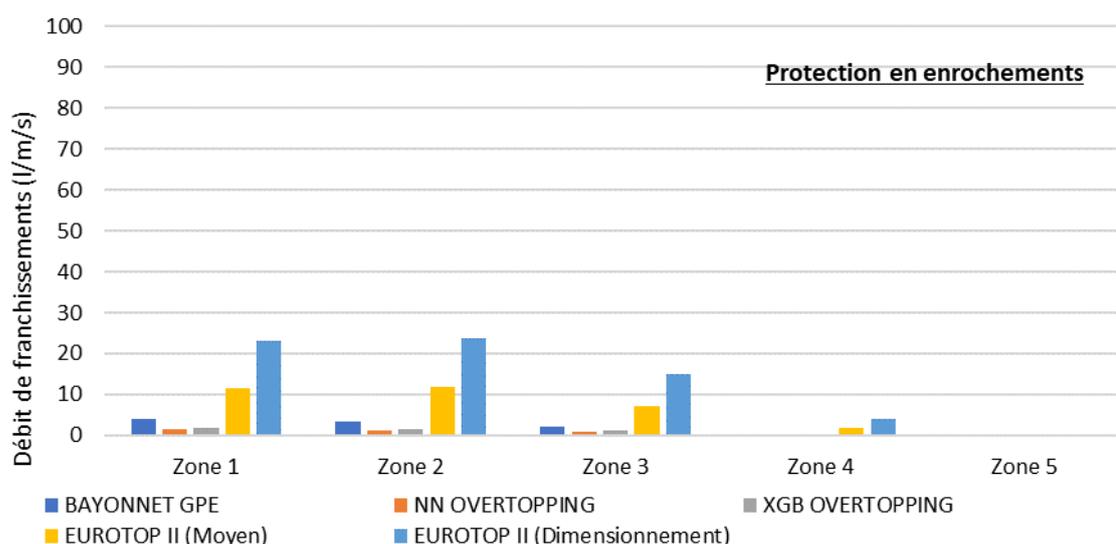


Figure 49. Débits de franchissements pour le cas 1 à Pleine Mer de la protection en enrochements.

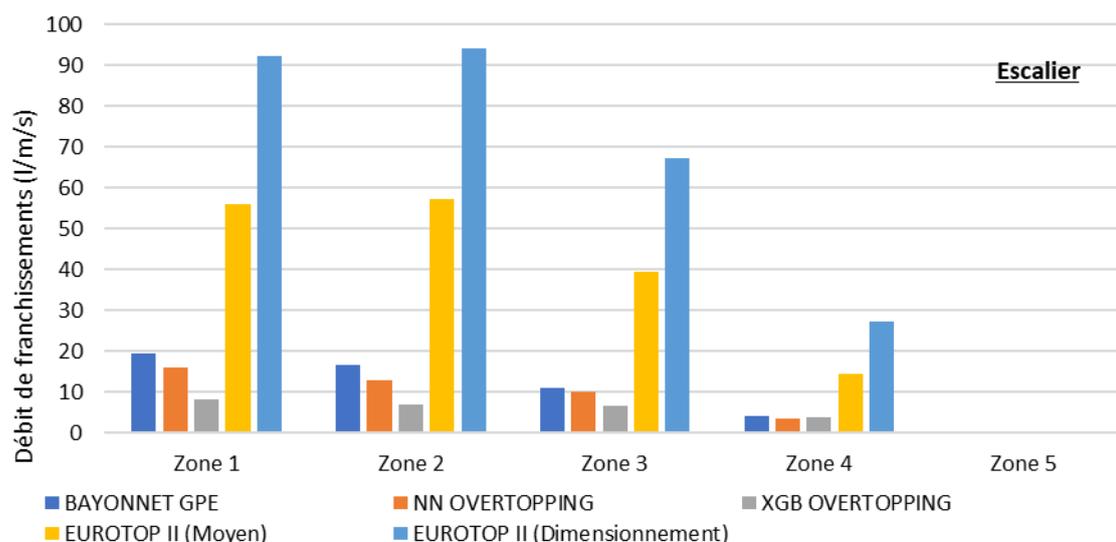


Figure 50. Débits de franchissements pour le cas 1 à Pleine Mer des escaliers.

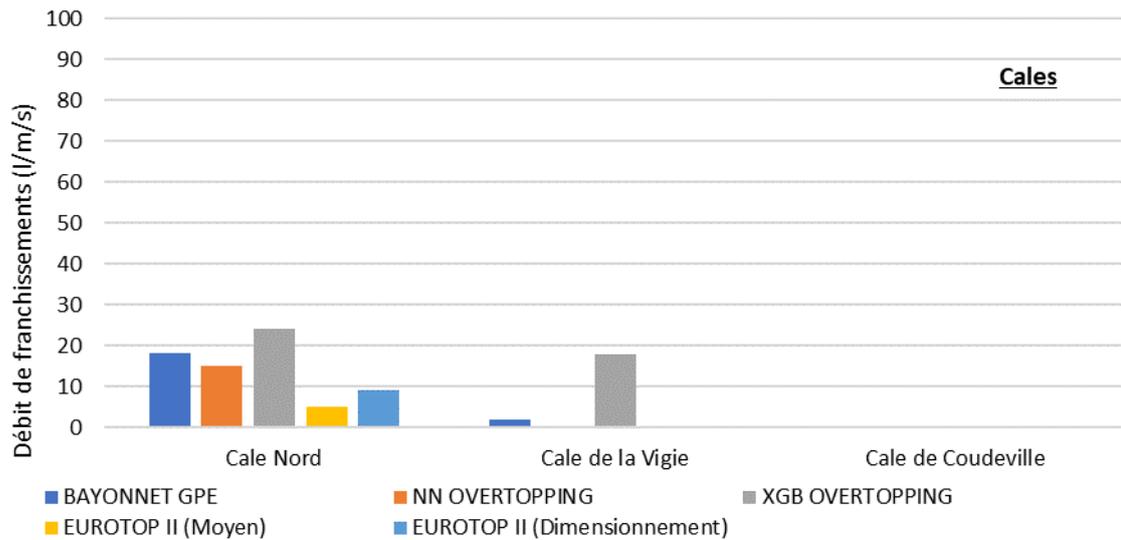


Tableau 14. Débits de franchissements pour le cas 1 à Pleine Mer des cales.

Sur la base de ces résultats les observations suivantes peuvent être effectuées :

- Pour la protection en enrochements et les escaliers :
 - Les tendances d'évolutions observées entre les différents cas sont cohérentes ;
 - Une homogénéité entre les résultats des outils de « réseau neuronal » est relevée. L'outil Bayonnet GPE donnant des résultats relativement plus importants ;
 - Les débits rencontrés avec les outils de « réseau neuronal » semblent faibles vis-à-vis de ce qui a réellement pu être observé in-situ sur ce cas Eléonor ;
 - Les débits de franchissement obtenus avec les formules de l'Eurotop sont cohérents avec les observations et vidéo réalisées lors de la tempête Eléonor.
- Pour les cales de mises à l'eau, aucune cohérence n'est observée et les débits rencontrés sont faibles (alors qu'il s'agit de points d'entrée privilégiés) ;
- Sur la base de cette analyse, étant donné son caractère paramétrique et cohérent ainsi que les retours d'expérience dont il bénéficie, le manuel de l'Eurotop sera retenu dans la suite de l'étude. En considérant :
 - Pour la protection en enrochements et les escaliers, les formulations moyennes de l'Eurotop II ;
 - Pour les cales, étant donné qu'il s'agit de points spécifiques, difficilement modélisables, le débit considéré correspond à la moyenne entre les débits rencontrés au Nord et au Sud de chaque cale, au niveau de la protection en enrochements.

5.2.5. Modèle d'écoulement (TELEMAC)

Le modèle d'écoulement considéré dans le cadre de cette analyse est le modèle TELEMAC. Il est alimenté pour les différents cas étudiés par les résultats de débits de franchissements calculés à partir des formules moyennes de l'Eurotop II.

5.2.5.1. Définition du modèle

Les modélisations sont réalisées à l'aide des outils du système TELEMAC.

Le logiciel TELEMAC-2D appartient au système de modélisation en éléments finis TELEMAC, développé initialement par le Laboratoire National d'Hydraulique d'EDF et actuellement par un consortium qui comprend les entités suivantes : EDF, CEREMA, BAW, laboratoire de Daresbury, HR Wallingford et Artélia.

TELEMAC regroupe un ensemble de logiciels dédiés aux problèmes de mécanique des fluides de l'environnement : courantologie bi et tridimensionnelle, houle, sédimentologie, qualité d'eau.

Les principaux avantages que présente le système TELEMAC en regard de la présente étude sont les suivants :

- Le terrain est représenté par un assemblage d'éléments triangulaires de tailles et de formes variables formant le maillage de calcul. Cette technique « éléments finis » procure deux avantages essentiels :
 - Le maillage épouse avec fidélité les géométries complexes du modèle : les digues et les rues sont ainsi représentées avec précision,
 - Elle autorise de densifier le maillage et donc d'affiner les résultats fournis par le modèle dans les zones d'intérêt.
- L'outil de génération de maillage, intégré au système TELEMAC, adapte la densité du maillage à différents critères comme la profondeur ou la pente des fonds. Il réalise un compromis entre les besoins en précision dans les régions où l'hydraulique est complexe (estrans, berges d'un chenal, etc.) et le nombre total de points. Cette caractéristique est essentielle pour maintenir au modèle son caractère opérationnel en termes de précision et de temps de réponse.
- Il est possible d'implémenter des ouvrages (type conduite de vannage ou écluse) directement dans le modèle, les débits transitant dans ces ouvrages étant calculés par une loi d'orifice.

Utilisé par de nombreux centres de recherche et bureaux d'étude dans le monde, TELEMAC figure actuellement parmi les outils les plus performants du marché.

Le logiciel TELEMAC-2D résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions d'espace horizontal. Ses résultats principaux sont, en chaque point du maillage de résolution, la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sur la verticale.

TELEMAC-2D trouve ses applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale et est capable de prendre en compte les phénomènes physiques suivants :

- Propagation des ondes longues avec prise en compte des effets non linéaires,
- Frottement sur le fond,
- Influence de la force de Coriolis,
- Influence de phénomènes météorologiques : pression atmosphérique et vent,
- Turbulence,
- Ecoulements torrentiels et fluviaux,
- Influence de gradients horizontaux de température ou de salinité sur la densité,

- Coordonnées cartésiennes ou sphériques pour les grands domaines,
- Zones sèches dans le domaine de calcul : bancs découvrant et plaines inondables,
- Entraînement par le courant et diffusion d'un traceur, avec des termes de création ou de disparition,
- Suivi de flotteurs et dérives lagrangiennes,
- Traitement de singularités : seuils, digues, buses,
- Prise en compte des forces de traînée des structures verticales,
- Prise en compte des courants de houle (par couplage avec les modules ARTEMIS et TOMAWAC).

5.2.5.2. Construction du MNT

La Figure 51 présente le Modèle Numérique de Terrain (MNT) utilisé pour la caractérisation des venues d'eau sur la commune de Saint-Martin-de-Bréhal.

Le but de cette étape est de représenter le plus fidèlement possible la topographie et particulièrement les obstacles qui vont contraindre les écoulements. Pour cela, des ajustements sont opérés :

- Génération d'ilots au niveau des maisons de premier rang (aucun écoulement ne traverse ces zones) ;
- Adaptation de la géométrie du MNT au niveau de la cale de la Vigie.

La taille des mailles varie de 150 m au large à 1 m sur la partie terrestre. Au total, le modèle comporte 844 141 nœuds de calculs soit 1 632 706 mailles triangulaires.

Un coefficient de Strickler variable a été appliqué au maillage selon la nature des fonds. Le type de sol est issu de la base de données Corine Land Cover actualisée en 2018.

Les données topo-bathymétriques utilisées sont issues du LIDAR de 2020 pour la partie terrestre associé au MNT Golf Norman Bretagne (SHOM, 2020) pour la partie maritime.

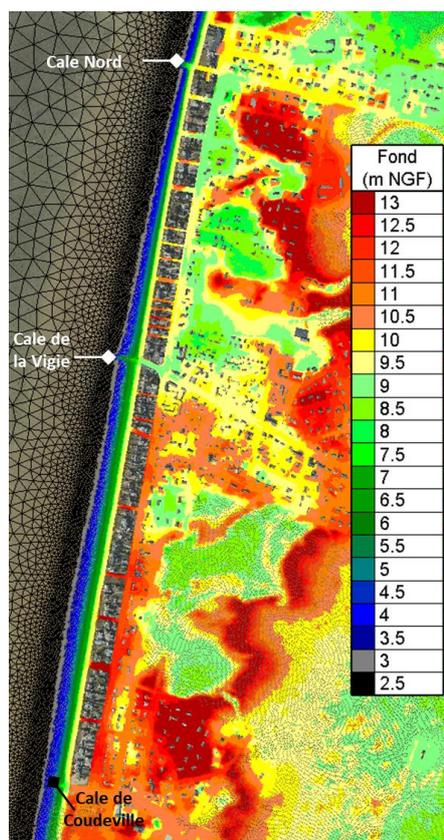


Figure 51. MNT considéré.

5.2.5.3. Alimentation du modèle d'écoulement

Le calcul des débits de franchissements a jusqu'à présent été mené pour plusieurs typologies d'ouvrages et selon trois niveaux de marée : PM, PM+1h et PM+1,5h. Cela permet de faciliter la comparaison des résultats et sert de base à la construction d'une chronique de franchissements.

Le modèle d'écoulement TELEMAC doit être alimenté par les débits de franchissements calculé avec les formules de l'Eurotop II de la manière la plus fine possible.

