

Littoraux normands 2027

Analyse des effets de l'érosion côtière et de la submersion marine sur le littoral normand aux horizons 2050, 2120 et 2300, incluant l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique

RAPPORT D'ÉTUDE

Mars 2023

Le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) est un établissement public tourné vers l'appui aux politiques publiques, placé sous la double tutelle du ministère de la transition écologique et du ministère de la cohésion des territoires et des relations avec les collectivités territoriales.

Les métiers du Cerema s'organisent autour de 6 grands domaines d'activité complémentaires visant à accompagner les acteurs territoriaux dans la réalisation de leurs projets.

6 domaines d'activité :

Expertise et ingénierie territoriale / Bâtiment / Mobilités / Infrastructures de transport / Environnement et risques / Mer et littoral

Site web : [cerema.fr](https://www.cerema.fr)

Littoraux normands 2027

Analyse des effets de l'érosion côtière et de la submersion marine sur le littoral normand aux horizons 2050, 2120 et 2300 incluant l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique.

Commanditaire : DREAL Normandie

Auteure : Noémie MIDY

Responsable du rapport

| |
|---|
| Noémie MIDY – Département Littoral Aménagement Bâtiment – Groupe Mer Energies Littoral |
| Tél. : +33(0)2 35 68 82 56 |
| Courrier : noemie.midy@cerema.fr |
| Cerema Normandie Centre – 10 chemin de la Poudrière – 76120 LE GRAND QUEVILLY |

Historique des versions du document

| Version | Date | Commentaire |
|-----------|------|---|
| Version 0 | | Initiale – soumise à relecture |
| Version 1 | | Prise en compte des corrections de la DREAL Normandie |
| Version 2 | | Version finale |

Références

N° NOVA : 21-NC-0445

| Nom | Service | Rôle | Date | Visa |
|------------------|--------------------|---------------------------|------|------|
| Noémie MIDY | Cerema NC/DLAB/MEL | Auteure principale | | |
| Anaïs DABURON | Cerema NC/DLAB/MEL | Relectrice | | |
| Aurélien MILLION | Cerema NC/DLAB | Approbateur | | |

Résumé de l'étude

Au travers des études nationales et locales réalisées, le constat peut être fait d'une grande mobilité du trait de côte sur le littoral normand. Cette étude vise à caractériser ce dernier au regard des risques d'érosion / accrétion et de submersion marine en tenant compte de l'élévation du niveau marin et d'en estimer les enjeux.

En suivant les règles d'inconstructibilité de la loi Climat et Résilience, l'étude se porte aux horizons 2050 et 2120 en appliquant, respectivement, une élévation du niveau marin de 0.4 m et de 1.2 m selon le scénario RCP8.5 du Rapport Spécial du GIEC de 2019. Les analyses sont aussi réalisées à l'horizon 2300.

Dans un premier temps le littoral est caractérisé selon sa géomorphologie, son exposition aux facteurs climatologiques et sa géologie. Ce travail permet de déterminer 38 secteurs de typologies différentes.

L'évolution passée du trait de côte est ensuite analysée sur 8 périodes (1947, 1977, 1982, 1992, 2001, 2010, 2016 et 2019) et projetée selon une méthodologie divisée en 3 cas possibles : côtes à falaises / rocheuses, côtes basses à évolution constante et côtes basses à évolution variée.

L'analyse de la submersion marine s'appuie sur la méthodologie des Zones Potentiellement sous le Niveau Marin (ZPNM) de la DREAL Normandie. En parallèle, un travail sur la typologie des dunes, inspiré de la classification réalisée par l'Office National des Forêts, est réalisé afin de qualifier leur vulnérabilité face à l'érosion et la submersion marine. Les résultats obtenus pourraient permettre, avec des modélisations supplémentaires, de préciser les zones submergées.

Afin d'analyser les enjeux impactés par les risques littoraux, une typologie classée en 3 types d'enjeux : primaire, secondaire / tertiaire / usages résidentiels et réseaux de transport logistique et infrastructures, est créée. Les données d'enjeux issues de différentes sources (IGN, CRIGE, Cerema...) sont ensuite croisées avec les zones d'évolution du trait de côte et de submersion marine afin d'obtenir des résultats en hectares de surfaces ou en nombre d'infrastructures impactés.

5 à 10 mots clés à retenir de l'étude

| | |
|---------------------------|----------------|
| Trait de côte | Normandie |
| Changement climatique | Seine-Maritime |
| Elévation du niveau marin | Calvados |
| Submersion marine | Manche |
| Enjeux | |

Statut de communication de l'étude

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

- Accès libre : document accessible au public sur internet
- Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema
- Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](#), via le dépôt de document : <https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx>

Catalogage également disponible sur <http://www.etudes-normandie.fr/accueil>

Contexte et objet de l'étude

Le littoral constitue un enjeu régional majeur pour lequel la Normandie s'est engagée depuis déjà plusieurs années. De nombreux partenariats et projets ont été mis en œuvre au fil des années pour améliorer la connaissance et la gestion de la bande côtière et de son évolution : projets de recherche, expérimentations, sensibilisation, etc.

C'est forts de cette histoire commune que l'État, ses opérateurs et ses partenaires tirent les enseignements de la période écoulée et retiennent 4 ambitions prioritaires à déployer dans la stratégie « Littoraux normands 2027 » :

- Conforter le pilotage et l'animation de la gestion intégrée de la bande côtière,
- Produire et partager une connaissance approfondie de l'évolution de la bande côtière et des enjeux qui y prennent place,
- Mieux prévenir les risques littoraux, gérer activement les situations existantes et stimuler les mutations nécessaires,
- Renforcer la communication quant aux évolutions de la zone côtière et aux risques associés.

Faciliter et accélérer l'adaptation face aux risques liés au changement climatique nécessite l'engagement de tous et toutes dans la mise en œuvre d'actions lisibles, coordonnées et concertées entre les « acteurs » du littoral. La stratégie « Littoraux normands 2027 » permet à l'État, ses opérateurs et ses partenaires d'inscrire leurs actions dans une dynamique d'anticipation résolue, d'efficacité accrue et de proximité renforcée, au service des communes, EPCI, syndicats mixtes du littoral pour relever ces défis¹.

La présente étude s'inscrit dans cette stratégie et vise à produire une connaissance harmonisée sur l'évolution du littoral normand au regard des risques littoraux d'érosion et de submersion marine et du changement climatique, et sur le recensement des enjeux potentiellement concernés par ces risques à différents horizons temporels. Le suivi d'avancement ainsi que la validation des choix méthodologiques ont été assurés par un comité de suivi composé de services de l'État (DDTMs, DREAL, DRAAF, DIRM), de membres du Réseau d'Observatoire du Littoral, de représentants de la Région Normandie, de l'Établissement Public Foncier de Normandie, du Conservatoire du Littoral, des Universités de Caen et de Rouen, du BRGM, du Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval, de l'AESN, de l'OFB, de l'ANDD et de collectivités.

Au cours de la réalisation de cette étude, la loi « Climat et Résilience » portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets a été promulguée le 22 août 2021. Cette loi traduit une partie des 146 propositions de la Convention citoyenne pour le climat retenues par le chef de l'État, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % d'ici 2030. Une de ces propositions prévoit de donner aux territoires littoraux un cadre et des leviers pour adapter leur politique d'aménagement à l'érosion du trait de côte par des mesures portées par l'ordonnance du 6 avril 2022, entrée en vigueur le 8 avril 2022².

¹ DREAL Normandie, « Littoraux normands 2027 ».

² Ordonnance n° 2022-489 du 6 avril 2022 relative à l'aménagement durable des territoires littoraux exposés au recul du trait de côte.

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| 1. ECHEANCES ET ELEVATION DU NIVEAU MARIN | 11 |
| 1.1 Choix des échéances étudiées | 11 |
| 1.2 Choix d'élévation du niveau marin à appliquer | 12 |
| 1.2.1 Scénarios de modélisation du changement climatique | 12 |
| 1.2.2 Niveaux d'élévation | 13 |
| 2. CREATION D'UNE TYPOLOGIE DU TRAIT DE COTE | 15 |
| 2.1 La morphologie de la côte | 15 |
| 2.1.1 Côtes à falaises et côtes rocheuses | 17 |
| 2.1.2 Côtes basses | 20 |
| 2.1.3 Havres et estuaires | 21 |
| 2.1.4 Les côtes artificielles | 23 |
| 2.2 L'exposition de la côte aux facteurs météo-marins | 24 |
| 2.2.1 L'orientation de la côte | 25 |
| 2.2.2 Les agents morphodynamiques | 26 |
| 2.2.3 Résultats | 37 |
| 2.3 La géologie et les mécanismes d'évolution de la côte et de l'estran | 38 |
| 2.3.1 Géologie | 38 |
| 2.3.2 Nature de l'estran | 39 |
| 2.3.3 Mouvements de terrain | 39 |
| 2.3.4 Synthèse des paramètres géologiques | 40 |
| 2.4 Définition de la typologie des côtes normandes | 41 |
| 2.4.1 Méthodologie | 42 |
| 2.4.2 Résultats obtenus | 44 |
| 3. ANALYSE DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE | 50 |
| 3.1 Numérisation du trait de côte récent | 50 |
| 3.1.1 Méthodologie | 50 |
| 3.1.2 Résultats obtenus | 60 |
| 3.2 Calcul des valeurs d'évolution du trait de côte | 61 |
| 3.2.1 Méthodologie | 61 |
| 3.2.2 Résultats obtenus | 64 |
| 3.3 Méthode de projection du trait de côte | 64 |
| 3.3.1 Méthodologie | 65 |
| 3.3.2 Résultats obtenus | 72 |

| | |
|--|------------|
| 3.4 Lissage des zones de projections..... | 73 |
| 3.4.1 Méthodologie | 74 |
| 3.4.2 Résultats obtenus | 74 |
| 4. ANALYSE DE LA SUBMERSION MARINE | 75 |
| 4.1 Données de modélisation de la submersion marine | 76 |
| 4.1.1 Méthodologie appliquée par le BRGM..... | 76 |
| 4.1.2 Méthodologie appliquée par la DREAL Normandie | 77 |
| 4.1.3 Choix de la méthodologie..... | 78 |
| 4.1.4 Méthodologie des ZPNM en 2120..... | 79 |
| 4.1.5 Résultat obtenus..... | 80 |
| 4.2 Création d'une typologie dunaire | 81 |
| 4.2.1 Méthodologie | 82 |
| 4.2.2 Création des profils dunaires | 83 |
| 4.2.3 Comparaison des données de submersion marine et de la vulnérabilité des dunes..... | 91 |
| 5. EFFETS DE L'ELEVATION DU NIVEAU MARIN SUR LA DYNAMIQUE DE LA BANDE COTIERE | 93 |
| 5.1 Impact d'une élévation du niveau marin sur la dynamique des falaises et des plages/dunes | 93 |
| 5.1.1 Impact sur les plages / dunes | 95 |
| 5.1.2 Impact sur les côtes à falaises | 96 |
| 5.2 Projets lancés en Normandie afin d'adapter le littoral normand aux conséquences de l'élévation du niveau marin | 98 |
| 5.2.1 Notre Littoral Pour Demain..... | 98 |
| 5.2.2 Rivages Normands 2100..... | 99 |
| 5.2.3 Projet RICOCHET..... | 99 |
| 5.2.4 Projet RAIV-COT..... | 100 |
| 5.2.5 Loi Climat et Résilience..... | 100 |
| 5.2.6 GIEC normand..... | 101 |
| 6. IDENTIFICATION DES ENJEUX | 102 |
| 6.1 Méthodologie | 103 |
| 6.1.1 Typologies d'enjeux socio-économiques | 103 |
| 6.1.2 Traitement des données | 104 |
| 6.2 Résultats obtenus | 108 |
| 6.2.1 Typologie d'enjeux socio-économiques..... | 108 |
| 6.2.2 Enjeux impactés par le recul du trait de côte..... | 110 |

| | |
|---|------------|
| 6.2.3 Enjeux impactés par la submersion marine..... | 116 |
| 6.2.4 Effet cumulé de l'évolution du trait de côte et de la submersion marine | 119 |
| 7. CONCLUSION | 123 |
| 8. BIBLIOGRAPHIE | 125 |
| 9. GLOSSAIRE | 128 |
| 10. LISTE DES FIGURES | 132 |
| 11. LISTE DES TABLEAUX | 134 |
| 12. LISTE DES ANNEXES | 135 |

Introduction

Au travers des études nationales et locales réalisées, le constat peut être fait d'une grande mobilité du trait de côte sur le littoral de la Normandie. Avec un littoral composé de falaises, de côtes sableuses, rocheuses, d'estuaires, d'expositions différentes à la mer, cette mobilité ne s'exprime pas toujours de la même manière, ni à la même vitesse au fil du temps. Le contexte d'élévation du niveau marin lié au changement climatique est de nature à modifier les tendances actuelles voire à les accélérer.

Dans ce cadre, la présente étude vise à caractériser, dans un premier temps, le littoral normand au regard des risques littoraux d'érosion et de submersion marine, dans un second temps, les risques liés à l'élévation du niveau marin, puis à recenser les enjeux potentiellement concernés par ces phénomènes cumulés à différents horizons temporels et à estimer leur coût.

Les objectifs de la présente étude sont notamment :

- De fournir une connaissance et une vision harmonisée du littoral normand en termes d'échelles, d'horizons temporels et de méthodologie ;
- De fournir une analyse actualisée de référence de la question de l'évolution du littoral dans toutes ses composantes : risques, érosion, aménagement, changement climatique... avec la combinaison des différents phénomènes dans la limite des connaissances scientifiques ;
- De conforter la culture du partage entre les différents acteurs intervenant sur le sujet : scientifiques, État, collectivités, opérateurs...
- De mettre en œuvre une typologie des territoires qui aura le mérite de pouvoir tirer profit des différents enseignements de l'étude et notamment dans les territoires les moins avancés sans repartir de zéro ;
- De fournir une quantification des enjeux permettant d'estimer le nombre de biens menacés ainsi que leur valeur afin d'établir une vision collective des enjeux et, à termes, de prioriser les interventions, notamment celles de l'Etat.

1. ECHEANCES ET ELEVATION DU NIVEAU MARIN

Synthèse

Les données disponibles sur l'élévation du niveau marin ont été collectées afin de déterminer les horizons temporels sur lesquels fixer les hypothèses d'élévation du niveau marin appliquées dans cette étude. La première partie justifie le choix des horizons étudiés d'après la loi Climat et Résilience qui fixe des limites de constructibilités dans les zones exposées au recul du trait de côte d'ici 30 et 100 ans. La seconde partie présente les scénarios RCP utilisés dans le Rapport Spécial du GIEC de 2019, dernier rapport publié au commencement de l'étude, et justifie le choix du scénario sur lequel l'étude s'est portée. Les valeurs d'élévations associées à ce scénario sont ensuite présentées et permettront par la suite de projeter des niveaux d'élévation sur le littoral normand et d'en évaluer les impacts sur les enjeux.

Hypothèses retenues

Suite à la publication de la loi Climat et Résilience, il a été décidé d'étudier le recul du trait de côte aux horizons 2050 et 2120. L'horizon 2300 sera aussi étudié.

Le scénario de modélisation de changement climatique appliqué est le RCP8.5, scénario représentant la plus forte augmentation future de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ce choix va permettre d'étudier la limite d'extension maximale des aléas recul du trait de côte et submersion marine et d'avoir une marge pour une possible future évolution des estimations d'élévation du niveau marin.

Toujours dans l'hypothèse maximale, l'étude porte sur une élévation du niveau marin de 0,40 m en 2050 et de 1,20 m en 2120. Les projections de ces élévations seront couplées avec les projections de recul du trait de côte aux mêmes échéances temporelles.

Limites identifiées

Les marges d'incertitudes existantes à l'horizon 2100 ont été extrapolées à l'horizon 2120.

1.1 Choix des échéances étudiées

Trois horizons sur lesquels l'étude se portera ont été retenus : 2050, 2120 et 2300.

Il avait initialement été choisi les horizons 2030, 2100 et 2300 mais les deux premières échéances ont été ajustées pour correspondre aux horizons limites utilisés dans la loi Climat et Résilience. En effet, dans le cadre de l'intégration de l'érosion côtière dans les documents de planification, les temporalités concernant les règles d'inconstructibilité ont été modifiées : il est dorénavant quasiment impossible de construire dans les zones exposées au recul du trait de côte à 0-30 ans (2020-2050) et possible sous conditions dans les zones exposées à 30-100 ans (2050-2120)³. L'horizon 2300 va permettre d'analyser le comportement du trait de côte dans un avenir plus lointain.

³ GIP Littoral 2030, « Promulgation de la loi Climat et Résilience : dispositions relatives à la gestion de l'érosion côtière ».

1.2 Choix d'élévation du niveau marin à appliquer

1.2.1 Scénarios de modélisation du changement climatique

Afin de modéliser les changements climatiques à venir, des scénarios ont été établis en 2014, par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) pour son cinquième rapport (IPCC Fifth Assessment Report), selon différentes données : les concentrations et émissions de gaz à effet de serre (Figure 1), d'aérosols et de gaz chimiquement actifs, l'utilisation et le recouvrement des sols.

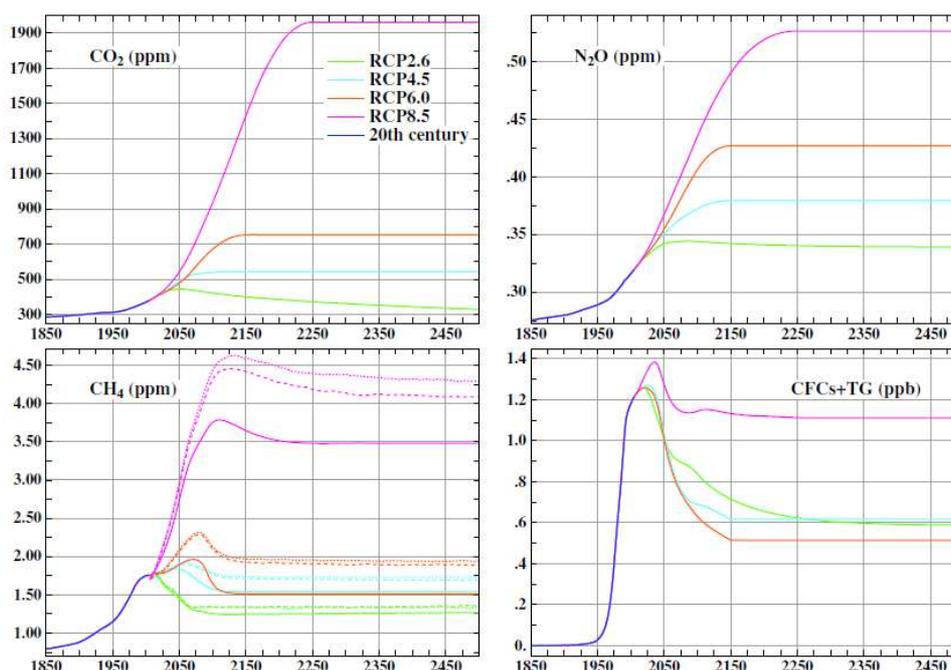


Figure 1 : Ratio de gaz à effet de serre dans les scénarios RCP (NAZARENKO et al., 2015).

Ces scénarios appelés « scénarios RCP » pour « Representative Concentration Pathways », expriment la trajectoire de forçage radiatif supposée de 2000 à 2100 (Figure 2)⁴. Le forçage radiatif est une variation dans l'énergie transmise entre la Terre et l'atmosphère, exprimé en watts par mètre carré. Il est mesuré par le changement du flux radiatif à un certain niveau dans

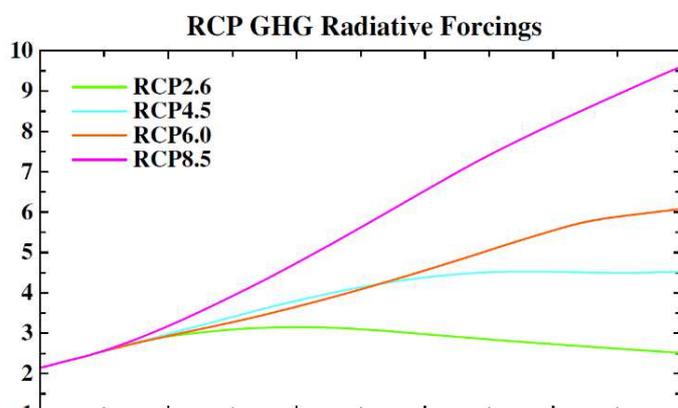


Figure 2 : Forçage radiatif des scénarios RCP estimés pour une simulation du climat futur (Nazarenko et al. 2015).

l'atmosphère, causé par une perturbation qui peut être une variation de l'incidence du rayonnement solaire, de la composition atmosphérique, des propriétés de la surface terrestre, etc.

Il existe quatre scénarios, correspondant chacun à un profil d'évolution possible selon les concentrations de gaz à effet de serre.

⁴ IPCC, « Summary for Policymakers ».

Ils sont projetés selon les efforts plus ou moins grands réalisés par les humains afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial à l’horizon 2300 : un scénario d’atténuation (RCP2.6), deux scénarios intermédiaires de stabilisation (RCP4.5 et RCP 6.0) et un dernier scénario correspondant aux émissions de gaz à effet de serre si aucune amélioration n’est réalisée (RCP8.5) (Tableau 1)⁵.

Tableau 1 : Forçage radiatif total approximatif en 2100 par rapport à 1750 et concentration en CO₂ correspondante Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, Le littoral dans le contexte du changement climatique, 2015.

| Scénario | Forçage radiatif vers 2100 (W/m ²) | Concentration en CO ₂ vers 2100 exprimée en éq-CO ₂ (ppm) | Profil d’évolution |
|----------|--|---|---------------------------------------|
| RCP2.6 | 2.6 | 475 | Pic puis déclin |
| RCP4.5 | 4.5 | 630 | Stabilisation avant 2100 |
| RCP6.0 | 6.0 | 800 | Stabilisation après 2100 |
| RCP8.5 | 8.5 | 1313 | Croissant (sans politique climatique) |

Dans le cadre de cette étude, le choix s’est porté sur le scénario RCP8.5. En effet, il a été décidé d’étudier l’élévation du niveau marin selon le scénario le moins optimiste afin d’étudier la limite d’extension maximale et d’avoir une marge d’évolution possible.

Différents scénarios ont été utilisés dans les rapports du GIEC, ils sont détaillés en Annexe 2.

1.2.2 Niveaux d’élévation

L’élévation du niveau de la mer n’est pas uniforme et varie selon les régions⁶. Ces variations, de ±30% de la hausse moyenne du niveau de la mer⁷, sont causées par de nombreux facteurs tels que la non-uniformité de l’expansion thermique et des effets de salinités associés avec les changements de circulation océanique⁸ et la fonte des glaciers. Les valeurs d’élévations calculées correspondent au niveau moyen d’élévation global de la mer (GMSL pour Global Mean Sea Level Rise).

Les rapports d’évaluation du GIEC étudient l’élévation du niveau de la mer à la fin du siècle (IPCC 1990, IPCC 1995, IPCC 2001, IPCC 2007, IPCC 2014, IPCC 2019).

Ici, les valeurs utilisées sont celles du dernier rapport publié du GIEC à la date du commencement de l’étude, le Rapport Spécial de 2019. Ce rapport indique que l’élévation du niveau marin s’est accélérée en raison de l’augmentation de la fonte des glaciers du Groenland et de

⁵ IPCC, « Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ».

⁶ IPCC. « Climate Change 2014 : Synthesis Report, Contribution of Working Group I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change ».

⁷ IPCC, « Summary for Policymakers ».

⁸ Le Cozannet *et al.*, « Exploring the Relation between Sea Level Rise and Shoreline Erosion Using Sea Level Reconstructions », 3 janvier 2013.

l'Antarctique. Les dernières estimations sont de 0,29 à 0,59 m sous RCP2.6 et de 0,61 à 1,10 m sous RCP8.5 pour 2100 (Figure 3).

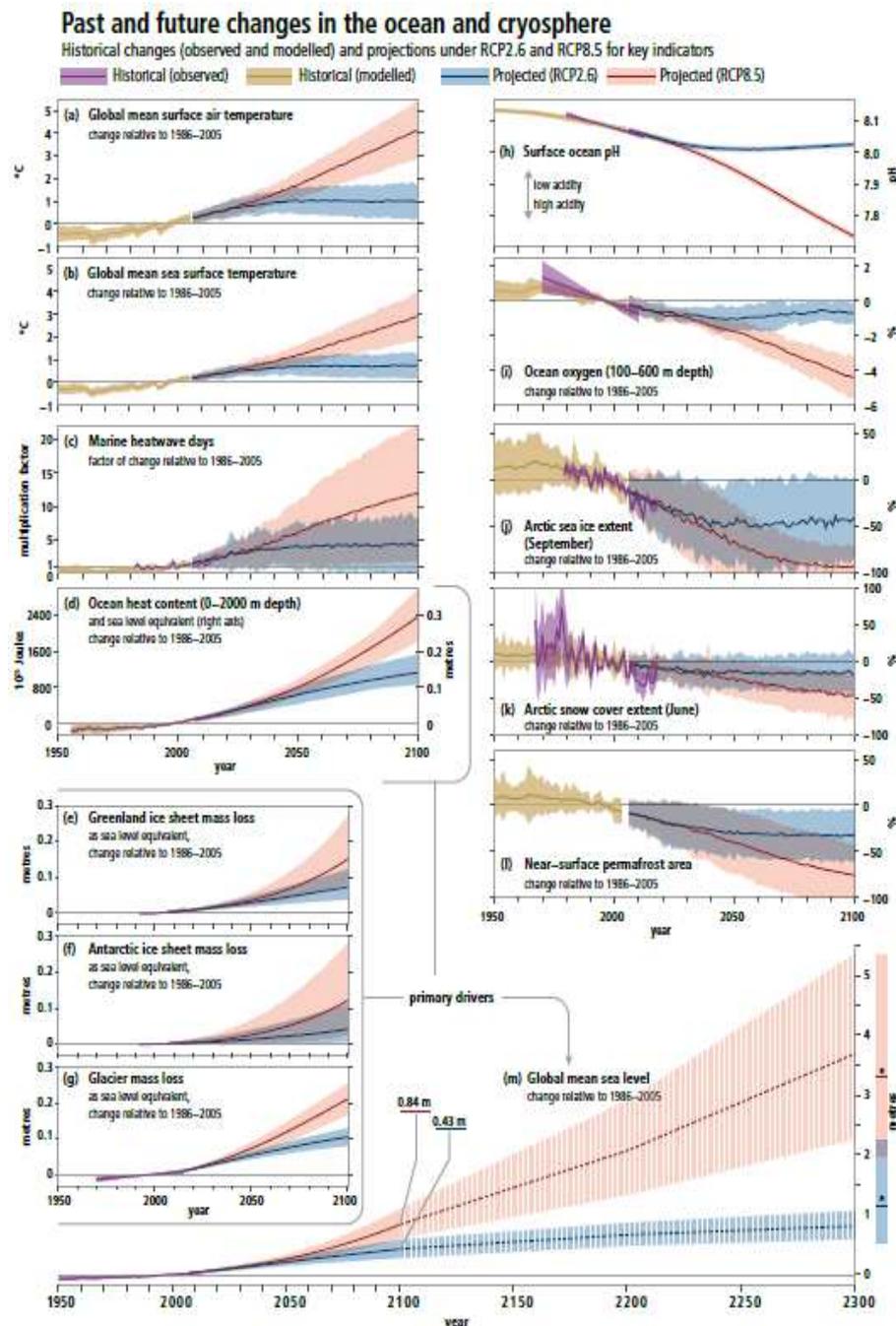


Figure 3 : Estimation de l'élévation du niveau de la mer sous faibles (RCP2.6) et fortes (RCP8.5) émissions de gaz à effet de serre (IPCC 2019).

Peu de documents estiment précisément le niveau marin à l'horizon 2050. Les rapports du GIEC le représente sur leurs graphiques mais les données ne sont jamais explicitement renseignées. Cependant, le rapport sur « Le climat de la France au XXI^e siècle » de la Direction Générale de l'Énergie et du Climat (DGEC), indique, avec une probabilité de 67 %, que l'élévation moyenne globale de la mer serait de 0.4 m sous RCP8.5⁹.

⁹ Planton *et al.*, « Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises. Le climat de la France au XXI^e siècle ».

Des études ont déterminé que sous RCP8.5, le niveau de la mer augmenterait de plusieurs centimètres par an conduisant à une élévation de plusieurs mètres d'ici 2300. En effet des modèles indiquent une élévation d'environ 3 m d'élévation d'ici 2300 sous RCP8.5¹⁰.

Suite aux recherches bibliographiques, l'étude sera réalisée selon une élévation de 0,40 m en 2050. Pour l'horizon 2120, il a été décidé d'étudier l'élévation selon les valeurs prévues en 2100, à savoir 1,10 m. Pour des raisons cartographiques, cette valeur a été majorée à 1,20 m pour l'horizon 2120 (voir détails et explications dans 4.2.2.2. *Détermination des largeurs des dunes* dans 4.2 Création d'une typologie dunaire). L'horizon 2300 sera étudié avec une élévation de 3 m.

2. CREATION D'UNE TYPOLOGIE DU TRAIT DE COTE

La typologie du trait de côte a été définie en fonction de 3 familles de critères naturalistes :

1. La morphologie de la côte,
2. L'exposition de la côte aux facteurs météo-marins,
3. La géologie et les mécanismes d'évolution de la côte et de l'estran.

Ces critères ont permis d'identifier sur le littoral normand des secteurs présentant les mêmes caractéristiques. Le trait de côte a été découpé selon ces paramètres afin de comparer les différents secteurs et leur évolution.

2.1 La morphologie de la côte

Le littoral normand est formé de plusieurs types de côtes (Figure 4) : des côtes à falaises, des côtes rocheuses, des côtes basses, des havres et estuaires et des côtes artificialisées. Pour définir la nature morphologique du trait de côte, le Cerema s'est appuyé sur les travaux effectués dans le cadre de la Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte (SNGITC¹¹). La typologie EuroSION a été transférée sur le trait de côte Histolitt® (coproduction Shom et IGN. Il est composé d'éléments issus de la numérisation des cartes marines aux échelles supérieures au 1/25000, localement 1/5000 dans les ports) avec la nomenclature suivante :

- Falaise et côte rocheuse > 20m,
- Falaise et côte rocheuse < 20m,
- Côte d'accumulation sableuse ou sablo-limoneuse,
- Côte d'accumulation vaseuse,
- Côte artificialisée.

¹⁰ IPCC, « Summary for Policymakers ».

¹¹ Ministère de l'Écologie, du développement durable, des Transports et du Logement, « Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Vers la relocalisation des activités et des biens. »



*Figure 4 : Localisation de l'ensemble des types géomorphologiques de côtes sur la façade normande ;
en rose, les côtes à falaise / en rouge, les côtes rocheuses / en jaune, les côtes basses / en bleu foncé, les havres / en turquoise, les estuaires. .*

2.1.1 Côtés à falaises et côtes rocheuses

Les côtes à falaises représentent environ 140 km du trait de côte normand et les côtes rocheuses en représentent environ 80 km (Figure 5) sur les 500 km de côtes naturelles normandes.



Figure 5 : Localisation des côtes à falaises (en rose) et des côtes rocheuses (en rouges).

Le littoral de Seine-Maritime, du Tréport au Havre, est formé de falaises taillées dans la craie du Crétacé supérieur avec différents faciès plus ou moins riches en lits de silex (Figure 6).

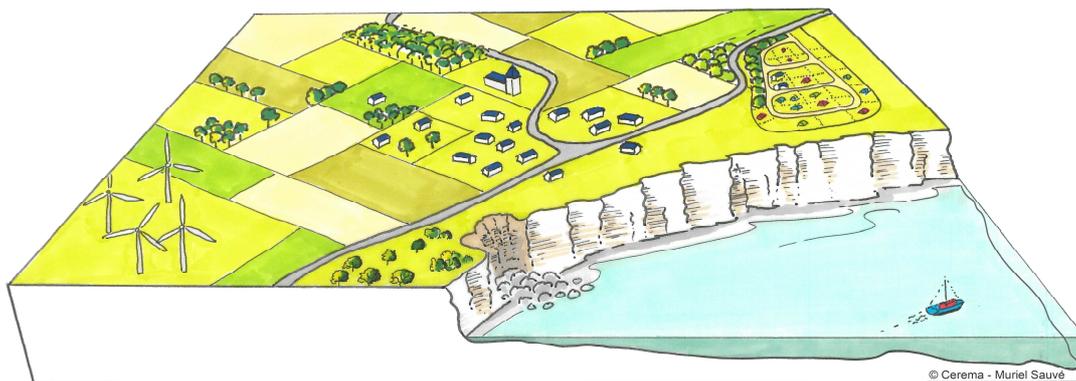


Figure 6 : Illustration d'une côte à falaises crayeuses (dessin Muriel Sauvé, Cerema).

Ces falaises sont localement incisées par des valleuses (Fond du Val, Valleuse d'Életot,...), correspondant à d'anciennes vallées fluviales, aujourd'hui sèches, qui ont été recoupées par le recul des falaises (Figure 7).

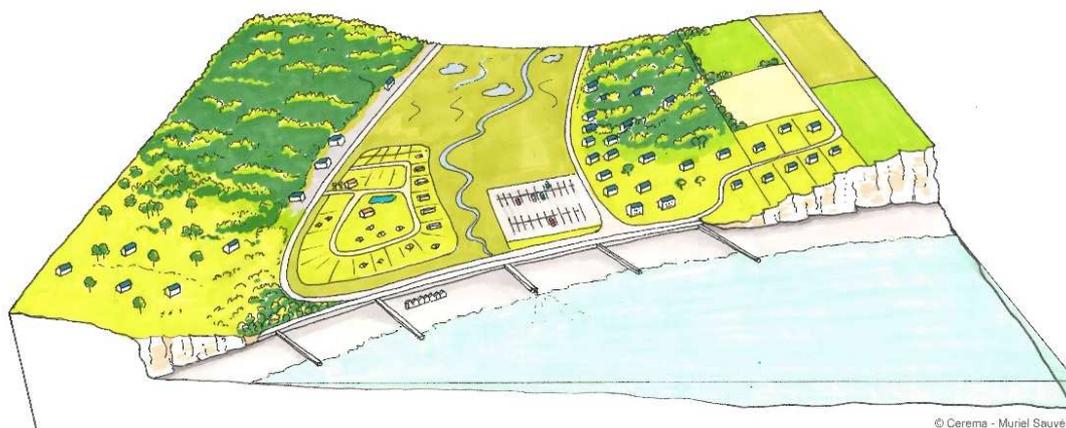


Figure 7 : Illustration d'une valleuse ou basse vallée (dessin Muriel Sauvé, Cerema).

Les falaises crayeuses peuvent être « simples » comme celles entre Criel-sur-Mer et Penly, «   piédestal résistant » comme celles entre Senneville-sur-Fécamp et Fécamp ou encore « complexes » comme les falaises formant le Cap d'Ailly (Figure 8).   l'ouest du Calvados, les falaises sont taillées dans des roches cohérentes du Jurassique¹².

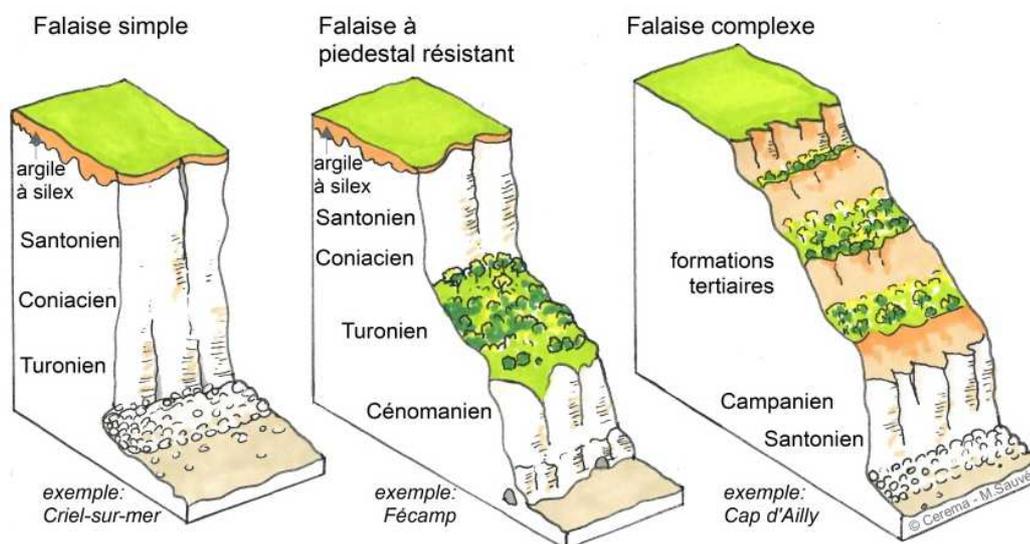


Figure 8 : Illustration des différentes formes de falaises crayeuses (dessin Muriel Sauvé, Cerema).