Pour cela différents points d'injection sont définis :

- Pour la protection en enrochements (zone 1 à 5) et le cordon en enrochements (zone 5) : 1 point d'injection tous les 20 m ;
- Pour les escaliers et les cales : 1 point d'injection en crête de chaque entité ;
- De plus, afin de représenter le plus fidèlement possible les entrées d'eau à l'arrière des habitations de premier, des points d'injection au niveau des accès sont considérés : 1 point d'injection par accès. Le calcul des débits de franchissements au niveau de ces points est effectué sur la base des formulations de l'Eurotop II, en considérant leur point culminant comme niveau de crête.

C'est donc 136 points d'injection qui sont modélisés (Figure 52) et répartis de la manière suivante : 94 pour les protections en enrochements, 10 pour les escaliers, 3 pour les cales, 4 pour les cordons en enrochements et 25 pour les accès.

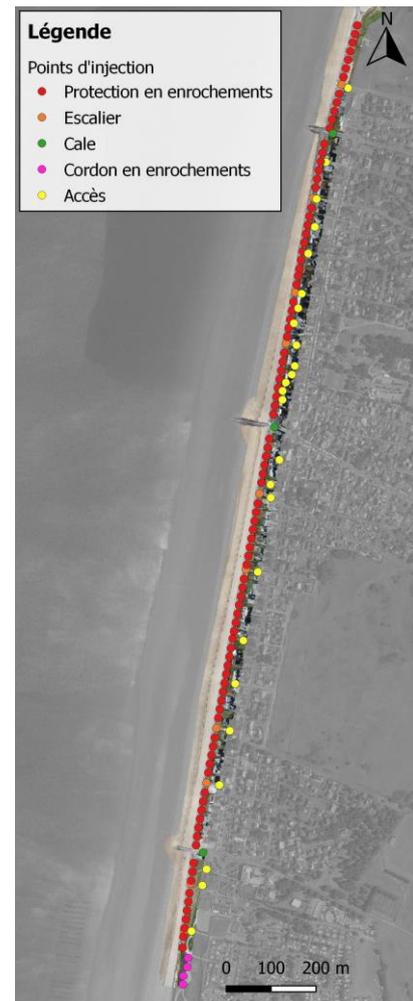


Figure 52. Points d'injection

Chaque point est caractérisé par un linéaire d'application permettant ainsi de passer d'un débit de franchissement en l/m/s (à la suite de l'application des formules) à un débit de franchissements en l/s (ou m³/s) (afin d'alimenter le modèle TELEMAC).

Pour chaque point d'injection, une chronique de 12 h de débits de franchissements (représentative d'un pic de marée haute) avec un pas de temps de 10 min est ainsi générée. Pour exemple, la Figure 53 illustre une chronique de franchissement au niveau d'un point d'injection de la promenade en enrochements de la zone 2.

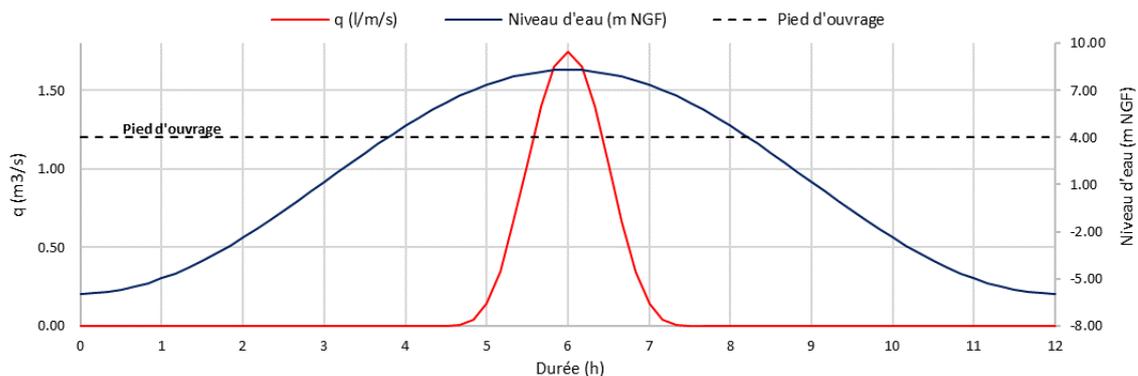


Figure 53. Exemple de chronique de franchissement pour un point d'injection (zone 2, protection en enrochements).

6. CARACTERISATION DE L'ALEA INONDATION

6.1. CALIBRATION DE LA CHAÎNE DE MODELISATION

6.1.1. Données disponibles

La calibration de la chaîne de modélisation est réalisée sur la base de l'évènement Eleanor (cas 1). Il s'agit d'une tempête de référence, relativement bien documentée.

Les données disponibles sont détaillées en suivant :

- Houle et niveau d'eau de l'évènement issus respectivement de la base de données HOMERE et du marégraphe de Saint Malo ;
- Les vidéos et photographies disponibles de la commune et diffusées sur internet ;
- Une emprise approximative de la zone de submersion tracée par l'Associations Syndicales Autorisées (ASA).

Les photographies suivantes illustrent les conséquences de l'évènement Eleanor sur la commune de Saint-Martin-de-Bréhal.



Figure 54. Franchissements au niveau de la protection en enrochements (Captures vidéo : Commune de Saint-Martin-de-Bréhal / YouTube).



Figure 55. Submersion au niveau de la cale de la Vigie (Capture vidéo : YouTube).

Les principaux impacts relevés sont détaillés en suivant :

- Les volumes de franchissements et les écoulements associés au niveau de la promenade à l'arrière de la protection en enrochements sont significatifs. Un cheminement piéton lors de la tempête est inenvisageable ;
- L'accès à la cale de la Vigie, étant donné sa topographie basse, fait office de zone d'écoulements privilégiés des eaux venants de la promenade en front de mer ;
- La quasi-totalité des désordres relevés sont situés sur la moitié Nord du secteur à l'étude (zone 1, 2 et 3) ;

- Etant donné la topographie haute des habitations de premier rang, elles ont peu été impactées (quelques embruns) ;
- Les terrains et maisons impactées sont situés au niveau de la seconde ligne d'habitations.

6.1.2. Résultats de la calibration

La Figure 56 illustre les résultats de la modélisation du cas 1 de calibration.

Elle présente les hauteurs d'eau maximales relevées à l'échelle de l'ensemble de la modélisation (chronique de 12 h de franchissements) ainsi que l'emprise Eleanor relevée par les techniciens de la commune.

Seule la moitié Nord du secteur à l'étude est présentée puisque aucun risque de submersion n'est relevé au Sud.

Les principales observations associées à ce cas de calibration sont détaillées en suivant :

- Les résultats font état de franchissements et d'une zone de submersion plus faibles que ce que les retours d'expérience semblent témoigner ;
- Il y a donc une difficulté à retrouver cette emprise identifiée par l'ASA (assumée comme approximative) ;
- Les hauteurs d'eau sont cohérentes avec ce qui a pu être observé in situ ;
- Le modèle donne des tendances de submersion et ne peut rentrer dans des détails du type muret ou clôture qui permettent de contenir les écoulements.



Figure 56. Hauteurs d'eau maximales pour le cas 1.

La dynamique de submersion et l'emprise finale du cas 1 donnent globalement satisfaction.

Ainsi, malgré le fait que les résultats issus du modèle d'écoulement ne collent pas parfaitement avec la carte de la zone impactée par la tempête Eleanor transmise par l'ASA, cela permet tout de même de comparer ces résultats à ceux issues des autres scénarios dans le but d'atteindre les objectifs fixés dans le cadre de cette étude.

6.2. RESULTATS DE MODELISATION

Les résultats de la modélisation de tous les cas de calcul sont présentés sous deux formes : emprises de submersion et volumes de submersion.

Emprises de submersion

Les emprises de submersion des différents cas sont présentées sur la Figure 59. Elles sont représentatives des hauteurs d'eau maximales relevées à l'échelle de l'ensemble de la modélisation.

Les cas soumis à une sensibilité sur un abaissement du niveau de sable à long terme sont mentionnés par un indice « a ».

Les cinq zones représentatives des cinq secteurs homogène (section 5.2.3.2) sont représentées sur chacune des cartes.

Volumes de submersion

Afin de faciliter la comparaison entre les résultats et l'identification de zones d'intervention prioritaires, les volumes d'eau associés à ces hauteurs d'eau maximales sont extraits.

L'extraction des volumes d'eau par secteur homogène se fait sur la base des hauteurs d'eau maximales présentées en Figure 58 et Figure 59. La promenade à l'arrière de la protection en enrochements étant systématiquement submergée pour l'ensemble des cas, les volumes d'eau associés ne sont pas intégrés à l'analyse.

Les volumes de submersion sont présentés dans graphique de la Figure 57.

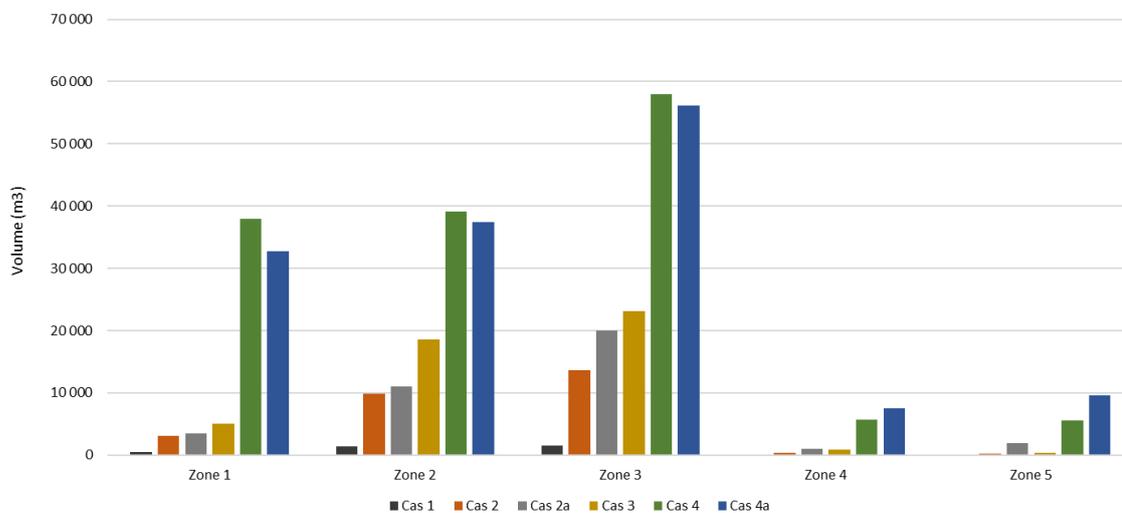


Figure 57. Volumes de submersion par zone et par cas.



Figure 58. Hauteurs d'eau maximales pour les cas 1, 2 et 2a actuels.

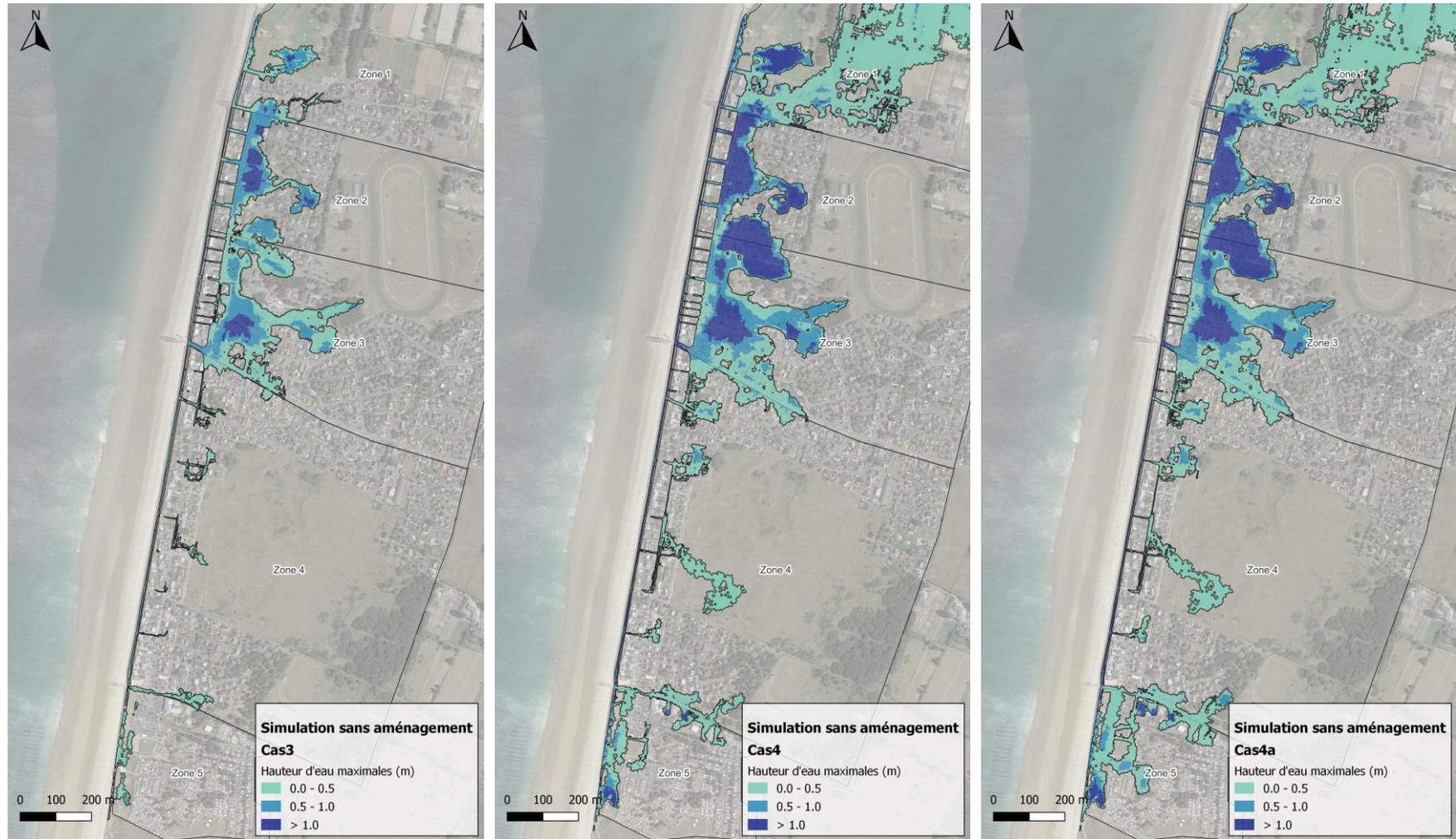


Figure 59. Hauteurs d'eau maximales pour les cas 3, 4 et 4a actuels.

6.3. ANALYSE DES RESULTATS

Pour faciliter la lecture des résultats, les volumes de submersion sont rappelés en Figure 60, l'objectif de projet est aussi affiché.

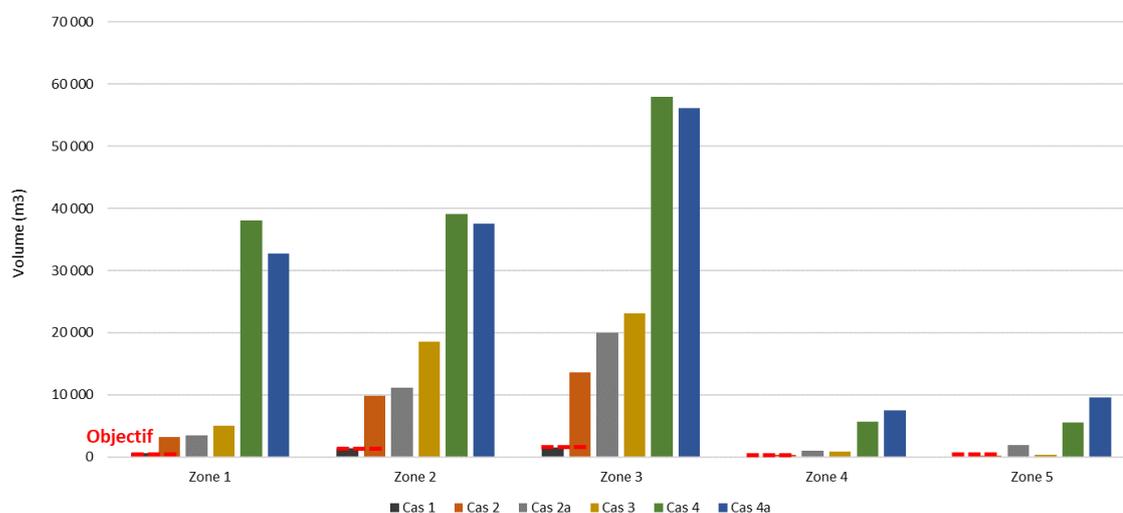


Figure 60. Volumes de submersion par zone et par cas.

Sur la base de ces résultats de modélisation (emprises et volumes), les principales observations sont détaillées en suivant :

- Comme évoqué en section 6.1.2, la dynamique de submersion et l'emprise finale du cas 1 de calibration donnent globalement satisfaction ;
- Pour l'ensemble des cas, c'est la zone 3 qui est la plus impactée. Environ 45 % du volume total de submersion par cas est identifié au niveau de cette zone 3 ;
- A l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude, la principale entrée d'eau est située au niveau de l'accès à la cale de la Vigie (frontière entre les zones 3 et 4) ;
- Les principales conséquences de l'abaissement du niveau de sable sont :
 - Pour le cas 2a : une augmentation relative des volumes de submersion allant de 10 % pour la zone 1 à 900 % pour la zone 5. Cette augmentation significative au niveau de la zone 5 est due au fait que pour le cas 2 les volumes sont quasi inexistantes ;
 - Cas 4 : une augmentation relative de 30 et 70 % pour les zones 4 et 5. L'abaissement ne semble cependant pas avoir d'influence sur les franchissements à horizon 2100 sur les zones 1 à 3 pour le cas PPRL. Une diminution est même relevée en lien avec un gonflement et une attaque de la houle moins agressive due à une hauteur d'eau plus importante ;
- Les zones 4 et 5 sont principalement impactées à partir d'un événement type PPR (cas 3 et 4). Les entrées d'eau se font en majorité au niveau de la cale de Coudeville ;
- Pour le cas 4, l'emprise de submersion arrive en limite de modèle au niveau de la zone 1 ;

Il est rappelé sur la Figure 57 l'objectif de projet : obtenir, une fois les solutions d'aménagements mises en œuvre, pour le cas 2 (Tr_{20ans} / 2070) un niveau de submersion de l'ordre du niveau obtenu pour le cas 1 (Eleanor / 2018).

Pour cela, sur la base de ces résultats de modélisation et de l'identification des zones sensibles, une stratégie d'aménagements de protection est présentée en section 6.3.

7. ANALYSE DES SOLUTIONS D'AMENAGEMENTS

7.1. SOLUTIONS D'AMENAGEMENTS ENVISAGEABLES

Afin d'adopter une stratégie efficace de protection contre le risque de submersion, différents secteurs clés d'interventions sont identifiés : l'ouvrage de protection en enrochements, les accès à la plage (escalier, cale) et les accès terrestres de second rang.

7.1.1. Ouvrage de protection en enrochements

L'ouvrage en enrochements est la protection de première ligne pour faire face à l'attaque de la houle. Il permet de casser la dynamique des vagues et selon ses dispositions constructives de limiter le phénomène de franchissements par paquets de mer.

Les dispositions constructives principales permettant de limiter les franchissements par paquets de mer sont détaillées en suivant :

- Réhausser le niveau de crête (création d'un mur et/ou rehausser les enrochements) pour augmenter la revanche de crête (paramètre prépondérant dans le calcul du débit de franchissements) et ainsi diminuer des débits de franchissements. Une géométrie chasse-mer peut être envisagée ;
- Augmenter la largeur en crête et donc la porosité de la carapace pour favoriser la dissipation de la houle ;
- Adoucir la pente de talus pour favoriser la dissipation de la houle.

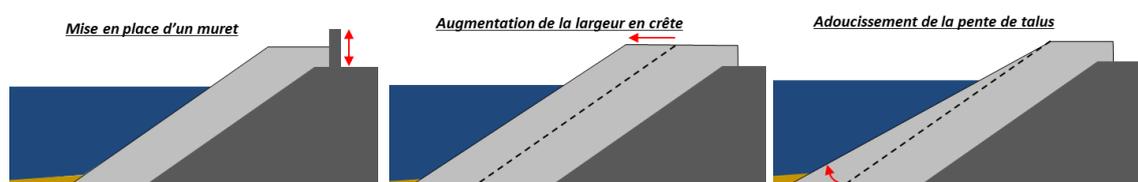


Figure 61. Dispositions constructives permettant de limiter les franchissements par paquets de mer.

Une analyse de sensibilité est effectuée sur ces différents paramètres. En considérant la protection en enrochements au niveau de la zone 3, les figures suivantes présentent la réduction du débit de franchissement associé à l'augmentation du niveau de crête (Figure 62), à l'augmentation de la largeur en crête (Figure 63) et à l'adoucissement de la pente de talus (Figure 64). Les formulations de l'Eurotop II sont considérées.

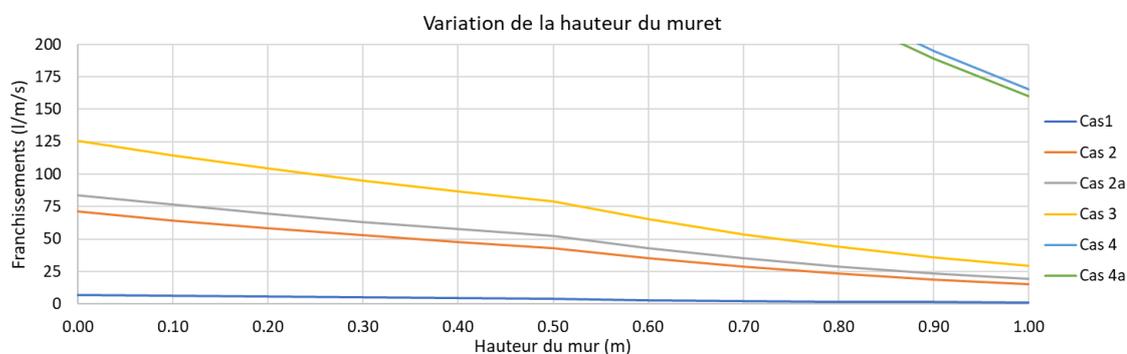


Figure 62. Variation des franchissements par paquets de mer au niveau de la protection en enrochements (zone 3) en fonction de la hauteur du mur.

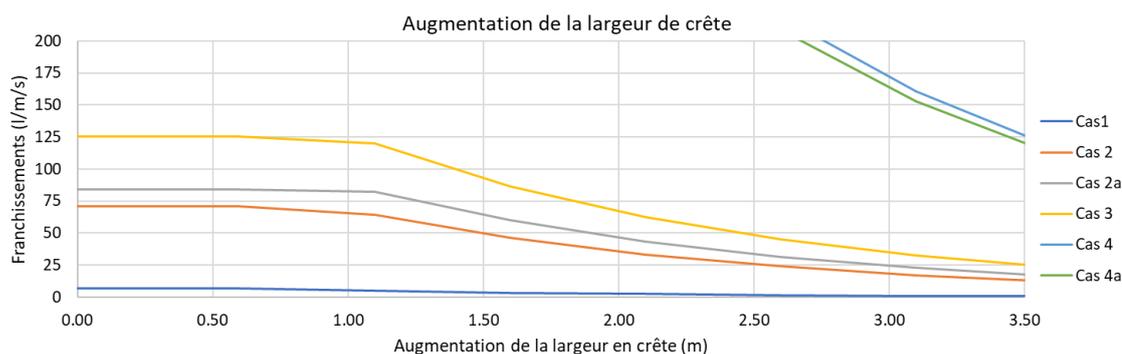


Figure 63. Variation des franchissements par paquets de mer au niveau de la protection en enrochements (zone 3) en fonction de l'augmentation de la largeur en crête.

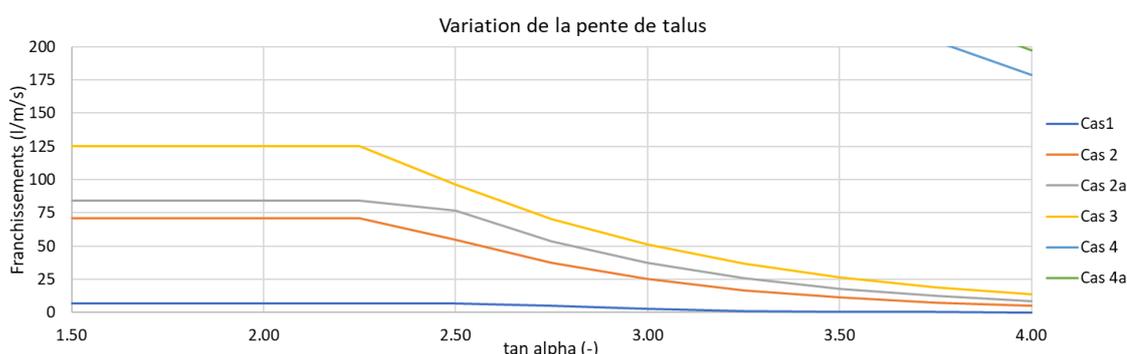


Figure 64. Variation des franchissements par paquets de mer au niveau de la protection en enrochements (zone 3) en fonction de l'adoucissement de la pente de talus ($\tan \alpha$).

Pour avoir un même débit de franchissements que la mise en place d'un mur de 1 m de hauteur, il faudrait :

- Augmenter la largeur en crête de 3 à 3,5 m ;
- Adoucir la pente à 3,25H/1V ce qui entraîne une augmentation de l'emprise en pied d'ouvrage d'environ 10 m.

C'est donc l'augmentation du niveau de crête via la mise en œuvre d'un muret qui offre le couple limitation des travaux de confortement - effet sur la réduction des débits de franchissements le plus intéressant. De plus, au-delà du coût financier conséquent des deux autres solutions, elles sont défavorables vis-à-vis de l'emprise de l'ouvrage sur le Domaine Public Maritime.

Les interventions au niveau de la protection en enrochements se limitent à la mise en œuvre d'un mur pour la suite de l'étude. Il est tout de même à noter que, dans le cadre des études de dimensionnements postérieures, d'autres aspects seront à considérer :

- La réalisation d'un muret implique la canalisation des eaux de franchissement entre cette paroi imperméable et les habitations de premier rang. Il est donc indispensable d'intégrer à la réflexion sur le dimensionnement de cet ouvrage le ressuyage de ces eaux maritimes (mise en place de barbacane, système de pompage, tuyau d'évacuation, ...) ;
- Ces dispositions constructives n'ont de sens que si la stabilité de cet ouvrage est assurée à long terme. Etant donné le niveau où sont ancrés les enrochements et les problématiques d'abaissement du niveau de sable, le risque d'instabilité à court-moyen terme existe. Une réflexion globale sur la stabilité de cette protection en enrochements doit être menée.

7.1.2. Solutions pour les accès à la plage

La protection en enrochements de Saint-Martin-de-Bréhal dispose de différents points d'accès à la plage qui sont autant d'entrées d'eau privilégiées par les franchissements par paquets de mer. Il s'agit d'accès piéton avec les escaliers (10 entités) ou d'accès pour les engins avec les cales béton de mise à l'eau (3 entités).