¹² Letortu, « Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits ».

Les côtes appelées « rocheuses » sont formées de roches magmatiques et/ou métamorphiques résistantes : ces falaises se trouvent sur une partie du littoral nord du département de la Manche où les roches, magmatiques et métamorphiques, y sont très cohérentes¹³. De même, du Cap de la Hague à la pointe du Roc, les formations sédimentaires dominantes sont recoupées par des formations métamorphiques et plutoniques¹⁴ résistantes (Figure 9 et Figure 10) qui forment de hautes falaises rocheuses.

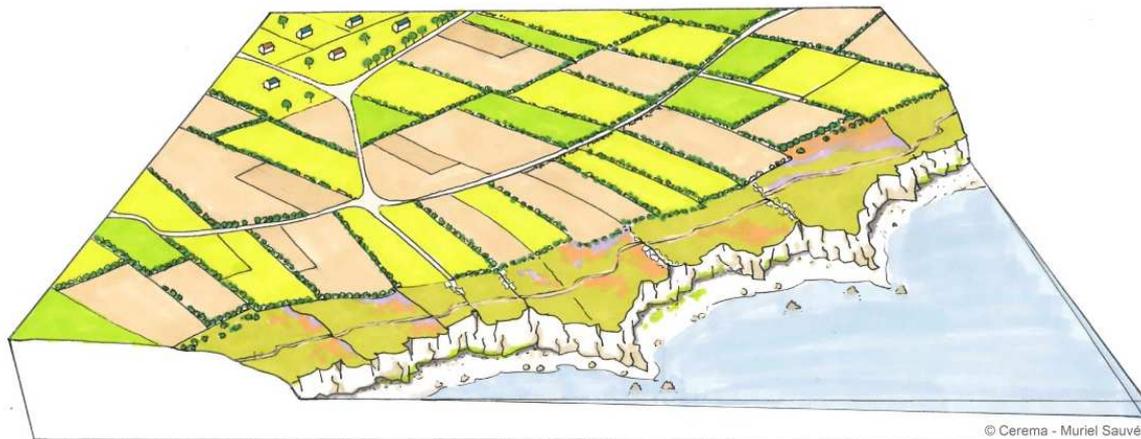


Figure 9 : Illustration d'une côte rocheuse (dessin Muriel Sauvé, Cerema).

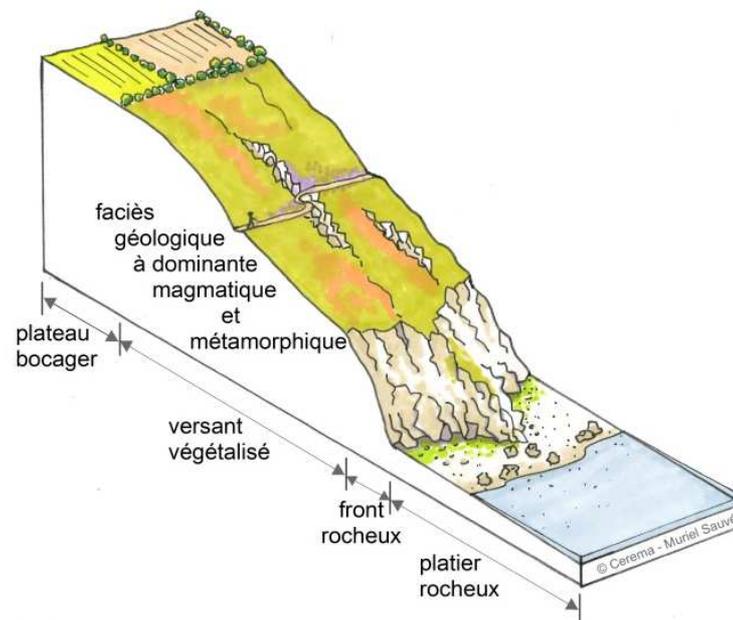


Figure 10 : Illustration détaillée d'une côte rocheuse (dessin Muriel Sauvé, Cerema).

¹³ Cerema, *Dynamique et évolution du littoral : Synthèse des connaissances, du cap d'Antifer au cap de la Hague*.

¹⁴ Cerema, *Dynamique et évolution du littoral, synthèse des connaissances du cap de la Hague à la pointe de Corsen*.

2.1.2 Côtes basses

Les côtes basses représentent environ 140 km du trait de côte normand (Figure 11).



Figure 11 : Localisation des côtes basses.

Dans le Calvados, la côte sableuse domine le littoral entre Houlgate et Saint-Côme-de-Fresné, à l'est d'Arromanches. En effet, un cordon littoral quasi-continu est formé sous la forme de larges plages ouvertes, en arrière desquelles des cordons dunaires se sont développés (Figure 12)¹⁵.

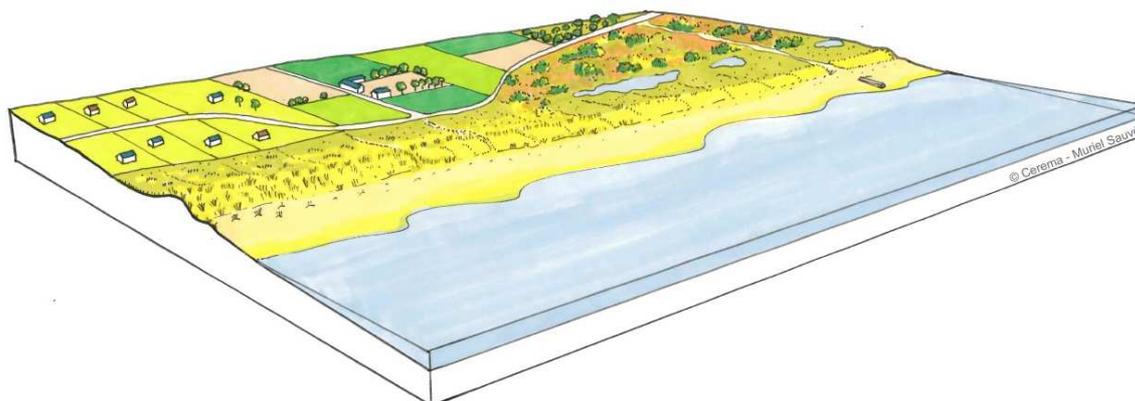


Figure 12 : Illustration d'une côte sableuse (dessin Muriel Sauvé, Cerema).

¹⁵ Cerema, *Dynamique et évolution du littoral : Synthèse des connaissances, du cap d'Antifer au cap de la Hague*.

Dans le département de la Manche, le littoral est principalement sableux. Du Cap de la Hague à la Baie du Mont-Saint-Michel, de nombreux systèmes dunaires sont formés, composés de dunes plus ou moins basses, pouvant aller jusqu'à 14 m (Figure 13 et Figure 14).

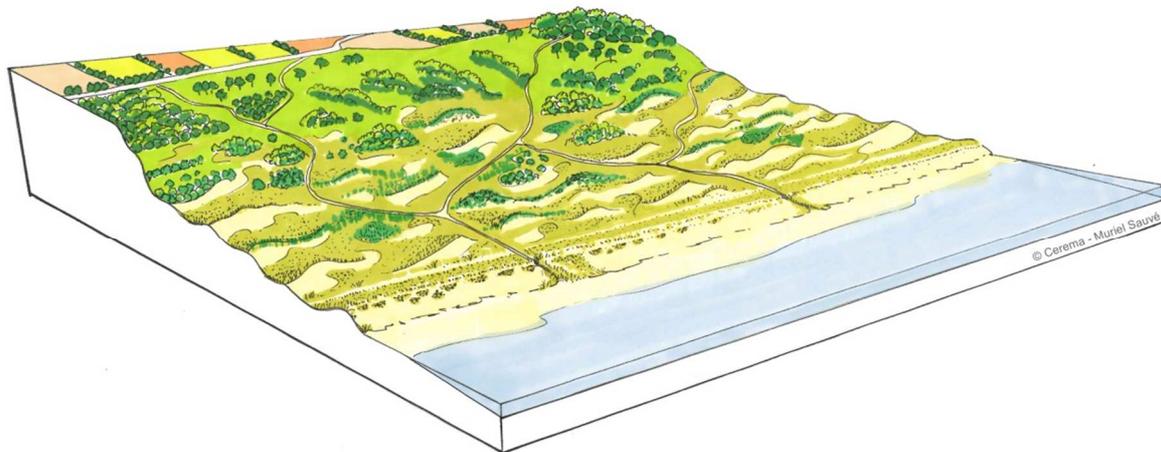


Figure 13 : Illustration d'une côte sableuse à système dunaire complexe (dessin Muriel Sauvé, Cerema).

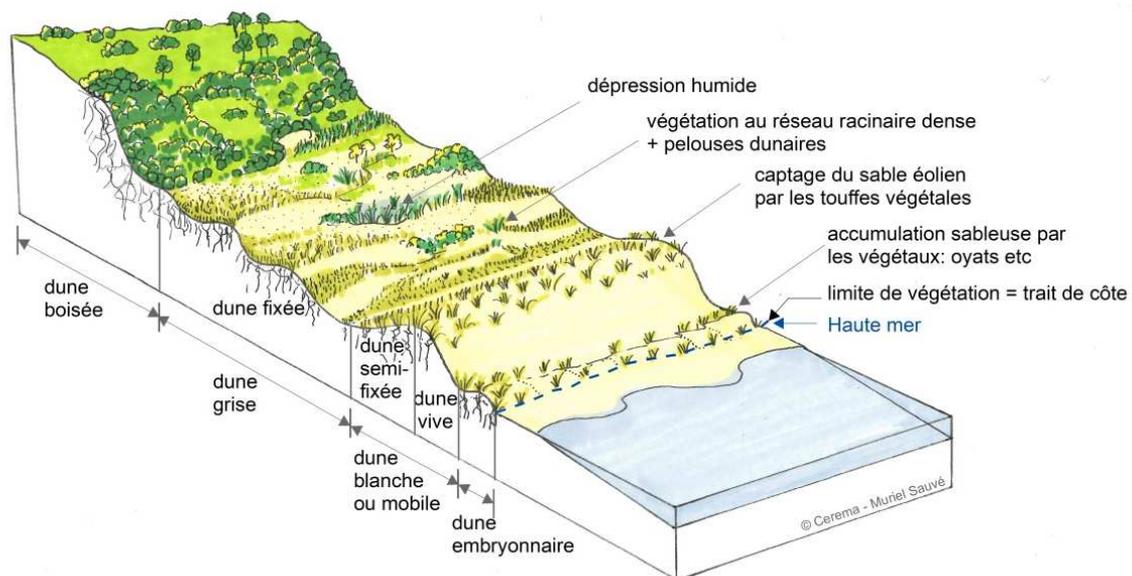


Figure 14 : Illustration détaillée d'un système dunaire complexe (dessin Muriel Sauvé, Cerema).

2.1.3 Havres et estuaires

Les havres représentent environ 65 km du trait de côte normand et les estuaires en représentent environ 60 km (Figure 15). Le littoral normand compte quatre estuaires remarquables :

- L'estuaire de la Seine entre le Havre et Honfleur,
- L'estuaire de l'Orne à Ouistreham,
- L'estuaire de la baie des Veys,
- L'estuaire de la baie du Mont-Saint-Michel.



Figure 15 : Localisation des havres (en bleu foncé) et des estuaires (en turquoise).

Les havres (ou marais maritime), se forment aux débouchés de zones marécageuses. Ils sont en constante évolution et sont fermés par des flèches sableuses (Figure 16 et Figure 17)¹⁶. Le long d'une partie de la façade ouest du département de la Manche, appelé « côte des havres », se trouve huit havres (du nord au sud) : le havre de Carteret, de Portbail, de Saint-Germain-Sur-Ay, de Surville, de Geffosses, de Regnéville, de Blainville et de la Vanlée.

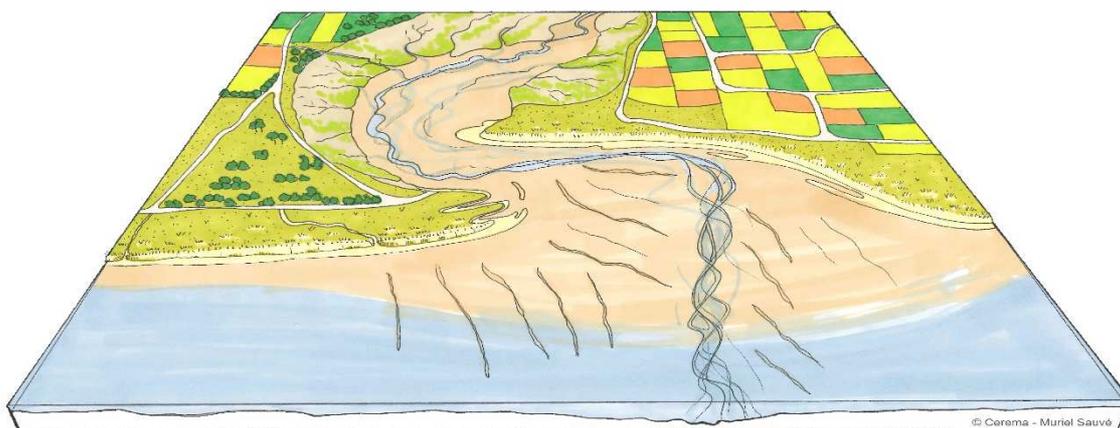


Figure 16 : Illustration d'un havre (dessin Muriel Sauvé, Cerema).

¹⁶ Cerema, « Dynamique et évolution du littoral, synthèse des connaissances du cap de la Hague à la pointe de Corsen. »

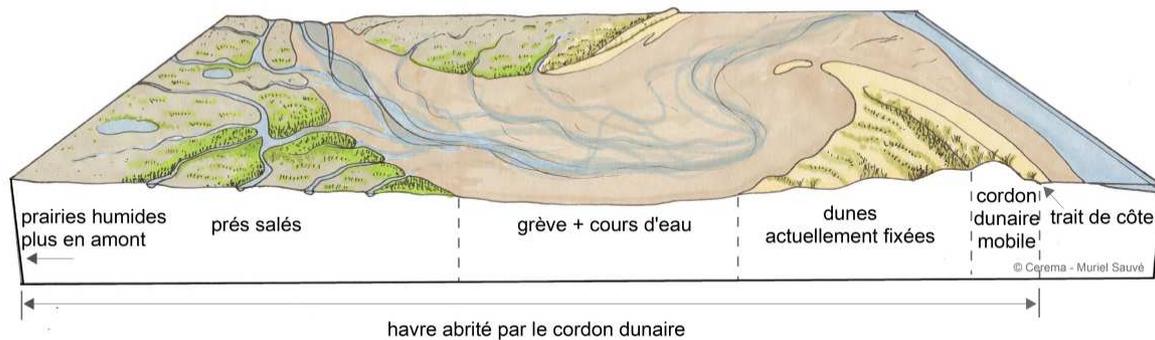


Figure 17 : Illustration détaillée d'un havre (dessin Muriel Sauvé, Cerema).

Ces secteurs ne sont pas pris en compte dans l'étude de l'évolution du trait de côte.

2.1.4 Les côtes artificielles

Une côte est considérée « artificialisée » lorsqu'elle supporte des ouvrages et des aménagements littoraux ou que son évolution est potentiellement influencée par des constructions¹⁷. Les secteurs ainsi artificialisés ont été répertoriés dans le cadre des travaux nationaux et représentent environ 200 km du linéaire côtier normand. (Figure 18). Ces secteurs ne sont pas pris en compte dans l'étude de l'évolution du trait de côte.



Figure 18 : Localisation des côtes artificialisées en Normandie.

¹⁷ Cerema, « Cartographie de l'artificialisation du trait de côte. Spécification technique du produit. »

2.2 L'exposition de la côte aux facteurs météo-marins

Synthèse

Hypothèses et limites identifiées

Le littoral normand est exposé à des facteurs météo-marins qui participent à l'érosion des côtes ou à leur submersion, influant ainsi sur la position du trait de côte.

Les facteurs météo-marins considérés sont les vents, les houles et les tempêtes. Les courants n'ont pas été pris en compte car leur impact relève plus du transit sédimentaire que d'une action érosive. De même, les précipitations étant homogènes sur l'ensemble de la Normandie, ce facteur n'a pas été pris en compte pour caractériser le littoral.

Pour les vents, les données suivantes ont été utilisées :

- Rose des vents aux sémaphores de 1973 à 2013
- Rose des vents en mer (modèle Arpège) de 1999 à 2013

Pour les houles, les outils suivants ont été analysés :

- Données CANDHIS (Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ)
- Réseau ANEMOC (Atlas Numérique d'États de Mer Océanique et Côtier)

Seules les données CANDHIS ont été retenues pour la caractérisation.

Pour les tempêtes, ce sont les tempêtes de références identifiées dans le document « Dynamique et évolution du littoral – Synthèse des connaissances » qui ont été prises en compte, à savoir les tempêtes de 1990 et de 1996.

Principaux résultats obtenus

L'impact de ces trois paramètres sur le littoral a été étudié individuellement ; puis une synthèse a été produite en fonction du caractère majoritaire « **exposé** » ou « **abrité** » des côtes. Ce critère sera pris en compte pour la typologie des côtes normandes.



2.2.1 L'orientation de la côte

La connaissance de l'orientation du trait de côte est nécessaire pour évaluer l'effet des agents érosifs. En effet, le vent couplé aux précipitations et à la houle n'auront pas le même impact selon si la côte est face ou non à la direction principale de ces phénomènes. Un découpage des côtes a donc été réalisé au préalable suivant les 8 points cardinaux à l'aide d'un modèle logique (Figure 19) ; il en a résulté un découpage en 8 classes réparties sur 360° (Figure 20).

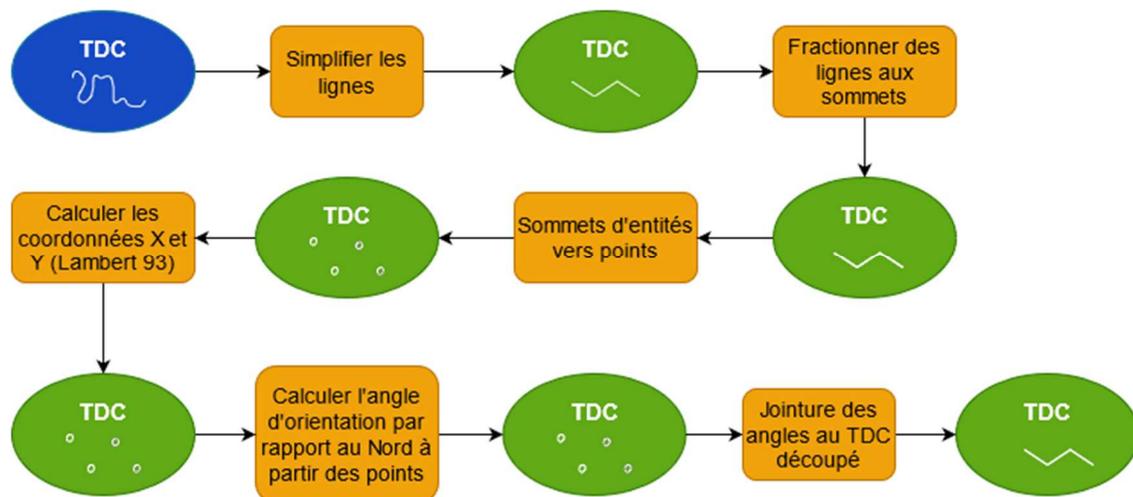


Figure 19 : Modèle du découpage des côtes selon les huit points cardinaux.

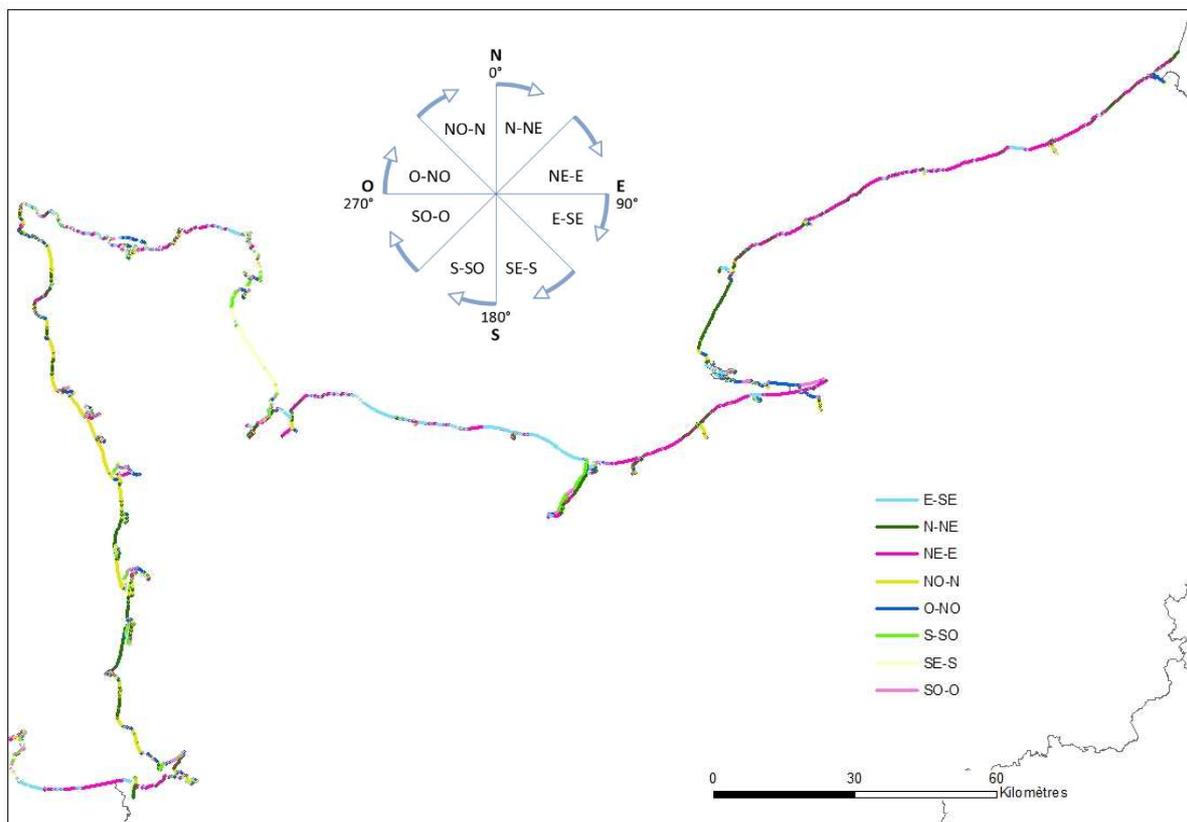


Figure 20 : Découpage des côtes selon les huit classes d'orientation.

L'exposition de la côte tient compte également des formes du trait de côte alentours qui peuvent abriter naturellement une côte initialement classée comme exposée et *vice-versa*. Ce second découpage a été effectué par photo-interprétation.

Les ouvrages n'ont pas été considérés.

2.2.2 Les agents morphodynamiques

Les processus d'érosion et/ou submersion sont causés en partie par l'action d'agents d'origine météorologique et marine. Ils peuvent agir séparément ou ensemble. Les principaux facteurs en jeu sont les suivants :

- Le vent alimente la puissance des agents érosifs et submersifs : il participe à la formation de la houle, à la force d'impact et l'orientation des précipitations sur la côte, ainsi qu'à la portée des embruns. La force du vent, sa direction et sa durée sont à prendre en compte pour déterminer l'action érosive qui lui est attribuée.
- La houle : les vagues se forment principalement sous l'action des vents. La houle augmente auprès des côtes. Selon la topographie du fond marin la vague va déferler (dans le cas des côtes sableuses et des marées basses des autres types de côte) ou venir se casser sur la falaise et les côtes rocheuses à marée haute. La hauteur et l'orientation de la houle sont à prendre en compte pour déterminer l'action qui lui est attribuée.
- Les tempêtes exacerbent le pouvoir érosif et submersif des agents précédemment cités. Les deux tempêtes majeures référencées dans la Synthèse des connaissances des côtes françaises sont prises en compte.
- Les courants : la vitesse des courants dépend de la bathymétrie et de la configuration de la côte (exposée, abritée, apport d'eau par les rivières, etc.). Les courants sont souvent générés par la houle et le déferlement de vagues. Ils participent au transit sédimentaire.
- La température et les précipitations : les alternances gel/dégel fragilisent les parois rocheuses. Cependant, les périodes de gel étant plutôt rares sur le littoral normand, ce paramètre, négligeable, ne sera pas considéré. Il n'en reste pas moins que ce phénomène peut avoir un rôle certain lors d'hivers rigoureux. Les précipitations fortes ou abondantes fragilisent également les parois calcaires et érodent les dunes, en particulier lorsqu'elles sont accompagnées de vents. Néanmoins, ce paramètre étant uniforme à l'échelle de la Normandie, il n'a pas été utilisé pour caractériser les côtes.

L'exposition du littoral à ces facteurs météo-marins est réalisée à partir du découpage des côtes selon leur orientation (Figure 20). Les côtes sont classées comme « exposées » ou « abritées » : une côte considérée comme « exposée » est une côte soumise, de par son orientation, aux événements les plus intenses servant alors de référence (vents forts, orientation principale de la houle, tempêtes de référence). Ces événements considérés ne comprenant pas l'ensemble des événements existants : ainsi, une côte classée comme « abritée » ne signifie pas que la côte n'est pas soumise aux agents mais que leur impact est moindre vis-à-vis d'une côte « exposée ».

2.2.2.1 Les vents

Les mesures de vent utilisées sont enregistrées par les principaux sémaphores. Les sémaphores sont des centres militaires chargés de la gestion du trafic maritime commercial. Ils ont aussi en charge la mesure à terre de paramètres climatiques, dont le vent. Les mesures sont présentées sous forme d'une rose des vents aux sémaphores (données de 1973 à 2013) et en mer (modèle Arpège¹⁸, données de 1999 à 2013).

Les 3 sémaphores de référence en Normandie sont Dieppe, le Cap de la Hève et le Cap de la Hague (Figure 21). Le sémaphore de référence suivant à l'ouest est celui de Ploumanac'h. Il se situe à 140 km de la limite régionale Normandie / Bretagne contre 120 km pour le sémaphore de la Hague. Compte-tenu de son éloignement géographique, le sémaphore de Ploumanac'h n'a pas été pris en compte.

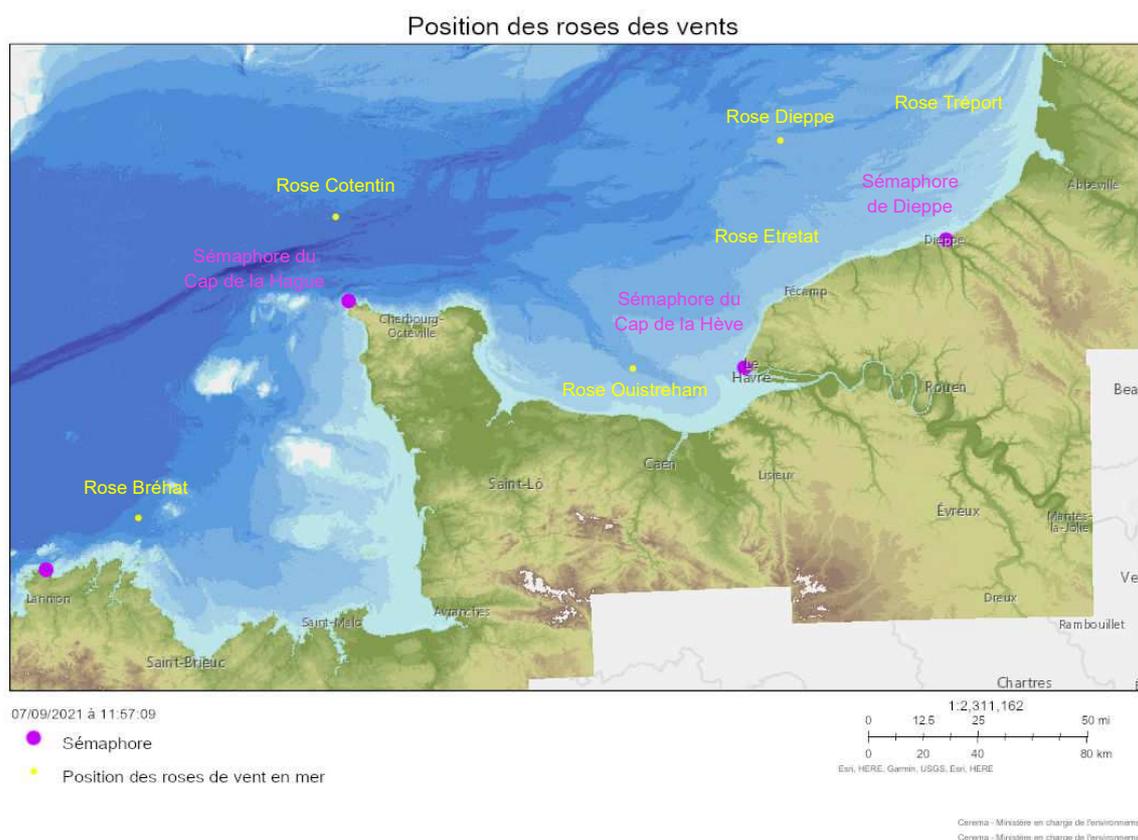


Figure 21 : Localisation des sémaphores et des roses des vents en mer sur la façade normande¹⁹.

La limite de l'emprise concernée par les roses des vents correspond à l'équidistance entre chacune d'entre elles. Seule l'exposition de la côte vis-à-vis des vents les plus forts est prise en compte pour réaliser le découpage sectoriel ; les secteurs de côtes exposées aux vents les moins impactant et aux vents nuls ont été supprimés.

¹⁸ Le modèle Arpège est un modèle numérique de prévision, opérationnel à Météo-France. C'est un modèle global ayant une résolution d'environ 7,5 km sur la France. Plusieurs roses des vents en mer sont disponibles pour la Normandie. Les valeurs de légende correspondent à l'échelle de Beaufort.

¹⁹ Cerema, « Dynamique et évolution du littoral : Synthèse des connaissances des côtes françaises ».

Dans les tableaux de mesures de vents, présentés ci-après d'est en ouest (Figure 22 à Figure 29), les directions où il y a eu la plus grande quantité de vent cumulée, quelle que soit la puissance, sont entourées en rouge. Les directions où les vents les plus forts ont été enregistrés sont en bleu.

- Au large du Tréport :

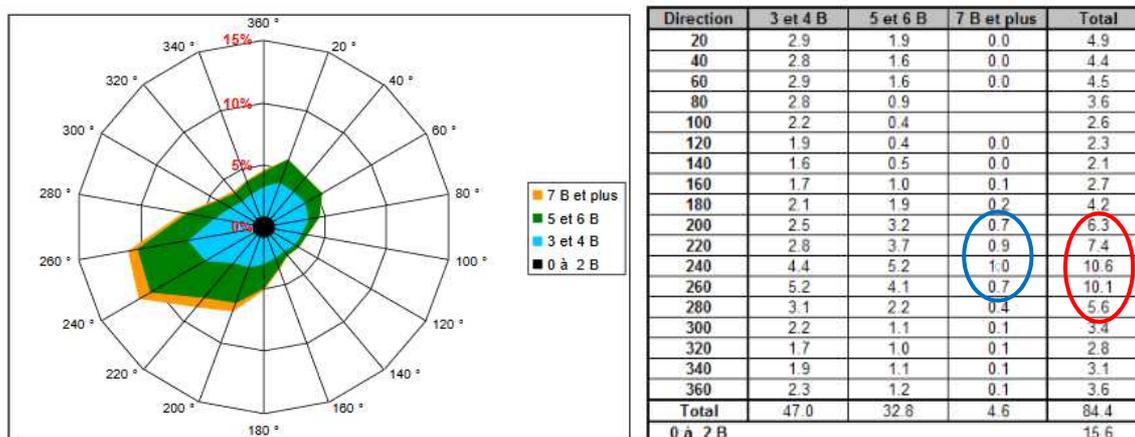


Figure 22 : Mesure des vents au large du Tréport (modèle Arpège – 1999-2013).

- Au sémaphore de Dieppe : le sémaphore de Dieppe est la référence pour le secteur compris entre Le Tréport et Saint-Pierre-en-Port. Sur ce secteur, les vents sont « tous azimuts » avec d'importantes quantités en provenance est/nord-est, sud et est. En revanche les vents forts, qui sont les plus impactants, sont tous orientés entre 240° et 280° soit ouest/sud-ouest.

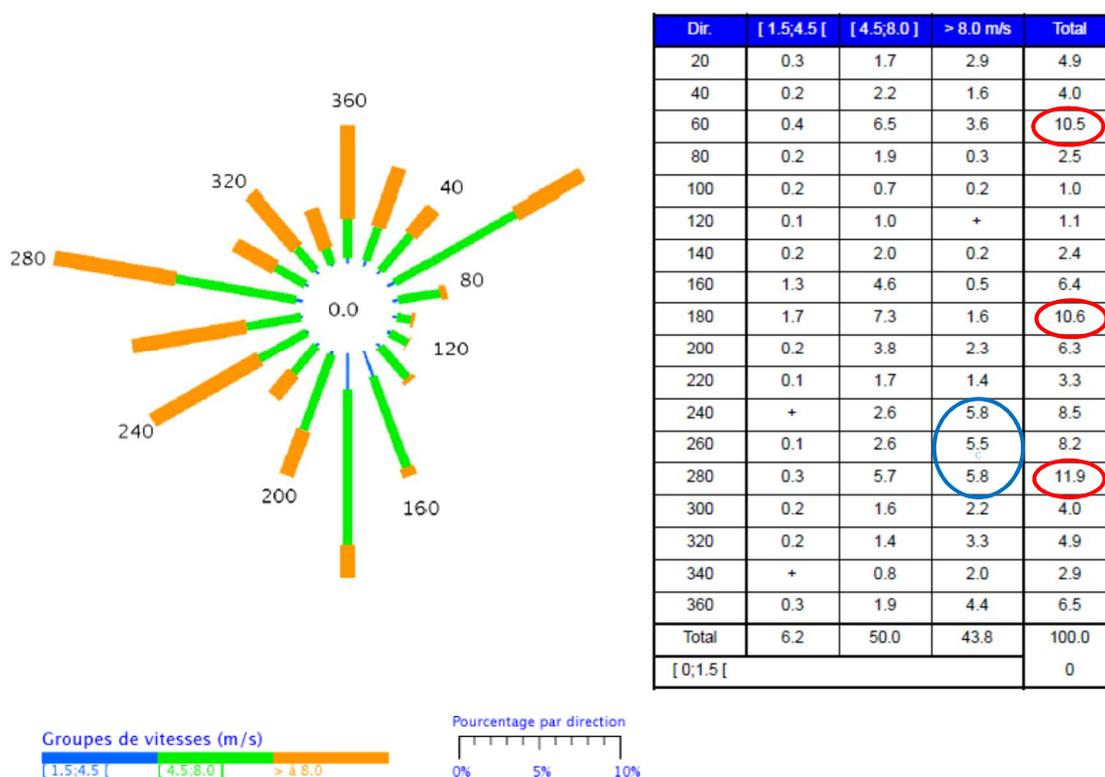


Figure 23 : Mesure des vents à Dieppe (1973-2013).

- Au large d'Étretat :

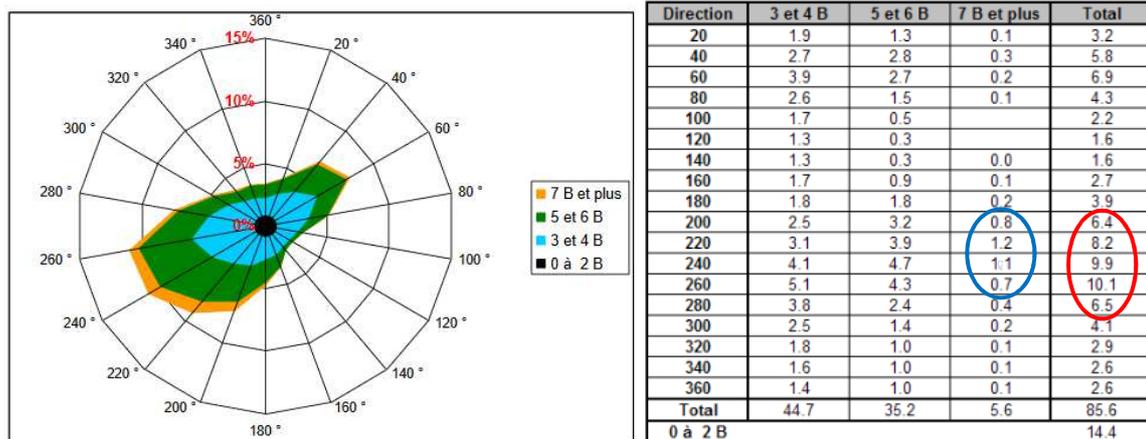


Figure 24 : Mesure des vents au large d'Étretat (modèle Arpège – 1999-2013).