7.1.2.1. Escaliers

Etant donné le nombre important d'accès piétons à la plage via les escaliers, une réflexion globale de réaménagement pour concentrer les flux piétons et limiter les entrées d'eaux par ces points spécifique pourrait être menée. Dans le cadre de cette étude, aucune modification des usages n'est envisagée.

Dans la mesure où la mise en place d'un muret est retenue au niveau de la protection en enrochements (de part et d'autre des escaliers), l'action privilégiée pour limiter les entrées d'eau concerne la mise en œuvre de batardeaux.

La Figure 65 illustre cette protection de premier rang : muret + batardeaux.



Figure 65. Exemple d'intégration schématique de la solution « muret + batardeau » au niveau de la zone 3 (Source : Youtube©).

Il est à noter que lors de la tempête Eleanor, des matelas liés permettant de limiter les débits franchissant ont été mis en place au niveau de certains escaliers (Figure 54). Cette protection légère n'a pas donné satisfaction (non stables).

7.1.2.2. Cales de mise à l'eau

Il existe trois cales de mise à l'eau le long du secteur à l'étude : la cale Nord, la cale de la Vigie et la cale de Coudeville. Chacune d'entre elle fait l'objet d'un traitement spécifique.

La cale Nord dispose d'un accès à hauteur de la protection en enrochements (+ 9,80 m NGF). Il s'agit d'un point d'entrée d'eau significatif car c'est l'un des secteurs les plus exposés à la houle. En considérant la mise en place d'un muret de part et d'autre de la cale, l'action préconisée pour limiter les entrées d'eau concerne la mise en œuvre de batardeaux. Une autre solution, déjà mise en œuvre actuellement, pourrait consister en la mise en place de blocs bétons (Figure 66).

Comme évoqué en section 6.3, l'accès à la cale de la Vigie est la principale entrée d'eau à l'échelle de l'ensemble du secteur à l'étude. Sa topographie basse (+ 9,10 m NGF) fait de cet accès un point d'écoulements privilégiés. Deux typologies d'actions sont envisagées :

- Protéger des entrées d'eau venant de la cale : pour cela, la réalisation d'un aménagement significatif de la cale de la Vigie est considérée dans la suite de l'étude. Pour exemple, les typologies d'intervention suivantes peuvent être envisagées :

- La mise en place de blocs béton tel que réalisé actuellement au niveau de la cale Nord et la cale de la Vigie (Figure 66) ;
 - La continuité du muret au niveau de la protection en enrochements permettant la mise en place de batardeaux ;
 - Un réagencement global permettant une continuité topographique dans la protection en enrochements (associé à une déconstruction de la cale de mise à l'eau) ;
- Limiter les arrivées d'eau venant de la promenade par la mise en place de batardeaux de part et d'autre de la cale.



Figure 66. Blocs béton mis en place au niveau de la cale Nord (gauche) et de la cale de la Vigie (Droite) (Source : Google Street View).



Figure 67. Vue de la cale de la Vigie (Date : 15/11/2022).

La cale de Coudeville bénéficie d'un niveau haut (+ 10,75 m NGF) et d'une concentration des écoulements grâce à la présence des perrés de soutènement de part et d'autre. La concentration de ces écoulements permet de traiter plus facilement la problématique de franchissements. Etant donné le peu de franchissements relevés pour les cas de projet, la mise en place de blocs béton tel que réalisée sur d'autres secteurs apparait suffisante. Un batardeau amovible pourrait aussi être envisagé (mais plus couteux).



Figure 68. Vue de la cale de Coudeville (Source : Google Street View).

7.1.3. Limiter les entrées d'eau par les accès terrestres

Les 25 accès identifiés en section 5.2.5.3 peuvent en théorie faire l'objet d'un traitement pour limiter le risque submersion. Néanmoins, étant donné la diversité de géométrie (largeur, niveau topographique) et d'exposition au risque submersion, un traitement spécifique à chacun d'entre eux et réparti dans le temps est préconisé.

Sans intervention sur l'ouvrage de premier rang en enrochements, cette solution de protection des accès ne peut être envisagée à elle seule au niveau des zones 1, 2 et 3. En effet, à la vue des volumes de franchissements à horizon 2070 et de l'hétérogénéité de protection des habitations (Figure 69), limiter la submersion uniquement via les accès pourrait mettre en péril les habitations. De plus, agir sur l'ouvrage de protection en enrochements de premier rang permet de casser la dynamique de la houle.

Au niveau de la zone 4, les franchissements étant plus limités et les habitations globalement mieux protégées, selon l'horizon à laquelle on souhaite se placer, une protection uniquement via les accès sans rehausser les enrochements peut être envisagée.



Figure 69. Hétérogénéité de protection des habitations de premier rang au niveau des zones 2 et 3 (date : 25/02/2021).

De manière préliminaire les accès identifiés comme prioritaires sont situés dans l'axe de la rue des Moulières, de la rue Georges Delalande et des Goulottes (Figure 70). Techniquement, la mise en œuvre de batardeaux amovibles est préconisée. Une réflexion sur l'impact que cela peut avoir sur les usages devra être menée (secours, piétons, riverains, ...). La rue de Goulottes bénéficie déjà d'un muret permettant de casser la dynamique des franchissements, cela pourrait être complété par un batardeau.



Figure 70. Vue des accès vulnérables en zone 1 et 2.

Enfin, aucun traitement n'est envisagé au niveau de la dune sableuse qui fait office de protection de second face au camping Municipal (zone 5). En l'état les entrées d'eau sont faibles, néanmoins étant donné les débits de franchissements des problématique d'érosion sont à craindre.



Figure 71. Dune au niveau de la zone 5 (date : 15/11/2022).

7.2. MODELISATION DE LA SOLUTION D'AMÉNAGEMENTS

7.2.1. Résultats de modélisation

La stratégie de protection de Saint-Martin-de-Bréhal se concentre sur les cas 1 et 2 afin de répondre à l'objectif de projet. Les résultats de l'approche PPR sont donnés pour information.

Les partis pris techniques retenus se concentrent donc au niveau des zones 1, 2 et 3 :

- Mise en place d'un muret de 1,20 m de haut en crête de protection en enrochements ;
- Mise en place de batardeaux au niveau des escaliers et de la cale Nord ;
- Réalisation d'un aménagement conséquent permettant de limiter les franchissements par paquets de mer au niveau de la cale de la Vigie ;
- Mise en place de batardeaux au niveau de la promenade, de part et d'autre de la cale de la Vigie.

Dans le cadre de cette modélisation, aucun aménagement n'est pris en compte au niveau des accès terrestres. Ces derniers bénéficient de la réduction des entrées d'eau grâce à la mise en œuvre du muret.

La protection de premier rang « muret + batardeaux » est prolongée au niveau de la zone 4. Cela a un impact limité sur l'objectif de projet mais permet de donner une indication sur les bénéfices d'un tel aménagement à plus long terme.

Ces interventions sont prises en considération en modifiant la paramétrisation de l'ouvrage dans les formules de l'Eurotop II et en modifiant le modèle d'écoulement afin de prendre en compte des aménagements spécifiques de type batardeaux de part et d'autre de la cale de la Vigie.

Les volumes et emprises de submersions et sont présentés en Figure 72, Figure 73 et Figure 74.

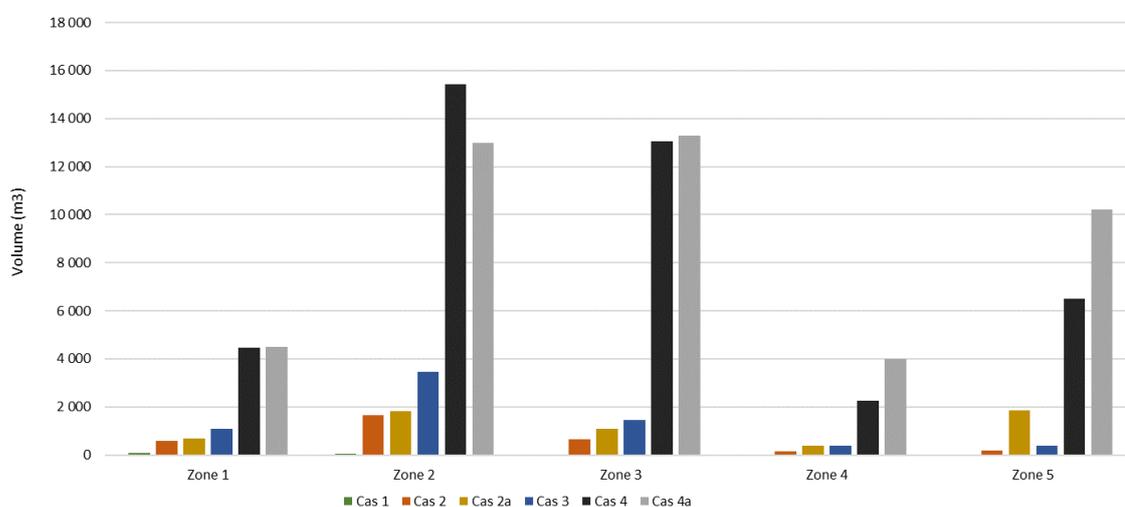


Figure 72. Volumes de submersion par zone et par cas avec la solution d'aménagements.



Figure 73. Hauteurs d'eau maximales pour les différents cas 1, 2 et 2a avec aménagements.

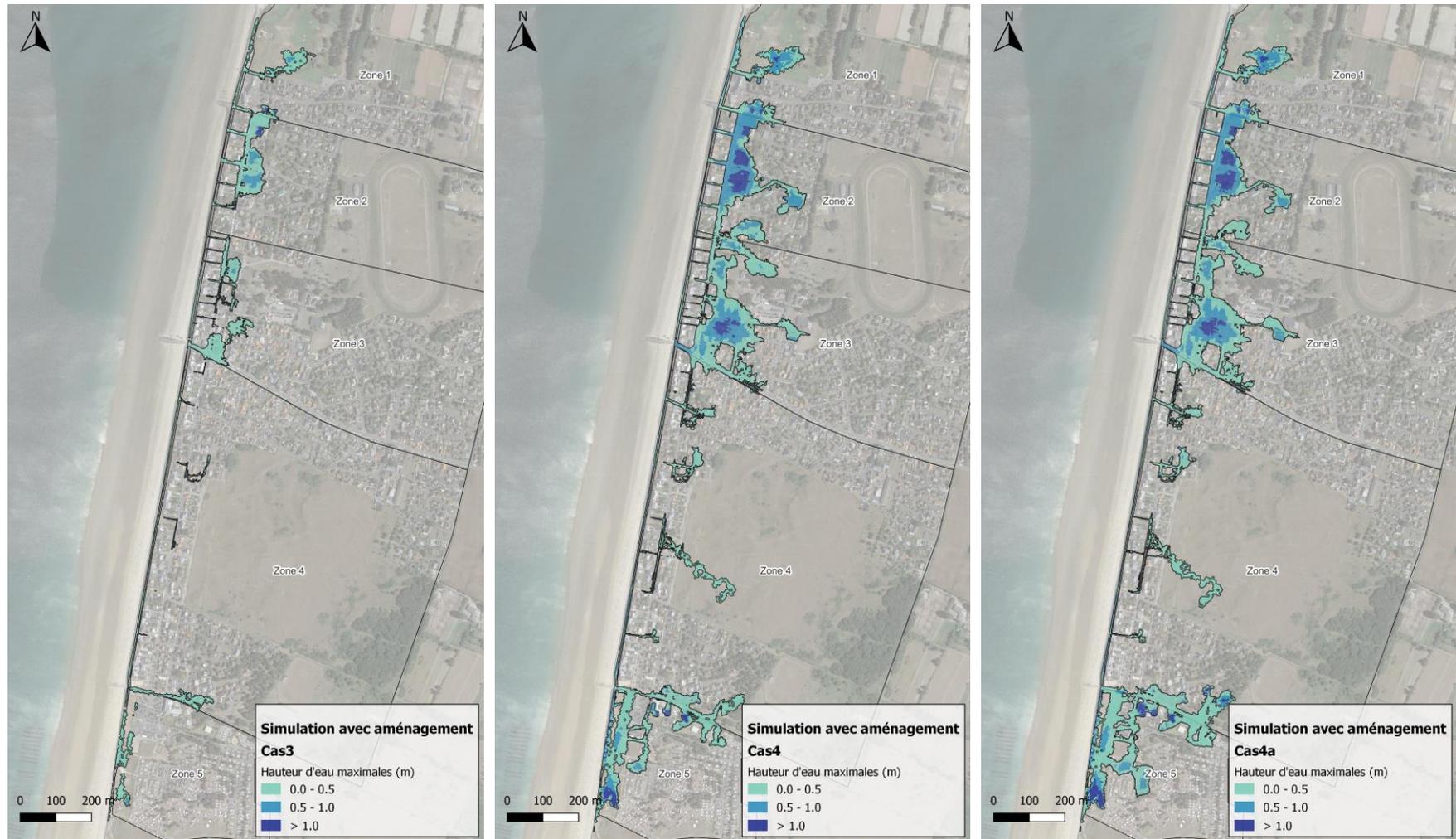


Figure 74. Hauteurs d'eau maximales pour les différents cas 3, 4 et 4a avec aménagements.

7.2.2. Analyse des résultats

7.2.2.1. Réponse à l'objectif de projet

Pour faciliter l'analyse des résultats et répondre à l'objectif de projet, les emprises et volumes de submersion du cas 1 actuel et du cas 2 avec aménagements sont rappelés en Figure 75 et Figure 76.