- Au sémaphore du Cap de la Hève : le sémaphore du Cap de la Hève est la référence pour le secteur compris entre Saint-Pierre-en-Port et la pointe du Hoc. Quantité et force des vents sont étroitement corrélées : ce sont les vents entre 200° et 260°, soit des vents de sud-ouest, qui sont les plus nombreux et les plus violents.

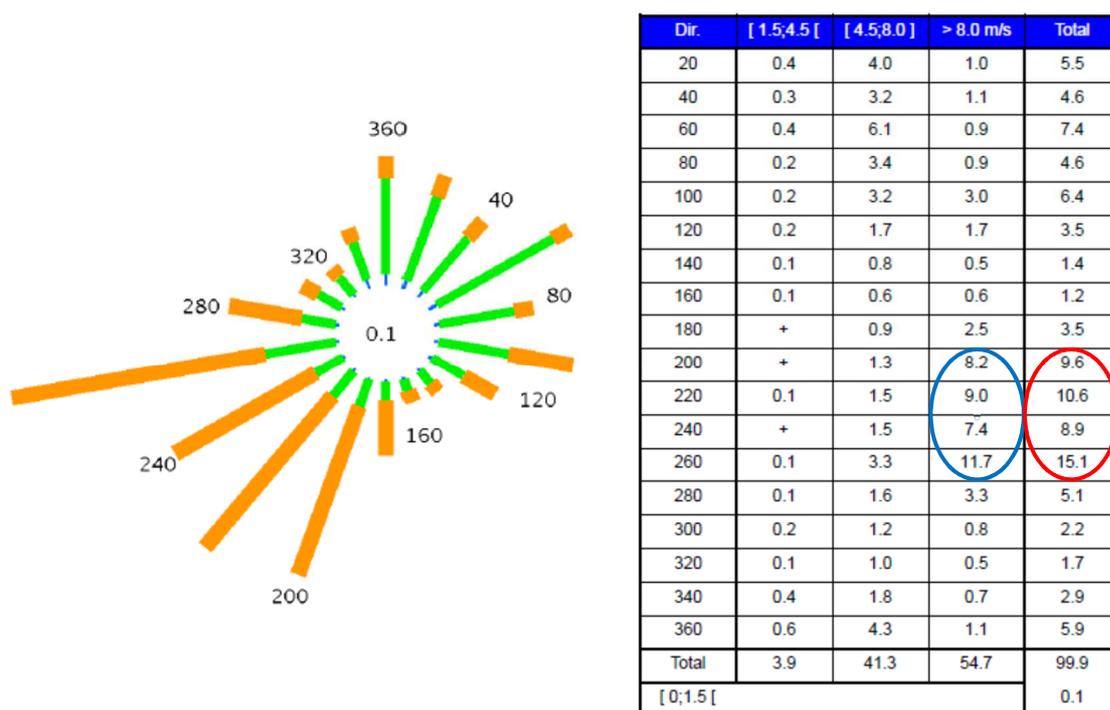


Figure 25 : Mesure des vents au Cap de la Hève (1973-2013).

- Au large de Ouistreham :

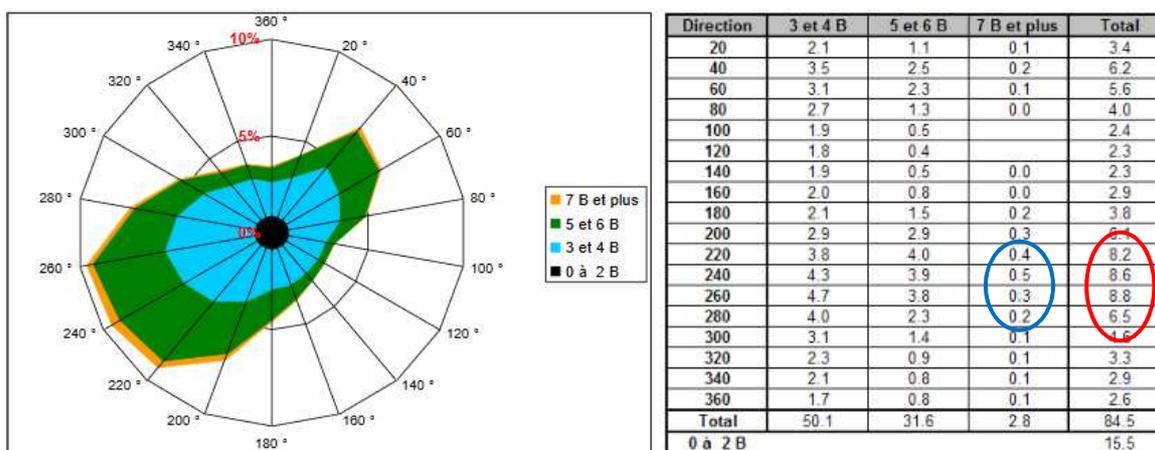


Figure 26 : Mesure des vents au large de Ouistreham (modèle Arpège – 1999-2013).

- Au sémaphore du Cap de la Hague : le sémaphore du Cap de la Hague est la référence pour le secteur compris entre la pointe du Hoc et la baie du Mont-Saint-Michel. Sur ce secteur, les vents les plus forts sont de sud/sud-ouest. Quantité et force des vents sont corrélées : ce sont les vents entre 180° et 260°, soit des vents de sud-ouest, qui sont les plus nombreux et les plus violents à terre. La rose des vents de la Hague présente majoritairement des vents violents, et ce dans toutes les directions.

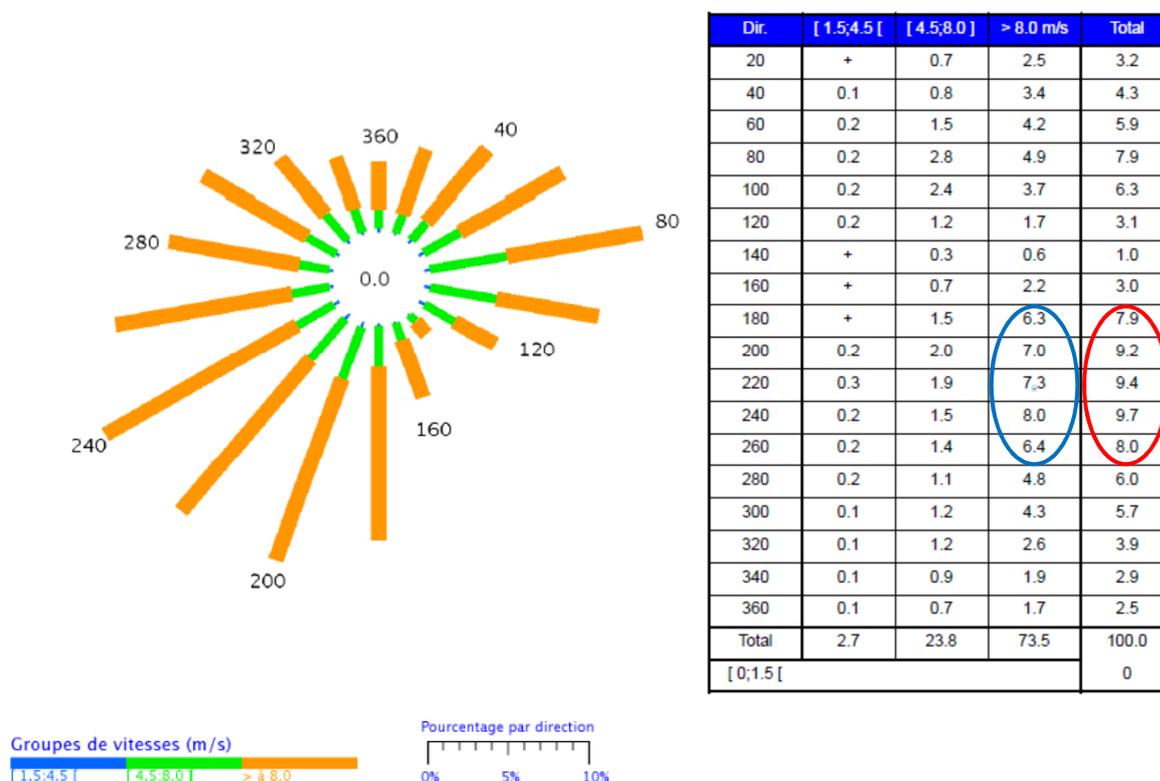


Figure 27 : Mesure des vents au Cap de la Hague (1973-2013).

- Au large du Cotentin (Pointe de la Hague) :

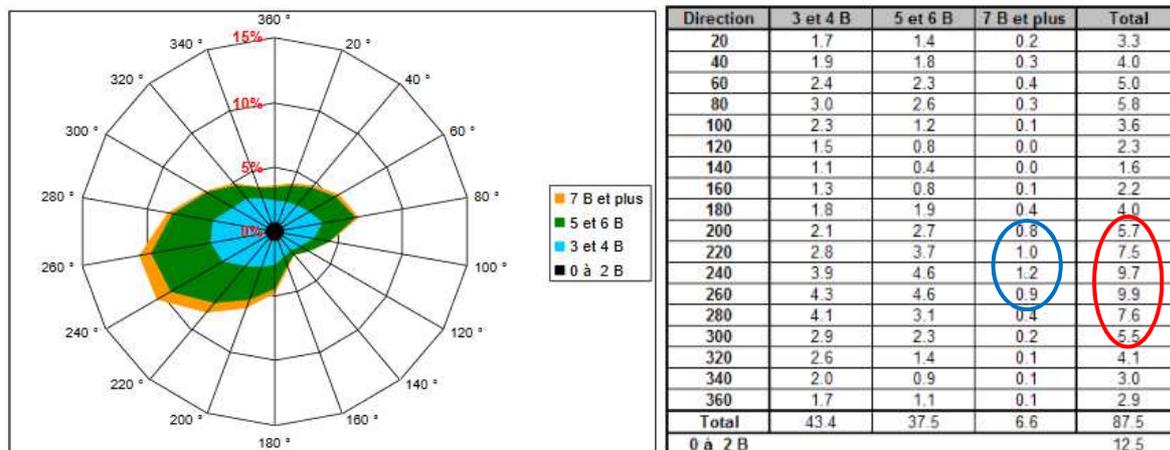


Figure 28 : Mesure des vents au large de la Pointe de la Hague (modèle Arpège – 1999-2013).

- Au large de Bréhat :

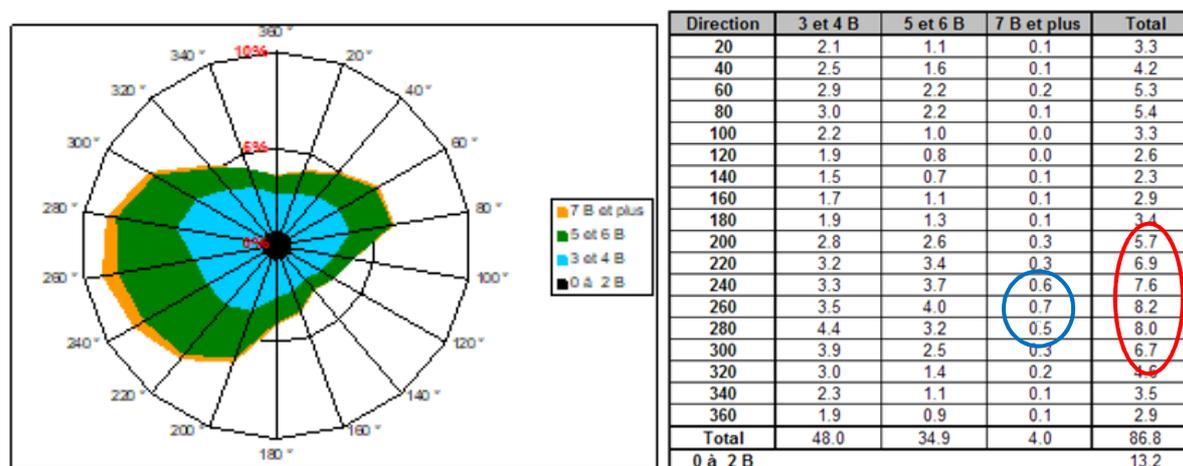


Figure 29 : Mesure des vents au large de Bréhat (modèle Arpège – 1999-2013).

La provenance des vents et leur intensité en mer sont similaires au niveau de toutes les stations à terre et en mer : les vents les plus impactants présentent une direction comprise entre 220 et 260° soit des vents de sud-ouest.

Ainsi, un découpage des côtes en fonction de leur orientation face aux vents dominants de sud-ouest est proposé (Figure 30). Le littoral entre Le Tréport et Le Havre alterne entre côtes exposées et abritées. Le secteur du Havre à la Hague est exclusivement abrité tandis qu'entre La Hague et la frontière bretonne l'alternance côtes exposées / côtes abritées est à nouveau présente (Figure 30).



Figure 30 : Découpage de la côte normande selon l'exposition aux vents dominants.

2.2.2.2 Les houles, mesures *in situ* Candhis

Les houles sont, en partie, responsables du transit sédimentaire lorsque les vagues ont un angle d'incidence oblique au trait de côte. Elles sont morphogènes, c'est-à-dire qu'elles participent, de façon active, aussi bien à l'érosion qu'à l'accrétion des côtes. Elles jouent également un rôle important lors des phénomènes de submersion par débordement.

Les données CANDHIS (Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ) sont issues d'un réseau national côtier de mesures de houle *in situ*, géré par le Cerema. Deux stations de mesures de houles sont présentes en Normandie, l'une au large du Havre et l'autre au large de Cherbourg (Figure 31 et Figure 32). Le pourcentage indiqué sur les roses des houles présentées ci-après correspond au pourcentage de mer avec des houles dont la hauteur significative est inférieure à 0,25 mètres.

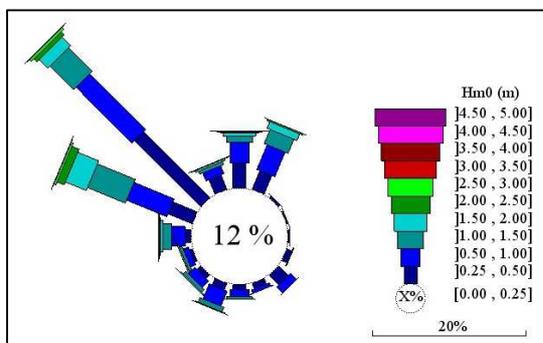


Figure 31 : Rose des houles au large du Havre.

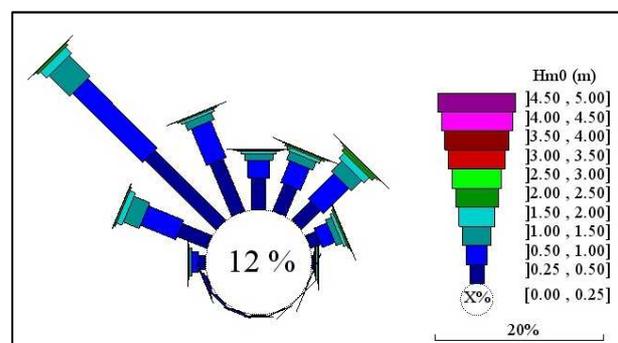


Figure 32 : Rose des houles au large de Cherbourg.

D'après les mesures *in situ* au large, les houles les plus fréquentes et de plus forte amplitude proviennent du secteur nord-ouest au Havre comme à Cherbourg. Les houles nord-ouest sont donc la référence pour la Normandie.

Un découpage des côtes en fonction de leur orientation face aux houles dominantes de nord-ouest est proposé (Figure 33). L'ensemble des côtes normandes est globalement exposé aux houles dominantes, excepté le secteur situé entre Barfleur et la Baie des Veys.

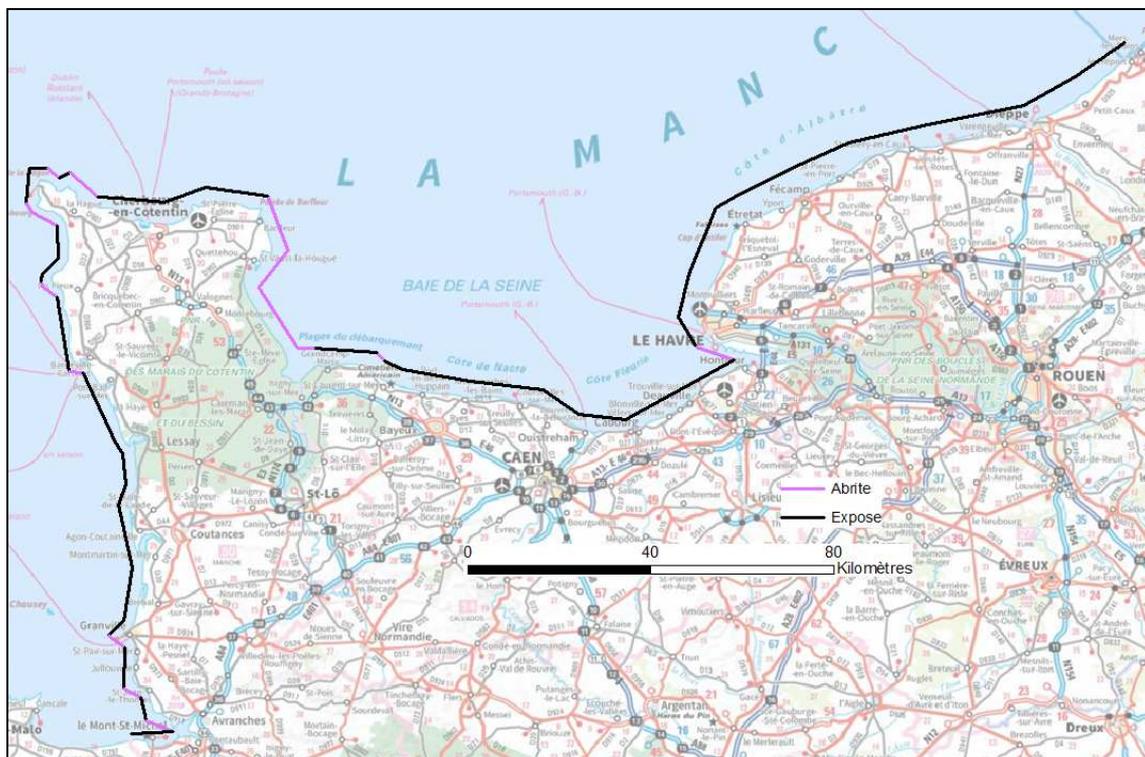


Figure 33 : Exposition des côtes normandes selon les houles dominantes de nord-ouest.

2.2.2.3 Les tempêtes

Des tempêtes de référence ont été identifiées dans la *Synthèse des connaissances des côtes françaises*. Elles sont spécifiques à chaque province sédimentaire et sont issues du modèle de simulations numériques ANEMOC de Météo-France. Pour éviter les effets de bord liés à la limite du modèle à terre, seuls les points ANEMOC situés à au moins une dizaine de kilomètres en mer sont considérés ici. Sur le littoral, les hauteurs sont donc très probablement moindres qu'au large.

Pour le secteur **de la pointe du Hourdel au cap de la Hague**, les deux tempêtes de référence ont eu lieu en 1990 et 1996.

- Tempête du 25 janvier 1990 : les vagues d'ouest sont très hautes sur la pointe de la Manche (entre 7 et 8 m au cap de la Hague) puis moins hautes sur le reste de la région : 4 à 5 m entre Etretat et Dieppe). Globalement la baie de Seine est abritée de ces vagues d'ouest (Figure 34).
- Tempête du 20 février 1996 : les vagues de nord / nord-est sont très hautes sur Cherbourg et la pointe de Barfleur (5,1 à 5,3 m). Les secteurs de la Hague, Arromanches et Fécamp sont également soumis à des vagues de 4 à 5 m de hauteur (Figure 35).

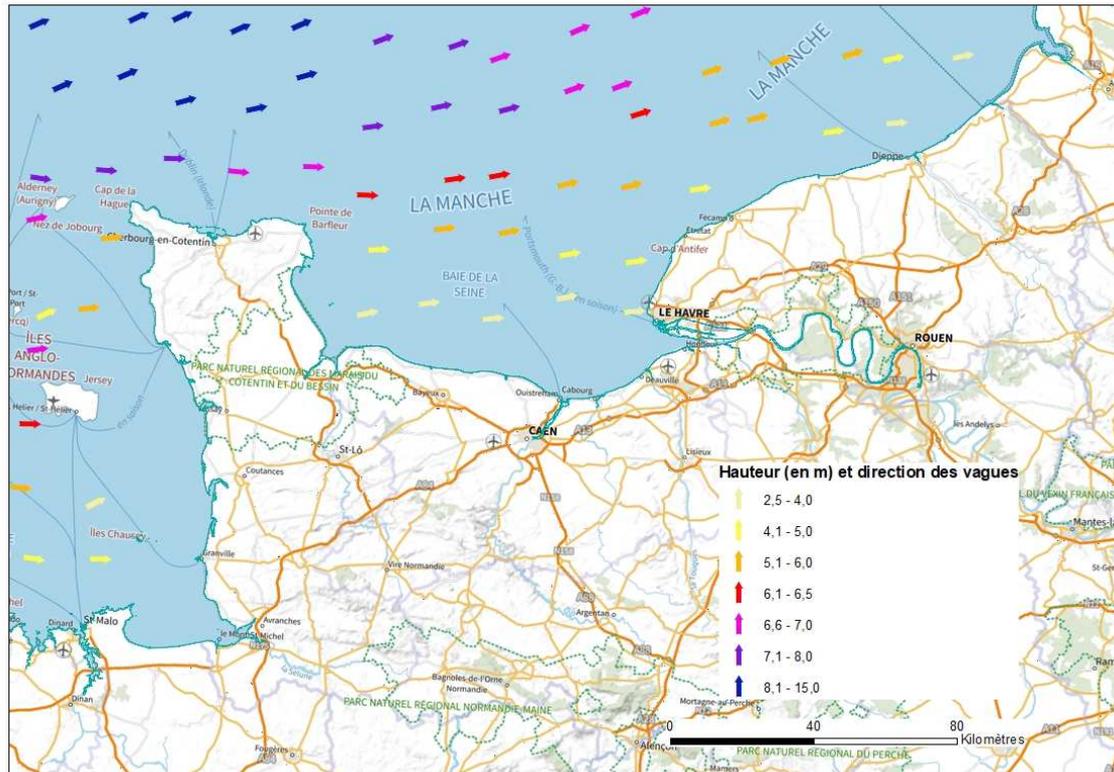


Figure 34 : Hauteur et direction des vagues durant la tempête de référence du 25 janvier 1990 pour les côtes de la pointe du Hourdel au cap de la Hague.

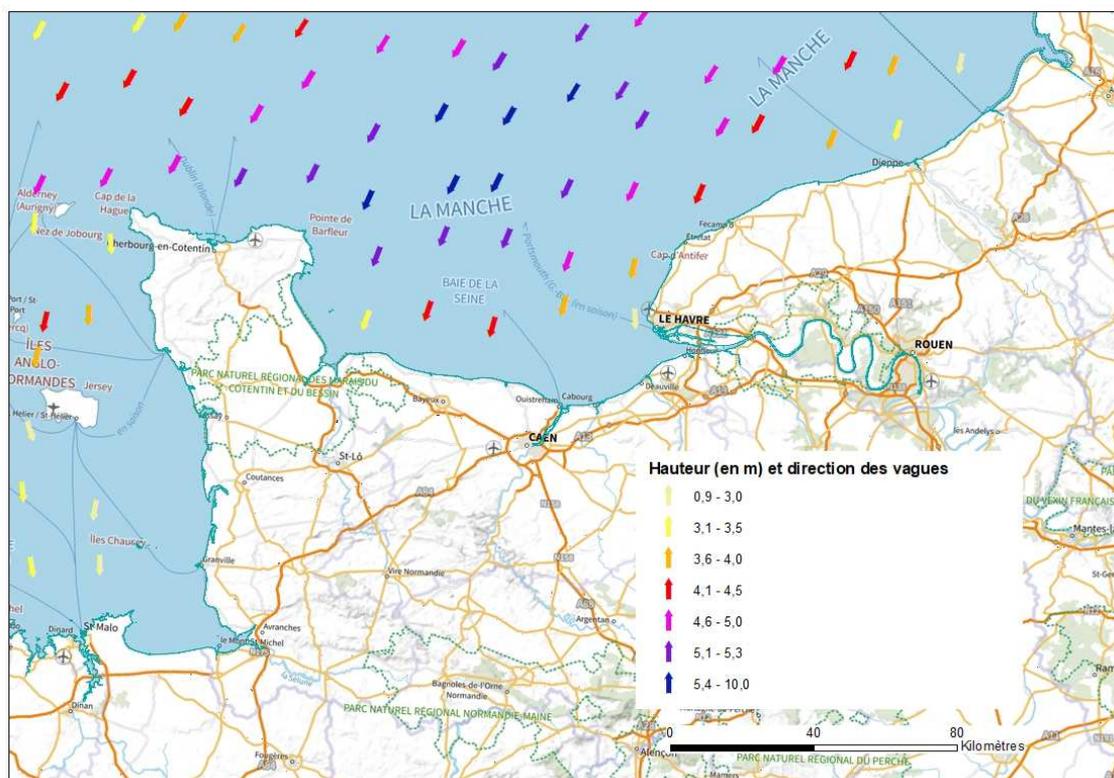


Figure 35 : Hauteur et direction des vagues durant la tempête de référence du 20 février 1996 pour les côtes de la pointe du Hourdel au cap de la Hague.

Le découpage de ce secteur selon les tempêtes de 1990 et 1996 peut donc être réalisé par suppression des côtes exposées aux vagues les moins impactantes ou nulles. L'orientation des vagues de la tempête de 1996 est néanmoins exceptionnelle puisque :

- Deux tempêtes significatives (1990, 1979) sur trois (1990, 1979, 1996) sont orientées ouest,
- Les hauteurs de vagues sont plus élevées entre 1990 et 1979 qu'en 1996 (entre 4 et 5 m maximum pour la tempête de 1996 contre 6 à 7 m maximum pour la tempête de 1990 et 6 à 8 m maximum pour la tempête de 1979),
- D'après les roses des vents, les vents d'ouest et de sud-ouest sont très largement dominants parmi les vents forts, aussi bien en quantité qu'en puissance.

C'est pourquoi il est choisi de réaliser une synthèse de l'exposition des côtes du secteur de la pointe du Hourdel au cap de la Hague aux tempêtes suivant le modèle de celle de 1990, et donc en tenant compte des vagues d'ouest.

Pour le secteur **du cap de la Hague à la limite régionale Normandie/Bretagne**, la tempête de référence est celle du 15 décembre 1979. Lors de cette tempête, les vagues d'ouest sont très hautes sur la pointe nord du Cotentin (6 à 8 m entre Barneville Carteret et La Hague) et plus basses au sud (de 2 à 4 m au niveau de Granville) (Figure 36).

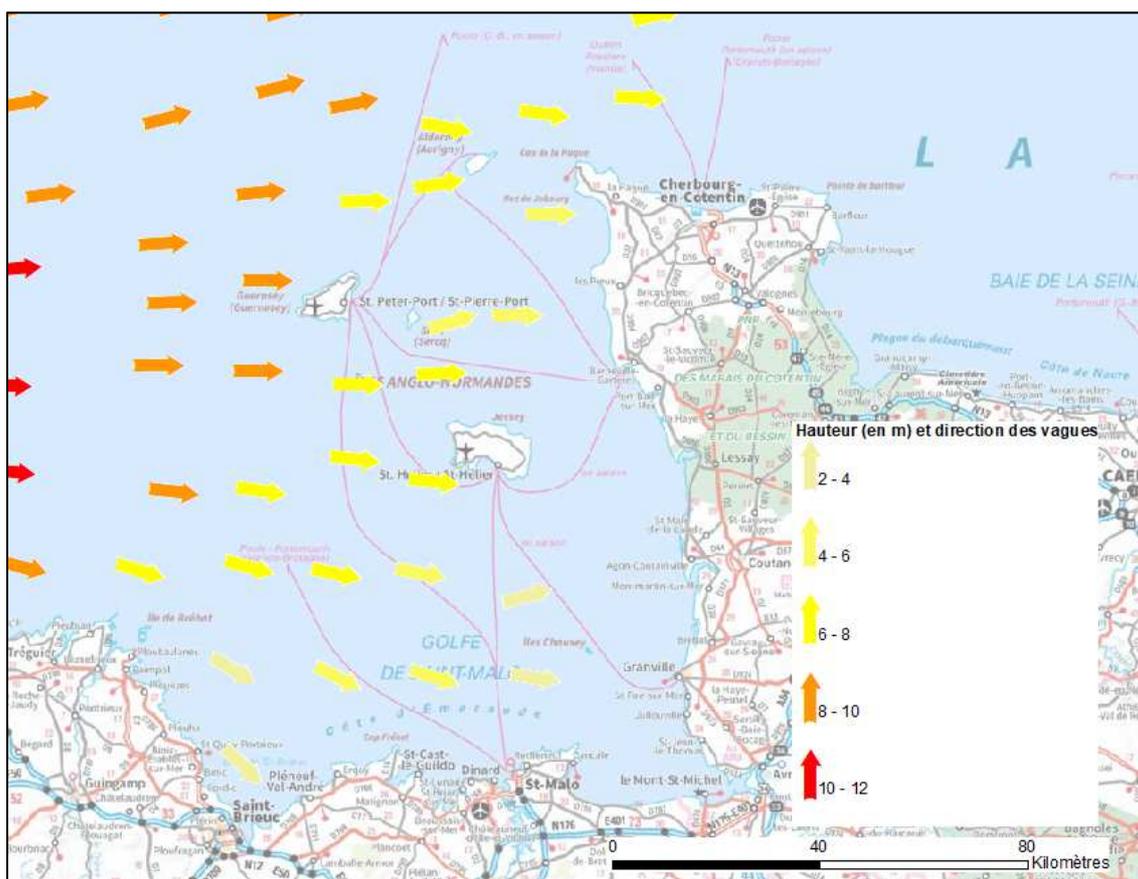


Figure 36 : Hauteur et direction des vagues durant la tempête de référence du 15 décembre 1979 pour le cap de la Hague à la limite régionale Normandie / Bretagne.

Sur l'ensemble de la Normandie, ce sont donc les vagues d'ouest qui sont dominantes lors de tempêtes. Ainsi, les secteurs situés entre Cabourg et Saint-Pierre-Église et entre Cherbourg et La Hague sont abrités tandis que le reste de la région est exposé (Figure 37).

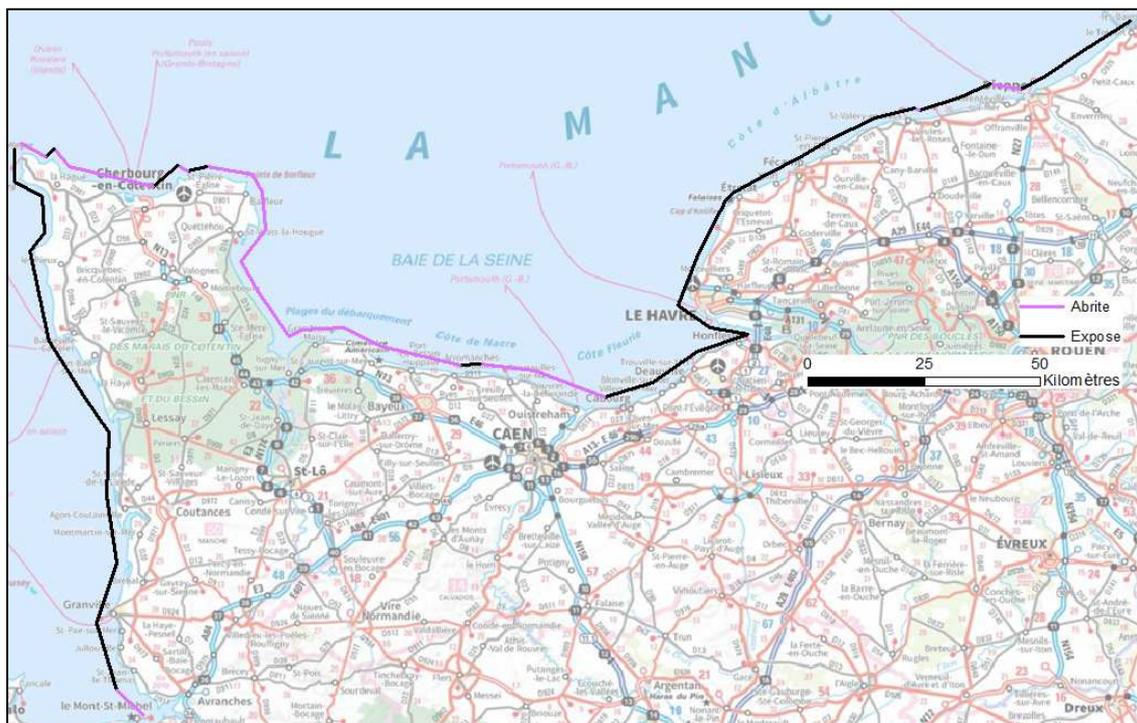


Figure 37 : Découpage des côtes normandes selon l'exposition aux tempêtes de référence.

2.2.2.4 Les précipitations

L'eau de pluie est un facteur d'érosion sur les falaises rocheuses et les côtes sableuses. Son action est particulièrement importante sur les falaises crayeuses par effet d'infiltration et de ruissellement. En Normandie, les précipitations sont importantes et fréquentes.

Les diagrammes ombrothermiques des principales stations météorologiques présentent la répartition annuelle des précipitations et certaines le un maximum hivernal à la station sur la période 2001-2010 (Figure 38 et Figure 39). Les précipitations sont en quantité plus importante sur la pointe de la Hague et Cherbourg-Octeville (supérieure à 100 mm certains mois) que sur le reste de la basse Normandie (systématiquement inférieure à 100 mm). Les précipitations sont mieux réparties sur le Calvados et la Haute-Normandie que sur la Manche qui présente une grande quantité de précipitations hivernales d'octobre à janvier entre 1981 et 2010.

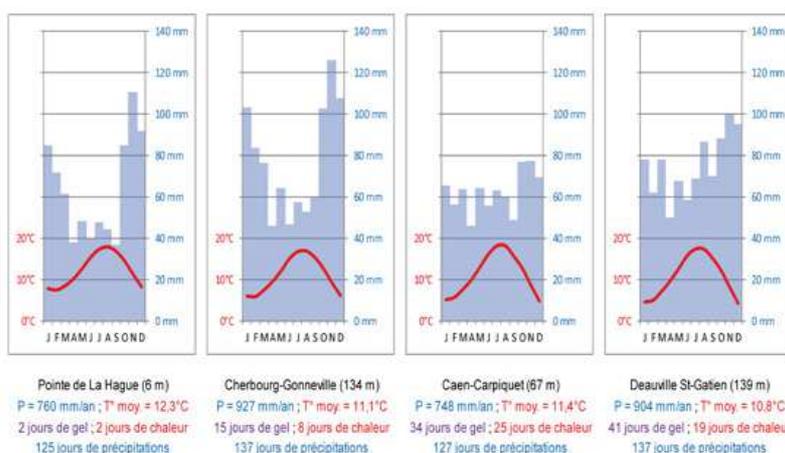


Figure 38 : Diagrammes ombrothermiques et principaux caractères climatiques sur la période 2001-2010 pour les stations de La Hague, Cherbourg-Gonneville, Caen-Carpique et Deauville St-Gatien (réalisation O.Cantat, Univ. Caen Normandie, d'après données Météo-France – Synthèse des connaissances des côtes françaises (F4).

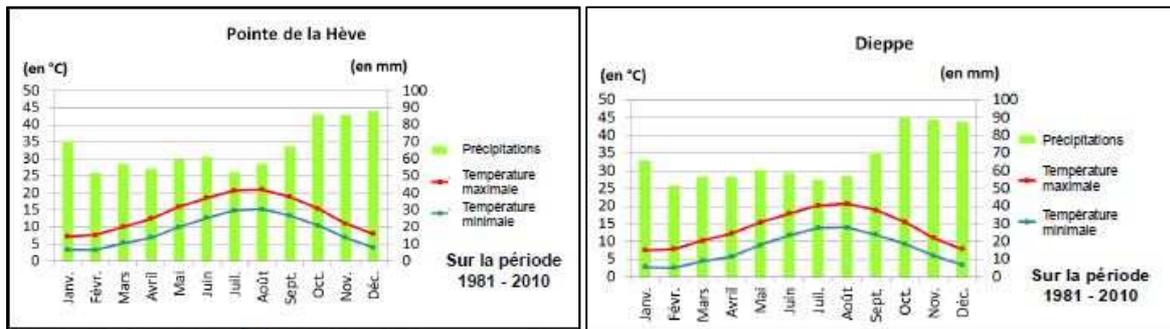


Figure 39 : Diagrammes ombrothermiques sur la période 2001-2010 à la pointe de la Hève et à Dieppe (extrait de la carte de climatologie atmosphérique – Synthèse des connaissances des côtes françaises – F4).