Figure 75. Emprises de submersion pour le cas 1 actuel et le cas 2 avec aménagements.

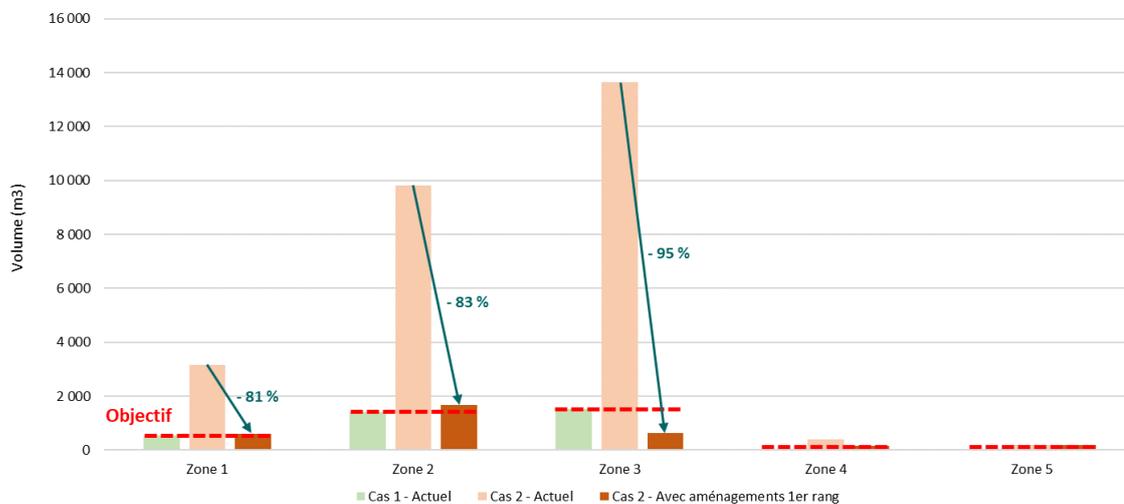


Figure 76. Volumes de submersion pour les cas 1 et 2 actuels et le cas 2 avec aménagements.

Sur la base de ces résultats, les observations suivantes peuvent être effectuées :

- Une réduction des volumes de franchissements de l'ordre de 90 % est relevée entre le cas 2 actuel et le cas 2 avec aménagements ;
- Avec la mise en œuvre des aménagements de premier rang (muret + batardeaux) au niveau des zones 1, 2 et 3 associés à ceux au niveau de la cale de la Vigie, **la dynamique de submersion et l'emprise finale du cas 2 aménagé permettent globalement de répondre à l'objectif de projet**. Les aménagements considérés sur ces zones donnent donc satisfaction ;
- Les volumes de submersion sont en lignes entre le cas 1 actuel et le cas 2 aménagé sur la majeure partie du secteur à l'étude. Quelques évolutions sont tout de même relevées :
 - Une tendance à la baisse est notée au niveau de la zone 3 grâce à l'aménagement de la cale de la Vigie ;
 - Sans aménagements au niveau de la cale de Coudeville, des entrées d'eau plus significatives sont relevées à horizon 2070. La mise en place de blocs bétons, tels que déjà mis en œuvre actuellement sur les autres cales, est préconisée afin de bloquer ces écoulements.
- Au niveau de la promenade, les volumes de franchissements pour le cas 2 restent significatifs avec les aménagements. Or ces derniers ont pour conséquence de concentrer les volumes d'eau entre le muret et les maisons de première ligne. La bonne gestion du ressuyage est donc d'autant plus importante (non étudiée dans le cadre de cette étude) ;

7.2.2.2. Réponse à plus long terme

Pour faciliter l'analyse des cas non intégrés à l'objectif de projet et se projeter à plus long terme, les volumes de submersion des cas actuel et avec aménagements sont rappelés en Figure 77.

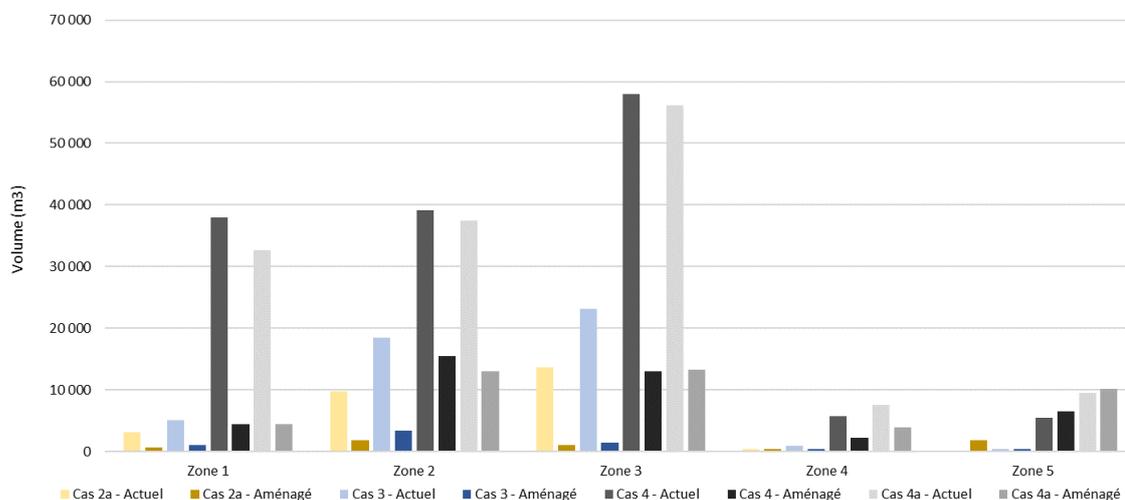


Figure 77. Volumes de submersion pour les cas 2a, 3, 4 et 4a actuels et avec aménagements.

Sur la base de ces résultats et des emprises de submersion, les observations suivantes peuvent être effectuées :

- Sur ces différents cas, une réduction moyenne des volumes de franchissements de l'ordre de 60 % est relevée avec la mise en œuvre d'aménagements. Malgré la présence de ces solutions de protection et pour l'ensemble de ces cas (cas 2a, 3, 4, 4a), le risque submersion reste supérieur à ce qui a pu être relevé pour la tempête Eleanor ;
- Etant donné que le cas 2a (identique au cas 2 avec un niveau de sable abaissé) ne permet pas de répondre à l'objectif de projet, cela implique que le niveau de sable doit aussi être intégré à la

stratégie de protection. Un suivi de ce niveau de sable est préconisé et peut être intégré à la surveillance du littoral déjà menée dans le cadre de l'observatoire départementale du littoral ;

- A la différence des cas 2 et 3 (section 7.2.2.1), la mise en œuvre du muret au niveau de la zone 4 a un impact significatif pour l'évènement PPRL à horizon 2100 (cas 4 et 4a). Ainsi, pour ce secteur, deux typologies d'intervention peuvent donc être envisagées :
 - Pour une intervention légère à moyen terme, une simple protection des accès est préconisée ;
 - Pour une intervention conséquente à plus long terme, la mise en œuvre d'un muret est préconisée.

7.3. PRECONISATIONS D'INTERVENTION

Il ressort de cette analyse :

- La priorisation des interventions au niveau des zones 1, 2, 3 pour répondre à l'objectif de projet ;
- Des pistes de réflexion sur les interventions potentielles à mener à plus long terme sur les zones 4 et 5 (hors objectif de projet).

7.3.1. Réponse à l'objectif de projet

Les zones 1, 2 et 3 sont les plus impactées par les franchissements par paquets de mer. Les interventions prioritaires portent donc sur ces zones :

- Mise en œuvre d'un muret en crête de protection en enrochements associé à des batardeaux au niveau des escaliers et de la cale Nord. Une coupe de principe du muret est proposée en Figure 78. Il s'agit d'un muret d'une hauteur de 1,20 m disposant d'une géométrie chasse-mer et de barbacanes permettant d'assurer une partie du ressuyage. Un dimensionnement dans les règles de l'art sera à réaliser dans les phases d'étude ultérieures en prenant en considération la stabilité globale de la protection en enrochements et les problématiques de ressuyage ;
- Réalisation d'un aménagement au niveau de la cale de la Vigie. Les différentes possibilités exposées en section 7.1.2.2 sont envisageable selon l'ambition de la protection : mise en place de blocs béton, continuité de la protection de premier rang « muret + batardeau » ou reprise généralisée de la cale de la Vigie.

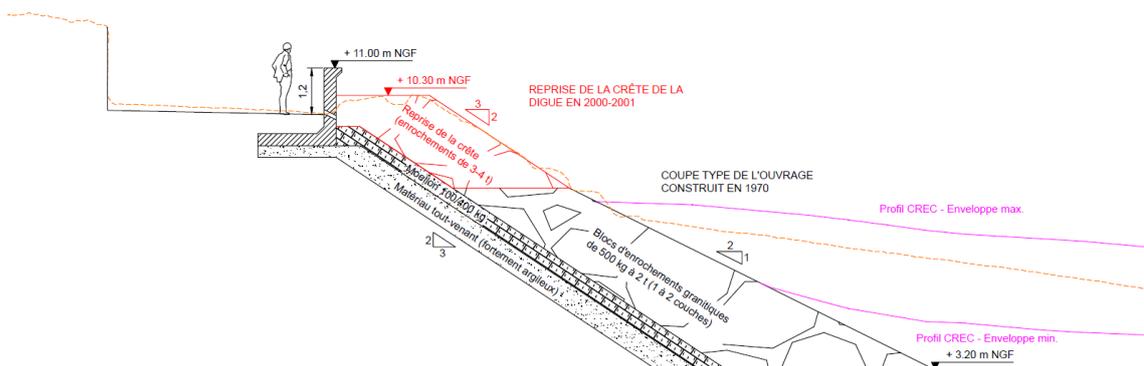


Figure 78. Coupe de principe pour la mise en œuvre d'un muret en haut de protection en enrochements.

Pour la cale de Coudeville, comme évoqué en section 7.2.2.1, malgré le fait que le risque submersion soit limité, la mise en place de blocs béton aura un impact significatif pour un coût limité. Cela permet de régler en quasi-totalité la problématique d'entrées d'eau au niveau de cette zone.

Une estimation financière préliminaire des interventions prioritaires est proposée dans le Tableau 15.

Tableau 15. Estimation financière des interventions prioritaires.

Désignation	Unité	Quantité	Prix Unitaire €HT/u	Prix €HT
Muret "chasse mer" (Zone 1, 2 et 3)	ml	800,00	2 450,00	1 960 000,00
Batardeau (Zone 1, 2 et 3)	Ft	7,00	7 500,00	52 500,00
Reprise généralisée de la cale de la Vigie	Ft	1,00	285 000,00	285 000,00
Total travaux hors frais généraux et aléas				2 297 500,00
Frais généraux 10 %				229 750,00
Aléas et incertitudes 20 %				459 500,00
Total travaux				2 986 750,00

Le coût estimatif préliminaire des aménagements pour répondre à l'objectif de projet est de l'ordre de **3,0 M € HT**. La mise en œuvre de blocs béton au niveau de la cale de Coudeville n'est pas considérée puisque déjà effectué en interne au niveau de la commune. Le coût des études de maîtrise d'œuvre est estimé à environ 225 000 € HT.

Ces interventions prioritaires sont matérialisées en plan sur la Figure 79.

7.3.2. Réponse à plus long terme (hors objectif)

Les différentes modélisations réalisées dans le cadre de cette étude permettent de se projeter sur des événements importants à plus long terme (prise en considération de l'élévation du niveau de l'océan due au dérèglement climatique et abaissement du niveau de sable).

En complément des interventions prioritaires préconisées dans la section 7.3.1 et selon le budget alloué et l'échéance à laquelle l'on souhaite se porter, deux options sont proposées (hors objectifs de projet) :

- Interventions légères à moyen terme :
 - Zone 1 et 2 : mise en œuvre de batardeaux au niveau des accès terrestres les plus vulnérables (rue des Moulières, rue Georges Delalande et rue des Goulottes) ;
 - Zone 4 : mise en œuvre de batardeaux au niveau des accès terrestres à réaliser au fil du temps en fonction des futurs retours d'expériences.
- Intervention conséquente à plus long terme :
 - Zone 1 et 2 : mise en œuvre de batardeaux au niveau des accès terrestres les plus vulnérables (rue des Moulières, rue Georges Delalande et rue des Goulottes) ;
 - Zone 4 : mise en œuvre de la protection de premier rang « muret + batardeaux ».

Les estimations financières préliminaires de ces interventions non intégrées aux objectifs de projet sont proposées dans les tableaux suivants.

Tableau 15. Estimation financière des interventions hors objectifs de projet – Interventions légères à moyen terme.

Désignation	Unité	Quantité	Prix Unitaire €HT/u	Prix €HT
Batardeau au niveau des accès (Zone 1, 2 et 4)	Ft	9,00	7 500,00	67 500,00
Total travaux hors frais généraux et aléas				67 500,00
Frais généraux 10 %				6 750,00
Aléas et incertitudes 20 %				13 500,00
Total travaux				87 750,00

Tableau 16. Estimation financière des interventions hors objectifs de projet – Interventions conséquentes à plus long terme.

Désignation	Unité	Quantité	Prix Unitaire €HT/u	Prix €HT
Batardeau au niveau des accès (Zone 1 et 2)	Ft	3,00	7 500,00	22 500,00
Muret "chasse mer"	ml	940,00	2 450,00	2 303 000,00
Batardeau au niveau des escaliers	Ft	5,00	7 500,00	37 500,00
Total travaux hors frais généraux et aléas				2 363 000,00
Frais généraux 10 %				236 300,00
Aléas et incertitudes 20 %				472 600,00
Total travaux				3 071 900,00

Les coûts estimatifs préliminaires de ces aménagements sont détaillés en suivant :

- Interventions légères à moyen terme :
 - Montant des travaux de l'ordre de 90 000 € HT ;
 - Montant des études de maîtrise d'œuvre de l'ordre de 6 500 € HT ;
- Intervention conséquente à plus long terme :
 - Montant des travaux de l'ordre de 3 000 000 € HT ;
 - Montant des études de maîtrise d'œuvre de l'ordre de 230 000 € HT ;

Ces propositions d'interventions légères et conséquentes sont matérialisées en plan sur la Figure 79.

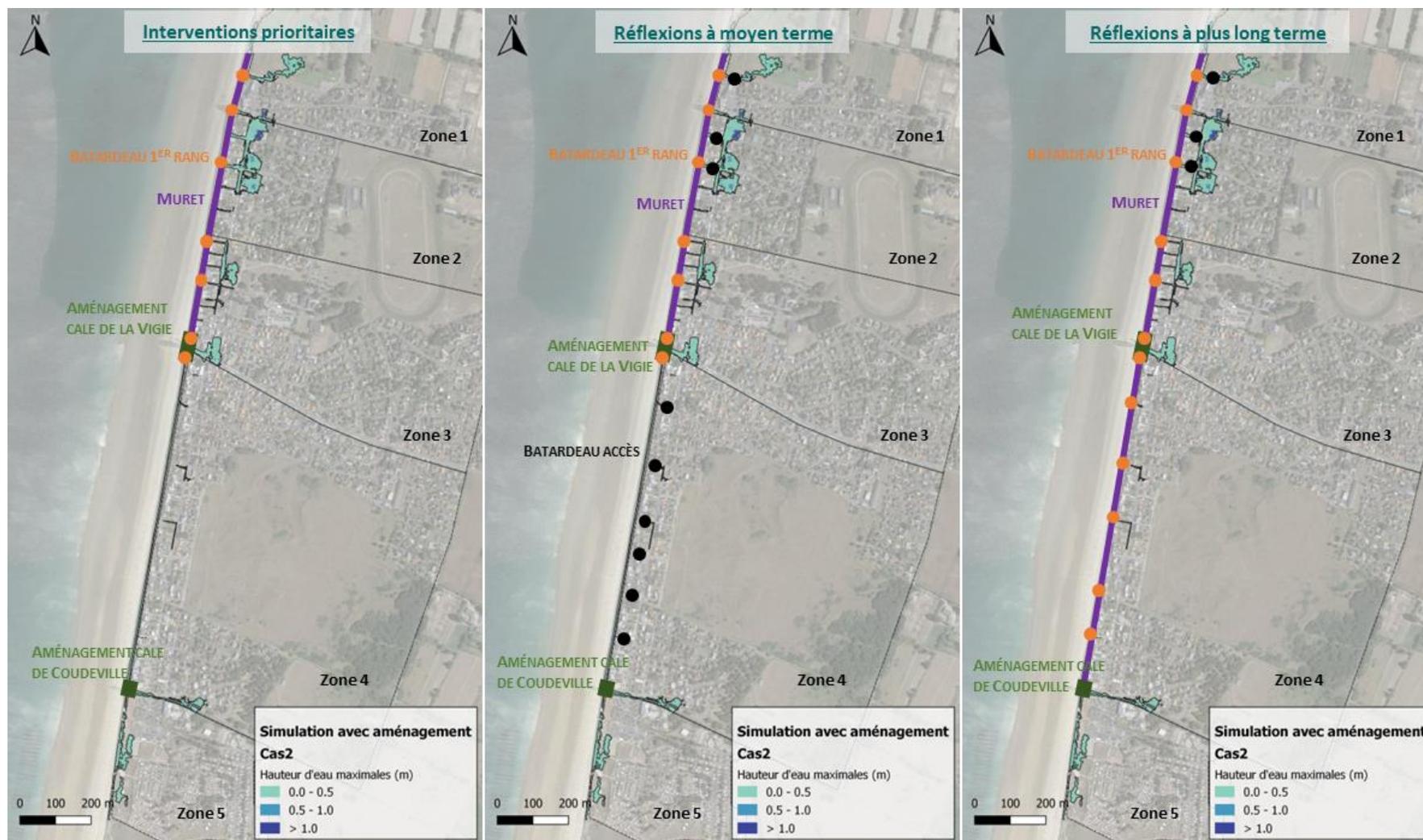


Figure 79. Préconisations d'interventions prioritaires et réflexions à moyen et long terme.

8. SYSTEME D'ENDIGUEMENT POTENTIEL

8.1. RAPPEL REGLEMENTAIRE SUR LA DEFINITION DES SYSTEMES D'ENDIGUEMENT ET LA NOTION DE DIGUE

Le décret digues de 2015 introduit la notion de système d'endigement. L'article R214-113 du Code de l'Environnement, modifié par le décret n°2019-895 du 28 août 2019-art.2, définit des classes de systèmes d'endigement à partir de la population protégée par le système d'endigement. À noter, que la notion de hauteur d'ouvrage est toujours présente. Les trois classes sont présentées dans le Tableau 17.

Tableau 17. Classes de systèmes d'endigement selon la population à protéger (d'après l'article R214-113 (CE) modifié par le décret n°2019-895 du 28 août 2019-art.2).

CLASSE	POPULATION PROTEGEE par le système d'endigement ou par l'aménagement hydraulique
A	Population > 30 000 personnes
B	Entre 3 000 et 30 000 personnes
C	Population ≤ 3 000 personnes si le système d'endigement comporte essentiellement une ou plusieurs digues établies antérieurement à la date de publication du décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques ou, pour les autres systèmes d'endigement : 30 personnes ≤ Population ≤ 3 000 personnes

« La population protégée correspond à la population maximale exprimée en nombre d'habitants qui résident et travaillent dans la zone protégée, en incluant notamment les populations saisonnières. »

« La classe d'une digue est celle du système d'endigement dans lequel elle est comprise. N'est toutefois pas classé la digue dont la hauteur, mesurée verticalement entre le sommet de l'ouvrage et le terrain naturel du côté de la zone protégée à l'aplomb de ce sommet, est inférieure à 1.5 mètre, à moins que la commune ou l'établissement public de coopération intercommunale à fiscalité propre compétent pour la prévention des inondations le demande. »

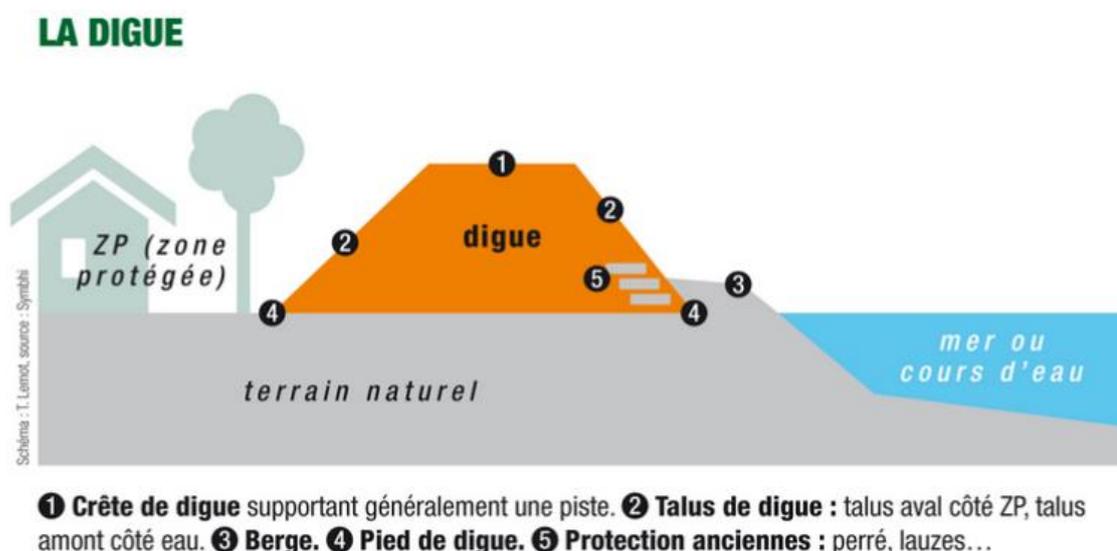


Figure 80. Schéma de la structure d'une digue (Sc. France Digue).

La notion de digue est aussi présentée par l'association France digue de la manière suivante :

« Une digue est un ouvrage réglementé soumis à autorisation, à travers son appartenance à un système d'endigement (décret 2015-526 du 12 mai 2015 dit "décret digues"). C'est une des solutions, très

répandue en France (une commune sur deux concernée), pour faire face au risque d'inondation. Ce sont des ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions. »

« Selon la loi : « Les digues sont des ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions » (article L566-12-1 du Code de l'Environnement). »

« Une digue de défense contre les inondations ou submersions est un ouvrage linéaire, **en surélévation par rapport au terrain naturel**, faisant partie d'un ensemble plus global nommé système d'endiguement (SE). Elle permet, avec les autres structures identifiées dans ce système, et/ou en s'appuyant sur des éléments naturels de protéger des zones inondables des inondations et de la submersion. »

8.2. CAS DE L'OUVRAGE EN ENROCHEMENTS DE SAINT-MARTIN DE BREHAL

Une analyse topographique de l'ouvrage en enrochements a été réalisée sur l'ensemble du linéaire. Une série de coupes type de l'ouvrage au droit des profils de suivi de l'Observatoire Départementale (SW80, SW81, SW82, et SW83) est présentée sur la Figure 81, et une coupe longitudinale est présentée en Figure 82. Les données topographiques sont issues du levé drone réalisé en mai 2022.

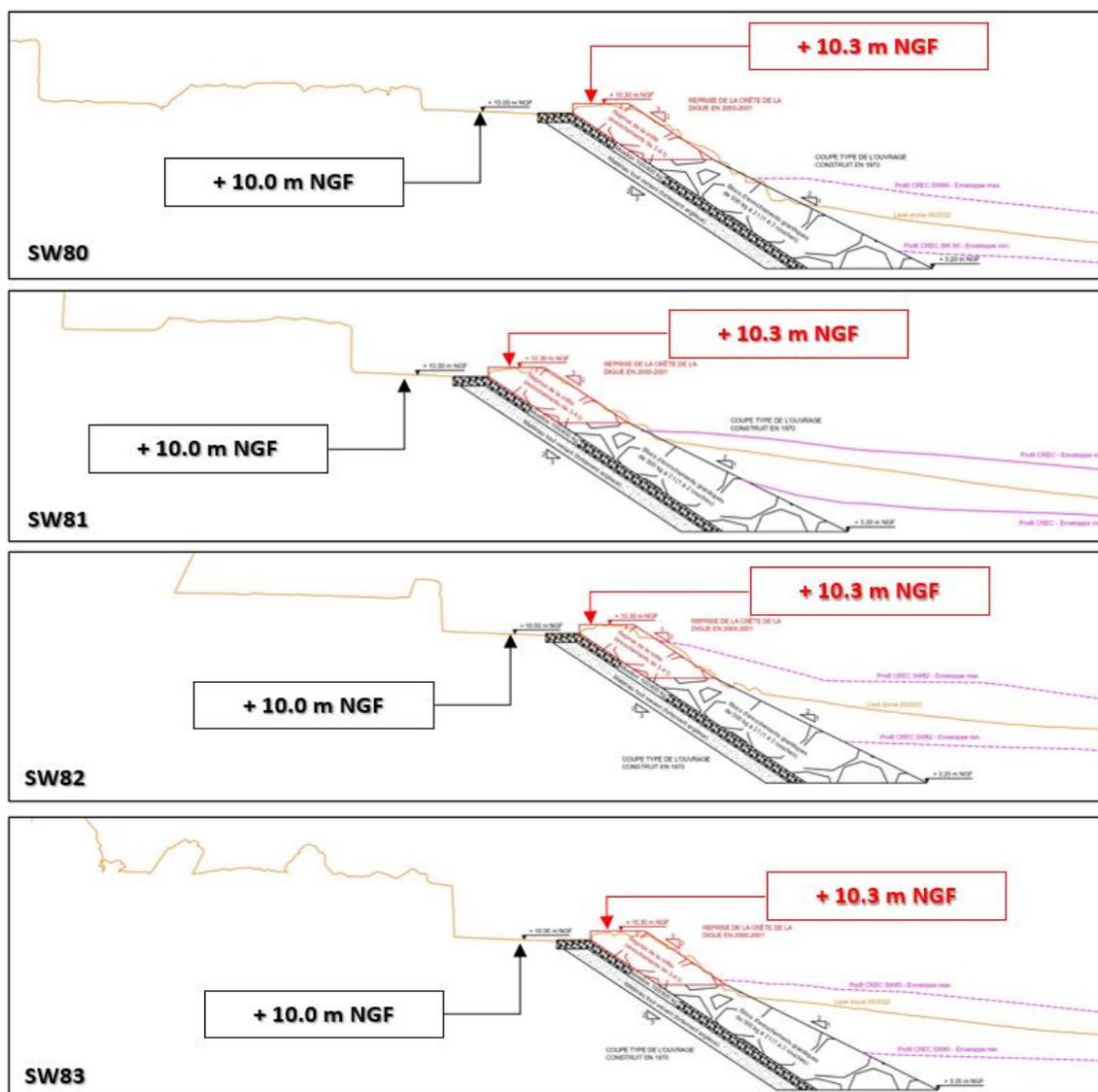


Figure 81. Coupes types de l'ouvrage et du terrain naturel à l'arrière au niveau des profils de l'Observatoire du littoral Manchois (SW80, SW81, SW82 et SW83).