Les données de ces diagrammes ombrothermiques montrent que les hivers semblent être plus arrosés dans la Manche que sur le reste de la région. Cependant, le facteur précipitation alimente les mécanismes d'érosion sur tous les départements normands. Aussi, **le paramètre précipitation, étant largement présent et relativement homogène en Normandie, n'est pas pris en compte pour la caractérisation des côtes pour cette étude.**

2.2.3 Résultats

Les trois facteurs pour la caractérisation du trait de côte selon des critères morphodynamiques sont les vents, les houles et les vagues dominants. En combinant ces trois facteurs, une portion de côte ayant au moins deux caractérisation comme étant « exposée » au paramètre est classée comme telle, et inversement.

Ainsi, la synthèse du découpage du littoral normand selon les paramètres météo-marins met en évidence trois grands secteurs délimités par Cabourg et La Hague (Figure 40) : deux secteurs plutôt « exposés » du Tréport à Cabourg et de La Hague à la baie du Mont-Saint-Michel, et un secteur relativement « abrité » entre Cabourg et La Hague.

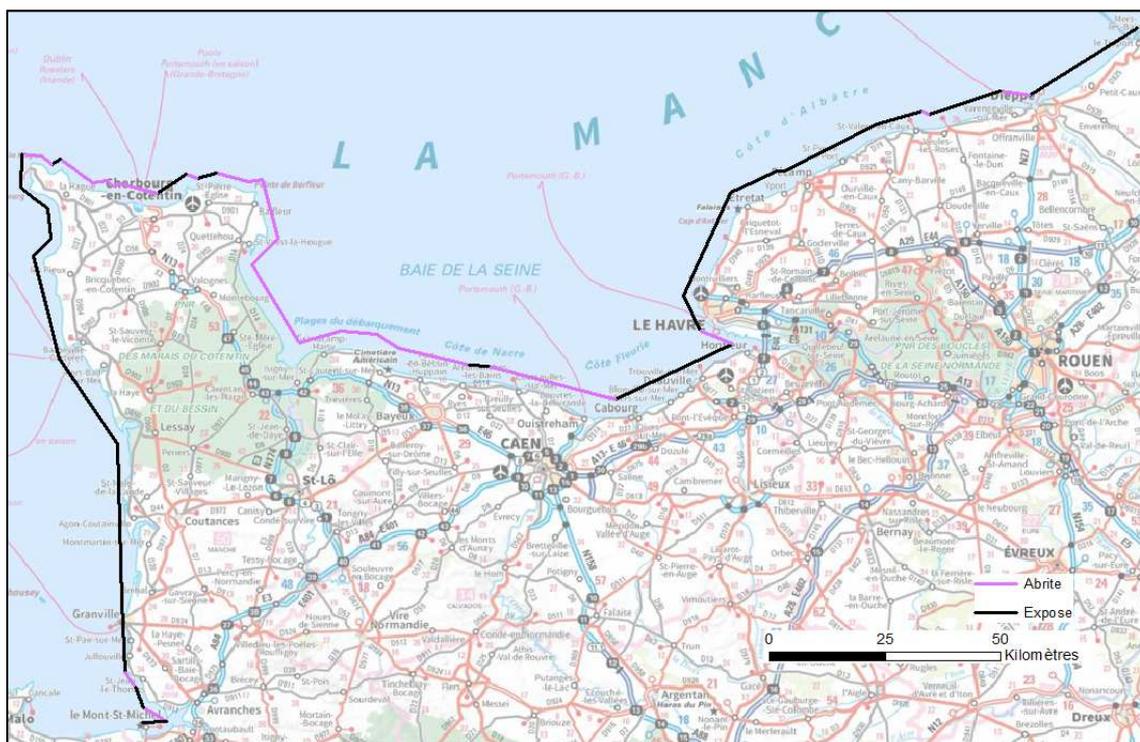


Figure 40 : Synthèse du découpage des côtes normandes selon les facteurs météo-marins.

2.3 La géologie et les mécanismes d'évolution de la côte et de l'estran

2.3.1 Géologie

La géologie de la Normandie est très variée. Elle est majoritairement d'origine sédimentaire en Seine-Maritime et dans le Calvados et d'origines magmatique et métamorphique dans la Manche

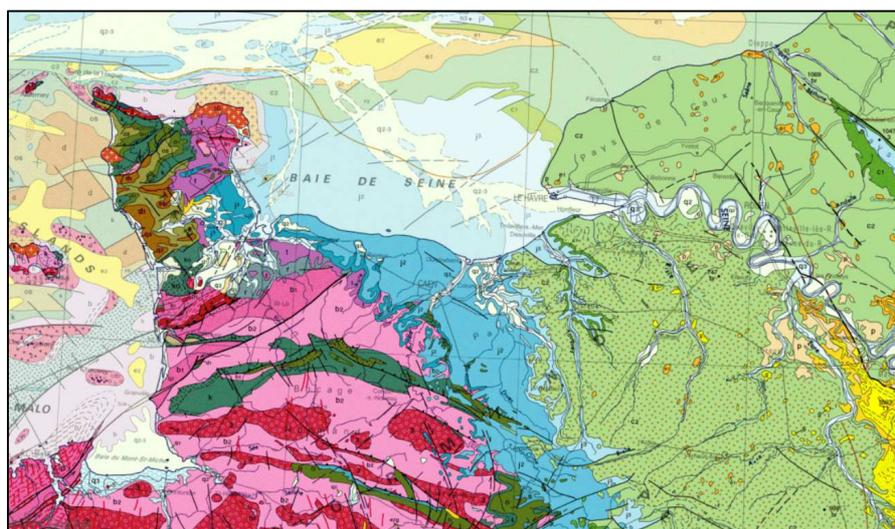


Figure 41 Carte géologique de la Normandie

L'analyse de la géologie s'est basée sur l'étude des cartes géologiques imprimées au 1/50 000 disponibles sur InfoTerre²⁰, à savoir celles de :

- N°93 – Bricquebec
- N°116 – La-Haye-du-Puits
- N°142 – Coutances
- N°172 – Granville
- N°208 – Baie-du-Mont-Saint-Michel
- N°0073N - Saint Vaast La Hougue
- N°0093N – Bricquebec Surtainville
- N°0072N – Cherbourg
- N°57 – Fécamp
- N°74 – Montivilliers Etretat

Il a été choisi de classer les côtes selon les 3 types de roches :

roche sédimentaire / roche métamorphique / roche magmatique.

Afin de vérifier ou préciser les limites entre les différents types de roches, les informations des cartes géologiques ont été complétées par d'autres sources d'informations, notamment :

²⁰ BRGM, « Cartes géologiques ».

- Des ouvrages et études :
 - L'ouvrage « Dynamiques et évolution du littoral – Synthèse des connaissances des côtes françaises »,
 - L'Indicateur national de l'érosion côtière,
 - Des thèses locales,
 - L'étude du recul du trait de côte en Seine-Maritime,
 - Les PPR,
 - L'étude du sentier littoral dans le Bessin,
 - Les inspections des campings littoraux du Calvados.
- Des photographies :
 - Les images Google Earth, permettant de visualiser les photos aériennes en 3D,
 - Les photographies internes aériennes (drones) ou prises depuis l'estran,
 - Les photographies des falaises de Seine-Maritime prises depuis la mer (campagnes 2018 sur bateau de la Gendarmerie Maritime).

2.3.2 Nature de l'estran

Les données géologiques ont été croisées avec les données surfaciques qualifiant la nature de l'estran (hors estran artificiel) issues des Atlas de sensibilité établis dans le cadre de Polmar-Terre. Ces données ont été complétées par les informations recueillies dans la bibliographie ainsi que par les observations faites sur les photographies aériennes, notamment pour les secteurs en enrochements et pour des zones dont la donnée n'est pas disponible dans Polmar-Terre.

La classification suivante a été retenue pour être couplée aux secteurs géologiques identifiés :

- Platier rocheux
- Schorre
- Sédiments sablo-vaseux (regroupe les sédiments vaso-sableux et vaseux)
- Sables
- Galets
- Blocs
- Eboulis

2.3.3 Mouvements de terrain

La base de données mouvements de terrain (BD MVT) disponible sur InfoTerre²¹ a été consultée pour identifier des évènements survenus et recensés sur la frange littorale (chute de petits blocs isolés ou d'un éboulement de masse). De même, l'ouvrage de la « Dynamiques et évolution du littoral – Synthèse des connaissances des côtes françaises » ainsi que des thèses et études précédemment citées ont également constitué des sources d'informations.

L'analyse des évènements a mis en évidence que les mouvements de terrain sont inhérents au type de roche ; chaque type de roche évolue de façon similaire tant en mécanisme qu'en

²¹ BRGM, « Mouvements de terrain ».

vitesse. Aussi, il a été choisi de ne conserver que la donnée « type de roche » pour la classification géologique des côtes rocheuses normandes.

Deux exceptions sont faites pour des secteurs de falaises ayant une évolution particulière ; sur ces secteurs, la projection du trait de côte sera adaptée à leur mécanisme évolution (voir 3.3.1.3). Il s'agit des falaises :

- Des Vaches Noires à Villers-sur-Mer,
- De Trouville-Villerville-Criqueboeuf.

2.3.4 Synthèse des paramètres géologiques

Les côtes normandes ont été classifiées selon les paramètres « Type de roche », appliqué uniquement sur les côtes rocheuses, et « Nature de l'estran » appliqué sur l'ensemble du littoral.

2.4 Définition de la typologie des côtes normandes

Synthèse

Rappel des critères considérés

La typologie des côtes normandes permet de déterminer les zones géographiques où la côte naturelle est semblable et donc susceptible d'évoluer de manière similaire.

Cette typologie est la synthèse des 3 familles de critères naturalistes :

1. La morphologie de la côte (voir 2.1),
2. L'exposition de la côte aux facteurs météo-marins (voir 2.2),
3. La géologie et les mécanismes d'évolution de la côte et de l'estran (voir 2.3).

L'impact éventuel des ouvrages ou autre action humaine n'est pas un critère qui a été retenu pour la définition de cette typologie naturaliste.

Méthodologie et limites identifiées

Le travail cartographique de découpage des secteurs présentant les mêmes caractéristiques naturelles a été réalisé par portions de côte : la Seine-Maritime, le Calvados, la Manche façade est et nord et la Manche façade ouest.

Les secteurs sont codifiés selon une nomenclature détaillée dans le Tableau 2.

L'ensemble des données est saisi dans la couche du trait de côte le plus récent.

Les limites identifiées dans le cadre de cette étude sont les suivantes :

- L'homogénéité des données sur l'ensemble du littoral normand a été privilégiée face à la précision de la donnée ; des données très précises localement n'ont pas été prises en compte faute d'homogénéité,
- Les saisies cartographiques ayant été réalisées par 4 opérateurs différents (1 opérateur par portion de côte), il existe un biais d'interprétation de la donnée,
- Des incertitudes sont liées à la localisation des limites des secteurs,
- Des incertitudes sont liées aux variations temporelles de certaines données telles que les dépôts de sables ou de galets sur l'estran.

Les limites sont détaillées en annexe 1.

Principaux résultats obtenus

La nomenclature mise en place est une nomenclature emboîtée. Elle permet ainsi à tout moment de regrouper, agréger certains indicateurs de manière à simplifier la lecture du littoral.

Au niveau régional, sur les 56 typologies possibles de côte, 38 sont présentes.

2.4.1 Méthodologie

La typologie des côtes naturelles normandes a pour but de regrouper en secteurs homogènes²² les zones géographiques où la côte est semblable et donc, potentiellement, susceptible d'évoluer de manière similaire.

La définition de la typologie de la côte est basée sur l'analyse de plusieurs familles de critères naturalistes, à savoir :

1. La morphologie de la côte (voir 2.1),
2. L'exposition de la côte aux facteurs météo-marins (voir 2.2),
3. La géologie et les mécanismes d'évolution de la côte et de l'estran (voir 2.3).

Ces familles de critères ont été regroupées dans une nomenclature (Tableau 2) ; cette nomenclature a été construite de façon emboîtée, permettant ainsi d'afficher cartographiquement les indicateurs individuellement ou de les regrouper suivant la lecture souhaitée et l'information recherchée.

Cette nomenclature propose 56 types de côtes possibles. Au niveau régional, 38 sont présentes et identifiés. L'ensemble du littoral normand a donc été découpé en secteurs présentant les mêmes caractéristiques, appelés « secteurs homogènes ».

Tableau 2 : Typologie des côtes normandes et codification associée.

| 1-Géomorphologie | 2-Exposition aux facteurs météo-marins | 3-Géologie de la côte | |
|---|--|--|---|
| Type de côte | | Type de roche | Nature de l'estran |
| R Côtes rocheuses | X Exposé B Abrisé | A Magmatique E Métamorphique S Sédimentaire | 0 Platier 1 Schorre 2 Sablo-vaseux 3 Sables 4 Galets 5 Blocs 6 Éboulis (cônes) |
| U Côtes d'accumulation (ou « côtes basses ») | X Exposé B Abrisé | - | |

²² L'ensemble du littoral normand est découpé en tronçons ;

- Un **tronçon** correspond à une entité cartographique de découpage du trait de côte. Chaque entité de la table attributaire correspond donc à un tronçon.
- Un **secteur homogène** correspond à un ensemble de plusieurs tronçons présentant les mêmes caractéristiques et pouvant potentiellement présenter une évolution similaire. Ces secteurs peuvent être situés à différents endroits du littoral normand.
- La **typologie d'un secteur** correspond à l'ensemble des caractéristiques géomorphologiques, d'exposition aux facteurs hydro-climatiques et géologiques qui définissent un secteur homogène.

En fonction des sources de données utilisées, la précision et l'échelle de définition des secteurs homogènes diffèrent. Par exemple, l'analyse des photos prises face à la côte sera plus précise que celle des photos aériennes. La disponibilité de l'information est également à prendre en compte. Ainsi en Seine-Maritime, les événements historiques ont pu être localisés, ce qui n'est pas le cas des deux autres départements ou alors de manière très ponctuelle.

L'ensemble des sources d'informations citées précédemment permet d'acquérir différentes données permettant de définir des secteurs homogènes en terme de fonctionnement, à savoir :

- Le type de côte (côte à falaise, côte basse sableuse, côte basse rocheuse, havres et estuaires, côte artificialisée),
- La hauteur des fronts rocheux,
- Les événements recensés de type glissements ou éboulements,
- L'évolution du littoral déjà mesurée sur de précédentes études,
- La nature de l'estran (platier, éboulis, champs de blocs ou cordons de galets contribuant à protéger la côte, etc.).
- L'exposition de la côte par rapport aux facteurs météo-marins.

En fonction des informations disponibles, ces éléments ont pu être affinés dans certains secteurs avec, par exemple :

- La morphologie des côtes rocheuses,
- La nature des formations qui affleurent le long du littoral,
- L'altération des massifs rocheux,
- Les types des mouvements de terrain,
- La présence et le type de végétation,
- Le type de dune.

La présence ou non d'ouvrages ou d'interventions humaines ayant un impact sur le fonctionnement du littoral (ouvrages fixant le trait de côte, ouvrages transversaux bloquant le transit sédimentaire, alimentation en sédiments de dragage, etc.) a aussi été étudiée sur certains secteurs. Les couches SIG de la cartographie nationale des ouvrages et aménagements littoraux²³, intitulées « Base de donnée nationale des ouvrages et aménagements littoraux » (couche « ouvrages Cerema BRGM ») et « Cartographie d'artificialisation du trait de côte » (couche « N artificialisation ouvrage métropole ») ont été consultées sur l'ensemble du littoral normand. En Seine-Maritime, l'analyse croisée des deux couches de données a permis de mettre en évidence les ouvrages pouvant avoir un impact sur l'érosion du trait de côte. Dans le Calvados et la Manche, les informations concernant l'impact des ouvrages et autres actions humaines sur l'évolution du littoral ont principalement été recueillies dans la « Dynamiques et évolution du littoral – Synthèse des connaissances des côtes françaises ». Il s'agit principalement d'ouvrages linéaires, d'avancées portuaires et d'épis majeurs.

Néanmoins, ces informations n'étant pas homogènes en termes de forme et de disponibilité sur l'ensemble du littoral normand, il a été choisi de ne pas les retenir pour la caractérisation des côtes normandes. De plus, il s'agit à ce stade de définir une typologie naturaliste et donc sans tenir compte des interventions anthropiques sur le littoral.

²³ Cerema, « Cartographie nationale des ouvrages et aménagements littoraux ».

2.4.2 Résultats obtenus

Les données présentées ci-dessous sont basées uniquement sur les traits de côtes naturels. Les traits de côtes artificiels ont été digitalisés sur une autre couche SIG.

Les résultats sont présentés à l'échelle de la région puis par département. Pour chaque département, les éléments qui ont été mis en évidence lors de l'analyse des critères, bien que non-retenus dans la typologie de synthèse, comme le type de piédestal ou le linéaire d'ouvrages, sont précisés.

2.4.2.1 Sur l'ensemble des côtes normandes

Sur l'ensemble du trait de côte naturel de la Normandie, 38 types de secteurs ont été identifiés, répartis sur environ 478 km de linéaire côtier naturel. Ces secteurs présentent des similitudes suivant les familles de critères définis pour cette étude mais il n'en reste pas moins que chaque secteur conserve son identité propre.

Voici les résultats obtenus suivant les familles de critères définies (voir synthèse en Tableau 2) :

1. La géomorphologie :

- Les côtes d'accumulation sont majoritaires à l'échelle de la Normandie. Cette typologie de côte a été identifiée sur les départements de la Manche et du Calvados. Elles sont présentes sur près de 244 km, soit 51 % du linéaire côtier naturel. Parmi les côtes d'accumulation, 116,6 km de dunes ont été identifiés, soit environ 48 % du linéaire de côtes d'accumulation, 82,6 km de havres et estuaires, soit 33,6 % du linéaire de côtes d'accumulation et 44,7 km de côtes sablo-vaseuses, soit 18,3 % du linéaire de côtes d'accumulation, principalement présentes sur la Manche.
- Les côtes à falaise représentent un linéaire similaire à celui des côtes d'accumulation, avec 234,3 km, soit environ 49 % du linéaire côtier naturel. Parmi ce linéaire côtier, près de 200 km (soit 85,7%) sont constitués par des falaises supérieures à 20 m de hauteur. Le linéaire restant est formé de falaises dont la hauteur est inférieure à 20 m.

2. L'exposition aux facteurs météo-marins :

La plupart du linéaire côtier naturel est exposé aux éléments climatiques, représentant 335,4 km, soit près de 70,2 % du linéaire côtier naturel.