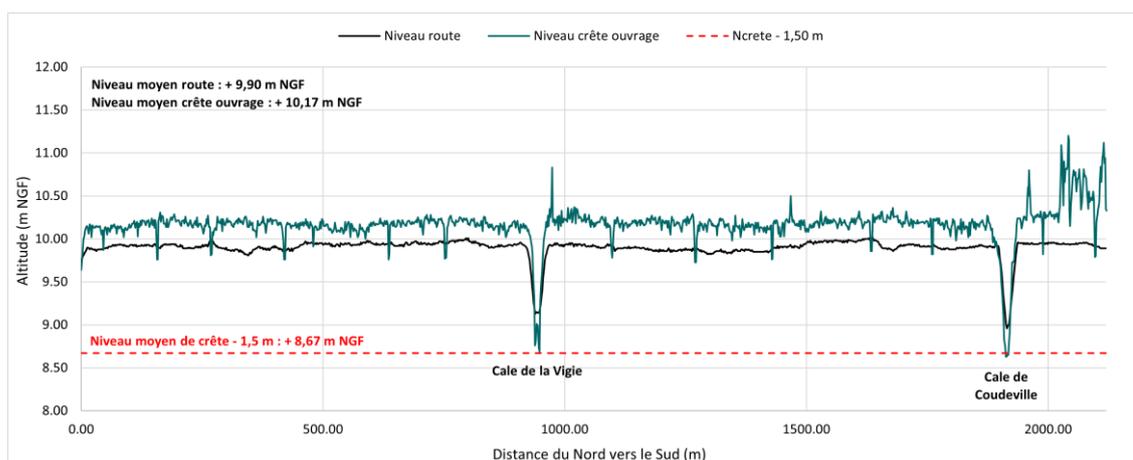


Figure 82. Coupe longitudinale de l'ouvrage au niveau de la crête (ligne verte), au niveau du terrain naturel en arrière (ligne noire), et position potentiel du terrain naturel en cas de digue anti-submersion (ligne en tiret rouge).

Les données permettent de conclure que le niveau moyen de la crête de l'ouvrage se situe à la cote +10.17 m NGF alors que l'altimétrie du terrain naturel à l'arrière de l'ouvrage se situe environ 30 cm en dessous, soit à la cote +9.9 m NGF. La hauteur minimale de 1.30 m permettant de définir une digue de protection contre la submersion et l'inondation n'est donc pas respectée.

Par ailleurs l'altimétrie moyenne du terrain naturel a été considérée au niveau de la piste cyclable située directement à l'arrière de la crête de l'ouvrage. Il est important d'indiquer, qu'à l'exception des principales voies d'accès à la plage (cales de mise à l'eau), le terrain naturel augmente vers l'Est et est situé au-dessus de la crête de l'ouvrage en enrochement (vestige du cordon dunaire urbanisé).

Dans ces conditions, l'ouvrage en enrochements de Saint-Martin de Bréhal ne peut être considéré comme une digue de protection contre la submersion marine. Son rôle premier est la fixation du trait de côte et la protection des enjeux urbain de premier rang face au recul du littoral. En l'état, la déclaration en système d'endiguement ne semble pas adaptée.

Néanmoins, les résultats obtenus dans les sections précédentes mettent en avant un sous-dimensionnement de l'ouvrage face aux franchissements par paquet de mer et une problématique de ressuyage des eaux marines dans le tissu urbain. Ainsi, afin de fournir un maximum d'information à la collectivité, la caractérisation de la dangerosité des écoulements en zone urbaine est analysée dans la section suivante.

8.3. CARACTERISATION DE LA DANGEROSITE DES ECOULEMENTS EN ZONE URBAINE

8.3.1. Méthodologie

Afin de caractériser la dangerosité des écoulements en zone urbaine, la méthodologie suivante a été appliquée :

- Caractérisation de l'aléa par le calcul des venues d'eau représenté par les cartes fournis en Annexe 2. Les venues d'eau permettent de catégoriser l'aléa de la manière suivante (Tableau 18) :
 - **Aléa Faible (en vert)** : les parties de territoires susceptibles d'être affectées par des **venues d'eau non dangereuses**, avec une hauteur d'eau maximale inférieure à 50 cm et une vitesse d'écoulement maximale inférieure à 0,2m/s. Les zones où la hauteur d'eau est inférieure à moins de 1 centimètre ne sont pas prise en compte ;
 - **Aléa Moyen (en bleu clair)** : les parties de territoires susceptibles d'être affectées par des **venues d'eau peu dangereuses**, avec soit une hauteur d'eau maximale comprise entre 50 cm et 1 m et

une vitesse d'écoulement maximale inférieure à 0,5 m/s soit une hauteur d'eau maximale inférieure à 50 cm et des vitesses d'écoulement comprises entre 0,2 et 0,5 m/s ;

- **Aléa fort (en bleu foncé et en jaune)** : les parties de territoires susceptibles d'être affectées par des **venues d'eau dangereuses**. Sont réputées dangereuses les venues d'eau avec des hauteurs d'eau atteignant au moins 1 mètre ou avec des vitesses d'écoulement d'au moins 0,5 mètre par seconde ;
- **Aléa très fort (en orange)** : les parties de territoires où les **venues d'eau peuvent être particulièrement dangereuses** en raison de l'existence de points bas ou d'un « effet cuvette » ou de l'existence d'une **zone de dissipation d'énergie importante**.

Tableau 18. Catégorisation de l'aléa inondation.

Vitesse (m/s) / Hauteur (m)	$V \leq 0,2$	$0,2 < V \leq 0,5$	$V > 0,5$
$H \leq 0,5$	Faible	Moyen	Fort 1
$0,5 < H \leq 1$	Moyen	Moyen	Fort 1
$H > 1$	Fort 2	Fort 2	Très Fort

- Estimation des vitesses de remplissage et des hauteurs maximales d'eau atteintes dans les cuvettes topographiques les plus importantes ;
- Estimation des surfaces d'inondation en fonction de la catégorie de l'aléa pour les 5 zones urbaines ;
- Estimation du nombre de personne présent dans les zones inondées avec différenciation des enjeux économiques et privés et dénombrement des logements sans étage. L'estimation du nombre de personne par logement est obtenue à partir des données de l'INSEE 2019, et du nombre de personnes pour les enjeux économiques à partir de la base de données SIRENE. L'ensemble des éléments cartographiques sont présentés en Annexe 3.

Dans les parties suivantes, les résultats sont présentés pour les trois scénarios permettant de répondre aux objectifs de l'étude : cas 1 (Eleanor 2018) sans aménagement et cas 2 (événement type Eleanor en 2070) avec et sans aménagement. L'ensemble des calculs ont néanmoins été estimé pour tous les scénarios de modélisation. Les résultats sont présentés dans les tableaux de synthèse en Annexe 4.

8.3.2. Vitesse de remplissage et hauteur d'eau

Afin de caractériser les vitesses de remplissage et les hauteurs d'eau atteintes dans les principales cuvettes topographiques, plusieurs séries temporelles de niveau d'eau ont été extraites à partir des 3 cas de simulation précité. Les résultats sont présentés en Figure 83.

De manière générale, les vitesses de remplissage et les hauteurs maximales sont nettement supérieures pour le cas 2 sans aménagement. Les vitesses peuvent atteindre jusqu'à 85 cm/h pour des hauteurs d'environ 1.5 m d'eau. À l'exception du point 3 où le ressuyage des eaux est amorcé, le niveau d'eau ne diminue pas après le pic de tempête et l'étalement de haute mer. Ce dernier point est commun aux 3 cas de simulation.

En situation actuelle ou en situation aménagée en 2070, un événement de type Eleanor engendre des vitesses de remplissage beaucoup plus faibles, comprises entre 7 et 47 cm/h. De manière analogue, les hauteurs d'eau dans les cuvettes sont plus faibles et inférieures à 60 cm. Par ailleurs, les résultats similaires obtenus entre le cas 1 et le cas 2 avec aménagements, mettent en avant l'efficacité des aménagements prévus en termes de protection des enjeux.

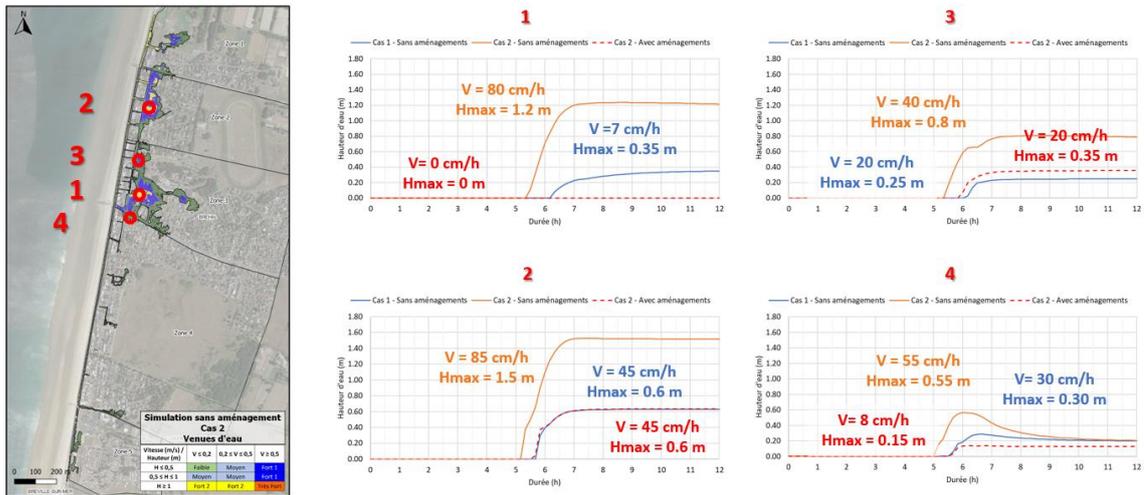


Figure 83. Vitesses de remplissage et hauteurs maximales atteintes sur 4 points sensibles pour le cas 1 (bleu), le cas 2 sans aménagement (orange), et le cas 2 avec aménagements (rouge pointillé).

8.3.3. Emprise au sol et dangerosité

L'analyse de la dangerosité des écoulements et de leurs emprises au sol est investiguée à partir des cartographies de venues d'eau pour les 3 cas de simulation présentés en Figure 84.

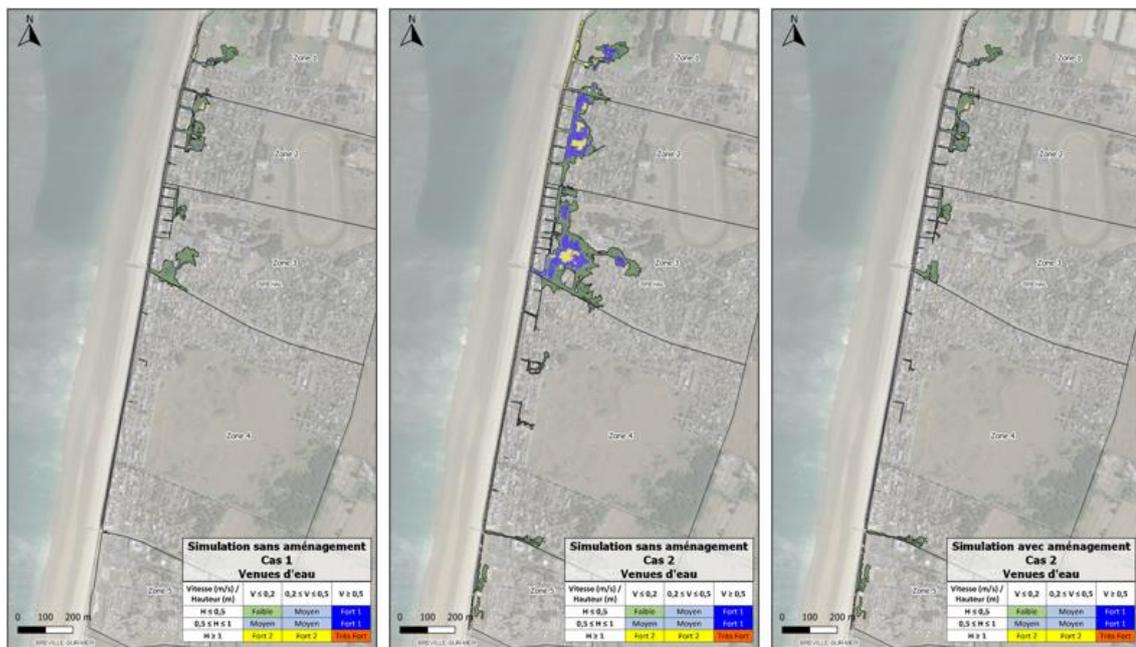


Figure 84. Cartes des venues d'eau pour les simulations de cas 1, et de cas 2 avec et sans aménagement.

A partir de ces données, le pourcentage de surface d'emprise pour chaque catégorie d'aléa et en fonction des 5 zones du domaine d'étude est estimé et présenté en Figure 85.

Pour le cas 1, 95 % de la surface des zones inondées correspondent à un aléa de type faible (87%) ou moyen (8%). Les 5% de surface qui correspondent à un aléa plus important et potentiellement dangereux pour la population concernent principalement les zones 1 à 3 au nord pour une surface totale de 1 200 m². La zone d'aléa très fort concerne une surface de 1%.

Pour le cas 2 sans aménagement, les zones concernées par un aléa faible ou moyen sont moins étendues et de l'ordre de 65.5 % de la surface totale (60% pour l'aléa faible, 5.5% pour l'aléa Moyen). De manière similaire, les venues d'eau plus dangereuses (aléa fort à très fort) sont concentrées sur les zones 1 à 3,

pour une surface totale de 34.5% soit 29 000 m². 26% de la surface inondée est concernée par un aléa fort dû aux vitesses d'écoulement supérieures à 0.5 m/s.

Pour le cas 2 avec aménagements, les résultats sont similaires à ceux obtenus pour le cas 1. La majorité de la surface inondée est concernée par un aléa faible à moyen sur 95 % de la surface totale (88% pour l'aléa faible, 7% pour l'aléa Moyen). Les 5% de surface qui correspondent à un aléa plus important et potentiellement dangereux pour la population concernent principalement les zones 1 à 3 au nord pour une surface totale de 1 300 m². La zone d'aléa très fort concerne une surface de 1%.

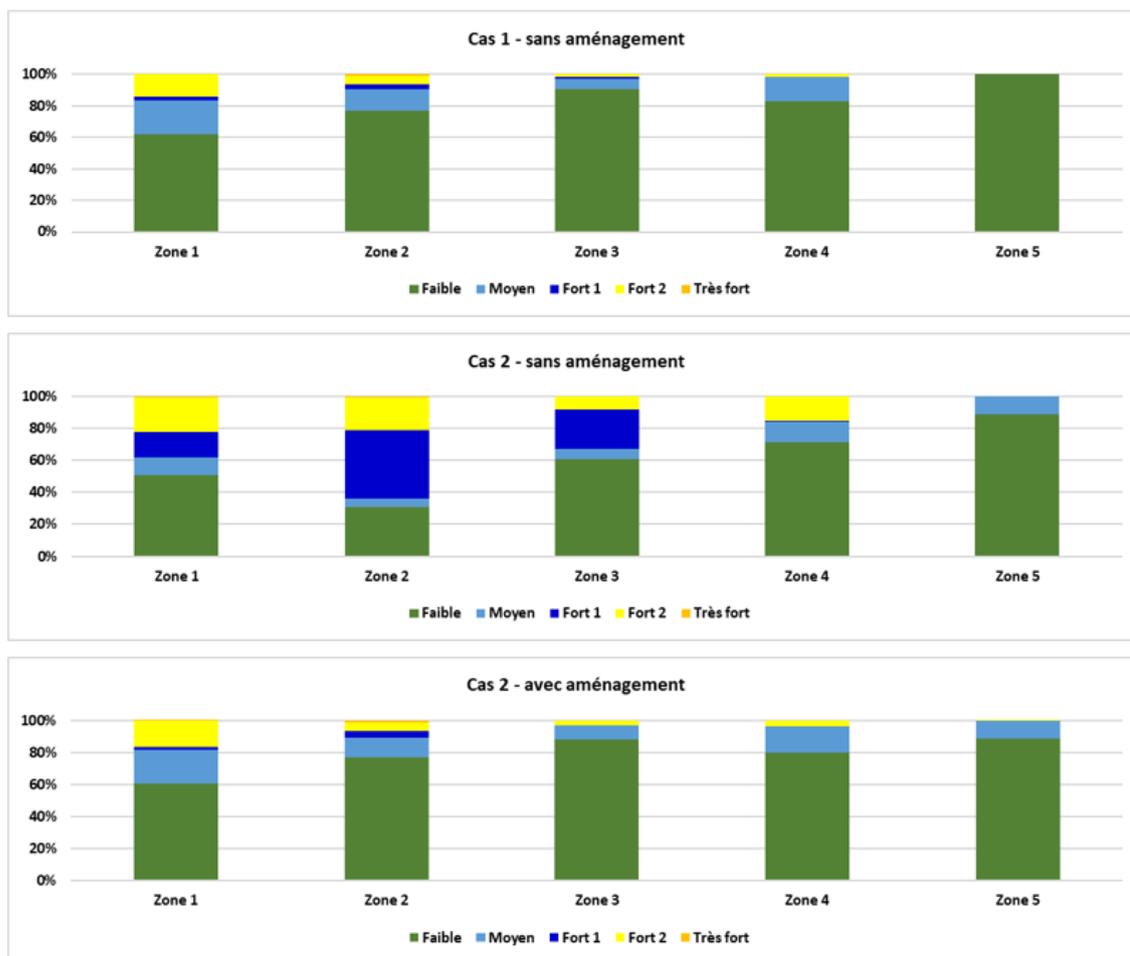


Figure 85. Analyse statistique de la couverture des différentes catégories d'aléa pour les 5 zones du site d'étude.

8.3.4. Enjeux humains

Un traitement géomatique a été réalisé afin de compter les enjeux en contact avec les zones inondées.

Pour le calcul des enjeux impactés, les données suivantes ont été utilisées :

- Population : croisement de la BD topo 2022 pour le bâti et les données INSEE 2019. Cette donnée recense la population par commune, le nombre de bâtis par commune et permet d'avoir un ratio habitants/bâti (1.23 hab/log pour la commune de Bréhal et 1.36 hab/log pour la commune de Coudeville). Pour avoir le nombre d'habitations par bâti considéré, l'information du nombre de logements par bâti proposé par l'IGN a été utilisé.
- Enjeux économiques et touristiques : exploitation de la base de données SIRENE pour les entreprises et les commerces.

- Une attention particulière a été apportée au dénombrement des personnes habitant dans un logement de plain-pied.

Les éléments cartographiques issues de l'analyse géomatique sont présentés en Figure 86.



Figure 86. Cartographies des enjeux impactés pour les 3 cas de simulation.

Les résultats sont les suivants :

- Cas 1 sans aménagement :
 - Nombre de personnes total : 315 p.
 - Dont logements à étage : 92 p. (30 %) / 6 personnes sur zone d'aléa fort
 - Dont logements sans étage : 16 p. (5%) / 3 personnes sur zone d'aléa fort
 - Dont commerces (employés et clients) : 207 p. (65%)
- Cas 2 sans aménagement :
 - Nombre de personnes total : 473 p.
 - Dont logements à étage : 155 p. (33 %) / 64 personnes sur zone d'aléa fort
 - Dont logements sans étage : 70 p. (15%) / 21 personnes sur zone d'aléa fort
 - Dont commerces (employés et clients) : 248 p. (52%)
- Cas 2 avec aménagement :
 - Nombre de personnes total : 222 p.
 - Dont logements à étage : 64 p. (29 %) / 7 personnes sur zone d'aléa fort
 - Dont logements sans étage : 15 p. (7 %) / 3 personnes sur zone d'aléa fort
 - Dont commerces (employés et clients) : 143 p. (64%)

9. CONCLUSION

L'étude du risque de submersion marine par franchissement de paquets de mer reposait sur trois phases d'analyse :

- Phase 1 : Recueil et analyse des données d'entrée ;
- Phase 2 : Étude et caractérisation de l'environnement naturel et de l'aléa inondation ;
- Phase 3 : Systèmes d'endiguement potentiels et alternatives.

Les trois phases de l'études ont permis d'apporter des informations précises sur les volumes de franchissement, les écoulements à travers le tissu urbain et les aménagements permettant de contraindre ces écoulements. Les principales conclusions de l'étude sont les suivantes :

- La récupération d'un grand nombre de données fournis par GTM a fait l'objet d'un traitement géomatique et d'une réorganisation sous forme d'une base de données interfacée. Deux outils ont été développés afin d'exploiter et d'alimenter cette base de données.
- La caractérisation de l'environnement à proximité du site d'étude a permis de définir les niveaux marins extrêmes au droit de l'ouvrage et de définir les élévations du plan d'eau induites par le réchauffement climatique à différents horizons. Cette phase de l'analyse a aussi permis de quantifier les évolutions du littoral en termes de position du trait de côte et de fluctuation de niveau de sable en pied d'ouvrage.
- Les différents cas de simulation et les hypothèses de calculs ont été définis en accord avec le Maître d'Ouvrage. L'événement de référence retenu est la tempête Eleanor de 2018 au regard de son intensité (événement de période de retour 20 ans) et des données disponibles associées à cet événement (emprise des inondations, données de houle, de niveau d'eau et de vent, etc.). A partir de cet événement de référence, deux approches ont été considérées : (i) une approche projet basée sur des simulations de l'événement référence à différents horizons (actuel et 2070) et (ii) une approche PPR basée sur des simulations d'événement centennaux à différents horizons (actuel et 2100).
- La suite de calcul mise en place dans le cadre de cette étude a permis d'estimer les volumes de franchissement sur l'intégralité de l'ouvrage en enrochements via un découpage en tronçons homogènes et la définition d'un ensemble de profils transversaux. Une analyse de la fluctuation des niveaux de sables a permis de définir les profils théoriques bas (enveloppe basse des profils de l'Observatoire du littoral Manchois) et les profils abaissés (abaissement de 1 m considéré pour les horizons 2070 et 2100).
- Une comparaison des différentes formulations et outils permettant le calcul des débits de franchissements ont été effectuée dans le cadre de cette étude. Au regard des résultats obtenus et étant donné son caractère paramétrique et cohérent ainsi que les retours d'expérience dont il bénéficie, le manuel de l'Eurotop a été retenu dans le cadre de cette étude.
- Le modèle d'écoulement mis en place a fait l'objet d'un raffinement du maillage permettant de reproduire les écoulements dans la zone urbaine. Plusieurs adaptations du modèle ont été nécessaires : positionnement de points d'injections espacés de 20m, matérialisation des accès de second rang, adaptation de la topographie, formation d'îlots pour les habitations de premiers rangs, etc.
- Les résultats de simulation ont permis de caractériser l'aléa inondation au niveau de la commune de Saint-Martin de Bréhal et de Coudeville sur la base de la tempête Eleanor et pour différents horizons. Sans aménagement de l'ouvrage, les volumes d'eau dans la zone urbaine sont principalement

concentrés dans les 3 premières zones au Nord du domaine d'étude et plus particulièrement au droit de l'accès principale de la cale de la Vigie.

- Afin de limiter les franchissements par paquet de mer, plusieurs solutions d'aménagements ont été proposées. Basés sur la mise en place de muret anti-franchissement et la pose de batardeaux au niveau des principaux accès, deux scénarios ont été proposés pour (i) répondre aux objectifs de l'étude et apporter une solution à court terme, et (ii) assurer la protection des enjeux à plus long terme. L'analyse comparée des simulations en situation non aménagée et aménagée ont permis d'apporter des informations précises sur l'efficacité des solutions proposées. Néanmoins, cette étude porte sur l'analyse préliminaire et n'a permis de définir que les contours des aménagements proposés. Une analyse plus fine des aménagements à réaliser devra être précisée dans le cadre d'études ultérieures spécifiques de dimensionnement (stabilité et fondation du muret).
- L'analyse de la réglementation au système d'endiguement et plus particulièrement de la définition d'une digue assurant le rôle de protection contre les inondations a permis de fournir des informations factuelles sur le rôle de l'ouvrage de Saint-Marin de Bréhal. Au regard de la topographie à l'arrière de l'ouvrage, et de l'altimétrie terrain naturel sur plusieurs dizaines de mètres, le rôle principal de cet ouvrage est la fixation du trait de côte et la protection des enjeux de premiers rangs face au recul du trait de côte. Cet ouvrage ne rentre donc pas dans la catégorie d'ouvrage intégrable à un système d'endiguement, à moins que la collectivité ne le demande. Néanmoins, les résultats obtenus mettent en avant un sous-dimensionnement de l'ouvrage face aux franchissements par paquet de mer et une problématique de ressuyage des eaux marines dans le tissu urbain.
- L'analyse de la dangerosité des écoulements en milieu urbain a mis en avant qu'en situation actuelle ou en situation projetée avec la mise en place d'aménagements, les écoulements au sein du tissu urbain sont principalement caractérisés par un aléa de type faible à moyen (vitesses d'écoulement faible, et hauteur d'eau faible). Par ailleurs dans ces configurations un nombre limité d'enjeux humain est concerné par les inondations. Néanmoins, les résultats permettent aussi de mettre en avant une augmentation significative de la dangerosité des écoulements et des enjeux impactés dans le cas où aucun aménagement ne serait réalisé sur l'ouvrage, et ce dès l'horizon 2070.
- La principale préconisation repose donc sur la mise en place d'aménagements en partie Nord du domaine d'étude (zones 1 à 3) à court-moyen terme. Ces aménagements doivent aussi être accompagné d'un suivi régulier des niveaux de sables en pied d'ouvrage.

BIBLIOGRAPHIE

ACRI-IN et ANTEA. (2022). Étude des aléas littoraux sur la commune d'Agon-Coutainville à Bretteville-sur-Ay, dans le département de la Manche, en préalable à l'élaboration d'un PPRL. Phase 1 : Analyse générale du site et du fonctionnement du littoral.

BRGM. (1978). Carte géologique de la France à 1/25 000

CEREMA (2018). Les niveaux marins extrêmes – Port et métropole.

CONSEIL REGIONAL DE NORMANDIE (2019). « Notre littoral pour demain – Ouest-Cotentin ». Stratégie et plan d'actions.

IFREMER (1987). Étude régionale intégrée du golfe normano-breton. Carte biomorphosédimentaire de la zone intertidale au 1/25 000 Côte Ouest du Cotentin et Baie du Mont Saint-Michel.

LEVOY F. (1994c) - Evolution et fonctionnement hydrosédimentaire des plages macrotidales - L'exemple de la côte Ouest du Cotentin. *Thèse de l'Université de Caen. 424 pages et annexes.*

Levoy F. et Larsonneur. C. (1993). Étude Globale concernant la défense contre la mer du département de la Manche. Rapport X - Modélisation des conditions hydrodynamiques et des transports sédimentaires sur les plages de la côte ouest du Cotentin. *Conseil Général de La Manche. 40 pages et annexes.*

SHOM (2020). L'édition 2020 des références altimétriques maritimes (RAM).

SHOM/CETMEF (2008). Les niveaux marins extrêmes le long des côtes de France et leur évolution. *19 p. + cartes et ann.*

SHOM/CETMEF (2012). Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique). *160 p. + cartes et ann.*