3. La géologie :

- Les trois origines géologiques sont représentées sur les côtes normandes :
 - Près de 158 km de côtes sédimentaires, soit 67,4 % du linéaire de falaise et 33,1 % du linéaire côtier naturel,
 - Environ 58 km de côte d'origine magmatique, soit 24,8 % du linéaire de côte à falaise et 12,1 % du linéaire côtier naturel, présents exclusivement sur le département de la Manche,
 - 18,6 km de côte d'origine métamorphique, soit près de 8 % des côtes à falaise et 3,9 % du linéaire côtier naturel, présents exclusivement sur le département de la Manche.
- Les côtes à falaise ont des piédestaux de natures et de cohérence diverses : 89,2 km des côtes à falaises possèdent un piédestal crayeux, soit 38,1 % des côtes rocheuses

et sont présentes sur le département de Seine-Maritime. 47,8 km des côtes à falaise possède un piédestal formé de calcaire ou de craie résistante, soit 20,4 % des côtes à falaise, sur les côtes de la Seine-Maritime et du Calvados. Près de 19 km de côtes à falaise sont formés d'un piédestal argilo-marneux, soit 8,1 % des côtes à falaises, exclusivement présent sur le département du Calvados. Enfin, environ 2 km du linéaire de côtes à falaise possèdent un piédestal formé de matériaux non cohérents, soit moins de 1 % des côtes à falaise de la Normandie.

- Nature de l'estran :
 - L'estran est constitué de de platier rocheux sur environ 93,5 km, soit 19,6 % du linéaire côtier naturel de la région.
 - Les schorres sont présents sur 53,8 km, soit 11,2 % du linéaire de côte naturel. Ces matériaux sont présents exclusivement au niveau des estuaires et des havres de l'ouest de la Manche.
 - Les matériaux sablo-vaseux sont présents sur 43,2 km, soit 9 % du linéaire côtier naturel.
 - Les sables sont les principaux matériaux rencontrés sur l'estran de la Normandie. Ils sont présents sur environ 145 km de linéaire de côte naturel, soit sur 30,3 %.
 - Les galets ont été identifiés sur 48,2 km du linéaire côtier naturel de la Normandie, soit 10 %.
 - Les blocs sont identifiés sur 68,5 km, soit 14,5 % du trait de côte naturel.
 - Les éboulis sont présents sur environ 25,5 km, soit 5,4 % du linéaire de côte naturel.

La nature de l'estran est amenée à évoluer au cours du temps par les marées, les tempêtes, etc. C'est pourquoi, d'une campagne photographique à l'autre, la nature de l'estran à un point donné peut différer.

2.4.2.2 Par département

Seine-Maritime

Le département de la Seine-Maritime possède environ 116 km de linéaire côtier naturel, formé quasi exclusivement des côtes rocheuses d'origine sédimentaire. Sur l'ensemble du trait de côte naturel de la Seine-Maritime, 11 types de secteurs ont été identifiés.

1. La géomorphologie :
 - La Seine-Maritime présente uniquement des côtes à falaise rocheuse.
 - La grande majorité des falaises mesure plus de 20 m de hauteur. Seuls trois petits tronçons, soit environ 500 m de long (0,4 % du linéaire côtier), représentent des falaises dont leur hauteur est inférieure à 20 m. Ces secteurs sont situés au droit de vallées et valleuses.
2. L'exposition aux facteurs météo-marins : 111,2 km soit 95,9 % du linéaire de côte de la Seine-Maritime.
3. La géologie :
 - Type de roche : les falaises seinomarines sont exclusivement des roches sédimentaires, de type calcaire crayeux.

- Deux types de piédestal sont observés sur le département : des falaises simples avec un piédestal crayeux et des falaises à piédestal résistant formé de calcaires ou craies résistantes. Les falaises simples représentent environ de 89,4 km de long soit 77 % du linéaire côtier. Les falaises à piédestal résistant sont observées sur environ 26,6 km de long, soit environ 23 % des falaises composant le linéaire côtier du département.
- Nature de l'estran :
 - Le platier est parfois découvert (absence de plaquages de sables et de galets). Il a été identifié sur environ 24 km, soit environ 20,7 % du linéaire de côte.
 - Les sables sont présents en placages fins le long du département mais ont été identifiés ponctuellement, en quantité plus importante, au niveau de trois secteurs, représentant près de 800 m de long, soit environ 0,7 % du linéaire côtier. C'est la typologie d'estran la moins présente sur le linéaire côtier de la Seine-Maritime.
 - Les galets sont présents en cordons en pied de falaise. Les galets ont été identifiés sur 38 secteurs représentant environ 19 km, soit 16,4 % du linéaire côtier.
 - Les blocs sont visibles à plusieurs endroits sur le littoral. Ils ont été identifiés sur environ 46,5 km, soit 40 % du linéaire de côte.
 - Les éboulis sont présents en pied de falaise. Sur les photographies aériennes, ces éboulis ont été identifiés grâce à la présence de végétation à leur sommet. Ils ont été identifiés sur près de 25,9 km soit 22,3 % du linéaire de côte.

Calvados

Le département du Calvados possède 74 km de linéaire côtier naturel, formé principalement de côtes rocheuses et de côtes d'accumulation. Sur l'ensemble du trait de côte naturel du Calvados, 13 types de secteurs ont été identifiés.

1. La géomorphologie :

- Le linéaire côtier du Calvados est formé de 41,7 km de falaises, ce qui représente environ 56,4 %, toutes formées de roches sédimentaires. La majorité des falaises mesure plus de 20 m de hauteur, ce qui représente près de 36,2 km (soit environ 86,6 % des côtes à falaises du département). Les falaises dont la hauteur est inférieure à 20 m sont présentes sur environ 5,5 km soit 13,4 % des côtes rocheuses. Ces secteurs sont répartis sur l'ensemble du linéaire côtier.
- Le reste du linéaire côtier naturel du Calvados est formé de côtes d'accumulation. Ce type de côte représente 32,7 km, soit 43,1% du linéaire côtier du Calvados :
 - Parmi ces côtes d'accumulation, les plus fréquents sont les systèmes dunaires représentant 23,3 km, soit environ 31 % des côtes du département.
 - Les côtes d'accumulation sont aussi rencontrées au niveau des estuaires et des havres : on en trouve sur environ 8,2 km, soit 10,9 %.
 - Ponctuellement, des côtes sablo-vaseuses sont présentes et représentent près de 900 m de linéaire côtier, soit 1,2 %.

2. L'exposition aux facteurs météo-marins : la plupart du linéaire côtier naturel du Calvados est abrité, représentant 55,4 km soit 74,9 % du linéaire de côte naturel du Calvados. Le linéaire restant est exposé aux éléments climatiques.

3. La géologie :

- Type de roche : les côtes du Calvados sont exclusivement d'origine sédimentaire, bien qu'elles soient d'âge et de nature très variables.
- Trois types de piédestal sont observés sur le département :
 - Des falaises avec un piédestal calcaire ou à craie résistante, représentant 20,9 km de falaise (soit 50,1 % des côtes rocheuses),
 - Des falaises formées de matériaux argilo-marneux, qui représentent 18,9 km (soit 45,3%),
 - Des falaises dont le piédestal est composé de matériaux non-cohérents, représentant 1,9 km (soit 4,6%).
- Nature de l'estran :
 - Les sables sont présents sur environ 22,8 km de côte, ce qui représente 30,8 % du linéaire côtier naturel du Calvados. Ce sont les matériaux les plus fréquemment rencontrés sur l'estran du département.
 - Les blocs sont visibles à plusieurs endroits sur le littoral du Calvados. Ils ont été identifiés sur environ 19,7 km, soit 26,6 % du linéaire de côte naturel.
 - Les matériaux sablo-vaseux sont présents sur environ 12,6 km, soit 17 % du linéaire côtier naturel du département.
 - Les galets ont été identifiés ponctuellement, répartis sur l'ensemble du linéaire côtier naturel du département. Ils représentent environ 10,8 km, soit 14,6 %.
 - Le platier est parfois découvert (absence de placages de sables et de galets). Il a été identifié sur environ 6,1 km, soit environ 8 % du linéaire de côte naturel.
 - Le schorre est présent sur près de 2 km du linéaire côtier naturel du Calvados (soit environ 3 %). Ces matériaux sont présents au niveau des estuaires.

Manche

Le département de la Manche possède environ 288 km de linéaire côtier naturel. Sur l'ensemble du trait de côte naturel de la Manche, 27 types de secteurs ont été identifiés.

1. La géomorphologie :

- Le linéaire côtier de la zone d'étude est formé majoritairement de côtes d'accumulation. Ce type de côte représente près de 211,5 km, soit environ 73,4 % du linéaire côtier naturel :
 - Parmi ces côtes d'accumulation, les plus fréquents sont les systèmes dunaires représentant 93,2 km, soit environ 44,1% des côtes de la Manche,
 - Le linéaire côtier naturel de la Manche est formé de 74,4 km de havres et estuaires, soit 35,2 %
 - Des côtes sablo-vaseuses sont aussi présentes et représentent 43,8 km de linéaire côtier naturel, soit 20,7 % du linéaire côtier.
- Le reste du linéaire côtier naturel du département est formé de 76,4 km de falaises, ce qui représente 26,5 %. Parmi ce linéaire de falaise, 28,5 km ont une hauteur inférieure à 20 m, soit 37,3 % des côtes à falaise et 47,9 km ont une hauteur supérieure à 20 m,

soit 62,7 % du linéaire de falaise de la Manche. La majorité de ces falaises est formée de roches magmatiques (57,8 km soit 75,6 % des falaises de la Manche). 18,6 km des falaises sont formés de roches métamorphiques, soit près de 24,4 %. Le reste des falaises est formé de roches dont la nature n'est pas précisée.

2. L'exposition aux facteurs météo-marins : la majorité du linéaire côtier naturel de la Manche est exposée aux éléments climatiques. Ce linéaire représente 205,6 km, soit 71,4 %.
3. La géologie :
 - Type de roche : les trois types de roches sont présents sur les côtes du département de la Manche.
 - Nature de l'estran :
 - Les sables sont les matériaux majoritairement rencontrés sur l'estran de la Manche. Ils sont présents sur 121,3 km du linéaire côtier naturel, soit 42,1 %.
 - Le platier rocheux est observé sur 63,6 km, soit 22 % du linéaire de côte naturel.
 - Les schorres sont présents sur 51,7 km du linéaire de côte naturel, soit environ 18 %.
 - Les terrains sablo-vaseux sont présents sur 30,7 km du linéaire de côte naturel, soit 10,6 %;
 - Les galets ont été identifiés sur 18,3 km, soit 6,3 % du linéaire côtier naturel.
 - Les blocs sont visibles au niveau du Nez de Jobourg sur 2,4 km, soit environ 1 % du linéaire de côte.

La base de données mouvements de terrain (BD MVT/InfoTerre) a également permis de recenser :

- 10 évènements « glissement » sur 12 communes littorales : Greville-Hague (x2), Urville-Nacqueville (x2), Herqueville, Le Rozel (x4), Barneville-Carteret,
- 99 évènements « éboulement/chutes de blocs » sur cinq communes littorales : Fermanville, Greville-Hague, Beaumont-Hague, Flamanville, Barneville-Carteret (x12) et sept communes entre Barneville-Carteret (exclue) et le Mont-Saint-Michel, dont 60 éboulements et chutes de blocs sur la côte répartie sur quatre communes.

À noter que seuls les éléments ponctuels localisés ont été pris en compte ; la donnée surfacique à l'échelle communale des « mouvements de terrain non-localisés » n'a pas été prise en considération car trop imprécise.

2.4.2.3 Visualisation cartographique des secteurs

L'analyse des critères a permis de découper le littoral normand en plusieurs centaines de secteurs ; certains types de secteurs se retrouvent à plusieurs endroits de la façade littorale normande.

Le découpage du trait de côte naturel a été fait par tronçons de côte qui sont géolocalisés à partir de la couche du trait de côte récent intitulée « R_decoupage_secteur_homogene_epsg2154_Normandie_2016_2019 ».

Dans la table attributive de cette couche, les champs reprennent l'ensemble des données analysées. Les critères sont codifiés par une lettre (voir Tableau 2) qui peuvent être affichées sous forme d'un code unique (voir exemples en Figure 42, Figure 43 et Figure 44).



Figure 42 : Répartition de la typologie RS5X sur le département de la Seine-Maritime (échelle 1/100 000).



Figure 43 : Typologie U_3B dans le Calvados, à l'est de la baie des Veys.



Figure 44 : Typologie RA0X sur la côte nord-est de la Manche.

3. ANALYSE DE L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE

3.1 Numérisation du trait de côte récent

Synthèse

Hypothèses et limites identifiées

Afin d'analyser l'évolution du trait de côte, il est nécessaire d'étudier sa position à diverses périodes. Le Réseau d'Observation du Littoral (ROL) a digitalisé les traits de côte de 1947, 1977, 1982, 1992, 2001 et 2010. Pour cette étude, le Cerema a digitalisé le trait de côte le plus récent afin d'améliorer la qualité des données.

Pour cela, le trait de côte digitalisé dans le cadre de la « Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte » (SNGITC) a été mis à jour d'après les orthophotographies les plus récentes (2019 pour la Seine-Maritime et la Manche, 2016 pour le Calvados).

Pour digitaliser le trait de côte, des indicateurs morphologiques (pied de dune, crête de dune, pied de falaise, haut de falaise, etc.) et liés à la végétation (limite inférieure végétation dunaire, limite supérieure du schorre, etc.) sont utilisés.

Ce travail étant long et fastidieux, il a été réalisé par 4 opérateurs. Cette méthodologie présente des limites :

- Risque de mauvaise continuité spatiale due aux incohérences au niveau des jonctions entre les territoires,
- Choix de l'indicateur du trait de côte variable entre opérateurs ; une même portion peut être interprétée différemment selon l'opérateur,
- La précision du levé peut aussi varier selon l'échelle de travail de l'opérateur ou le support géomatique utilisé.

Les limites sont détaillées en Annexe 1.

Principaux résultats obtenus

Un trait de côte naturel récent est numérisé sur l'ensemble littoral normand. Ce trait de côte est utilisé dans la suite de l'étude pour le *Calcul des valeurs d'évolution du trait de côte* et pour l'application de la

3.1.1 Méthodologie

La méthodologie employée pour le présent projet s'appuie sur celle utilisée lors de la digitalisation du trait de côte réalisée dans le cadre de la « Stratégie Nationale de Gestion Intégrée du Trait de Côte » (SNGITC).²⁴

Outre le fait d'avoir déjà généré une digitalisation du trait de côte, ce travail fournit également la « nature » du trait de côte levé.

²⁴ Ministère de l'Écologie, du développement durable, des Transports et du Logement, « Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Vers la relocalisation des activités et des biens. »

Dans le présent projet, le travail a consisté à actualiser le trait de côte généré dans le cadre de la « SNGITC » en contrôlant et modifiant au besoin les changements et évolutions relevés du trait de côte aux dates des orthophotographies les plus récentes pour les départements concernés (2019 pour Manche et Seine-Maritime, 2016 pour Calvados). Une couche SIG d'un trait de côte récent (2019 dans la Manche et la Seine-Maritime, 2016 dans le Calvados) a donc été produite.

Dans le cadre de la SNGITC et du présent projet, des traits de côte ont donc été produits sous forme de couches SIG dont les tables attributaires présentent un certain nombre d'informations concernant chaque portion de littoral correspondante.

3.1.1.1 Définition du trait de côte

Le « trait de côte » est la limite géographique entre le domaine marin et le domaine continental. Cette limite est définie par le Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM) comme correspondant « à la laisse des plus hautes mers dans le cas d'une marée astronomique de coefficient 120 et dans des conditions météorologiques normales (pas de vent du large, pas de dépression atmosphérique susceptible d'élever le niveau de la mer) ».

C'est une définition théorique dont la représentation nécessite une modélisation hydraulique et un modèle numérique de terrain précis. De manière générale, cette définition n'est pas facilement accessible sur le terrain et il est nécessaire de travailler sur des marqueurs permettant d'approcher la position du trait de côte. Ces éléments de repères peuvent être une limite de végétation, une limite de haut de falaises, une limite supérieure de jet de rive, etc. Ces marqueurs peuvent être déterminés dans le cadre de la photo-interprétation.

Le trait de côte tel que défini par le SHOM n'est pas directement repérable de façon continue sur le terrain ou sur une photographie aérienne (récente ou ancienne). Cependant, en fonction du contexte géomorphologique de la côte et de son contexte dynamique (érosion, accrétion), des indicateurs permettent d'estimer la position du « trait de côte ». Ces indicateurs peuvent être des « lignes » de référence particulières permettant de comparer l'évolution d'objets identiques à différentes dates.

Il existe une multitude de définitions du « trait de côte ». Celle retenue dans le cadre de la SNGITC correspond à des marqueurs morphologiques du littoral, observables aussi bien sur le terrain que sur des photographies aériennes. Pour les côtes possédant des marées, le trait de côte est délimité par la limite de végétation et la limite du haut de falaise²⁵.

En complément du levé du trait de côte « naturel », toujours dans le cadre de la SNGITC, les ouvrages littoraux observables ont également été pris en compte : c'est le trait de côte « artificiel ».

3.1.1.2 Méthodologie

Dans le cadre de la présente étude, le trait de côte récent a été digitalisé en actualisant le trait de côte récent de l'Indicateur National de l'Erosion Côtière (SNGITC) afin de pouvoir évaluer les évolutions entre ces différents traits de côte. La typologie des contextes est donc celle établie dans la SNGITC qui est antérieure à la stratégie Littoraux normands 2027.

La disponibilité des photographies aériennes verticales, sur lesquelles vont être observées les positions du trait de côte, conditionnent les durées d'observation de l'étude. Pour être exploitables, les clichés des photographies aériennes verticales doivent être assemblés, géoréférencés et orthorectifiés (Tableau 3 et Figure 45).

²⁵ Cerema, « Indicateur national de l'érosion côtière : Méthodologie ».

La tendance passée de l'évolution du trait de côte se base sur une analyse diachronique en observant la position du trait de côte sur deux photographies aériennes (« récente » et « ancienne ») (Tableau 3).

Tableau 3 : Supports utilisés lors de la digitalisation selon les départements.

| Département | Trait de côte « ancien » | | | Trait de côte « récent » | |
|----------------|---------------------------------|-------------------------|------------|--------------------------|--------------|
| | Clichés traités Shom et IFREMER | Bd-ortho historique IGN | Autres | Ortho-littorale V2 | Bd-ortho IGN |
| Seine-Maritime | - | 1950 | ROLNP 1947 | 2011-2012 | 2014 |
| Calvados | - | - | ROLNP 1947 | 2012 | 2005 |
| Manche | | - | ROLNP 1947 | - | 2010 |

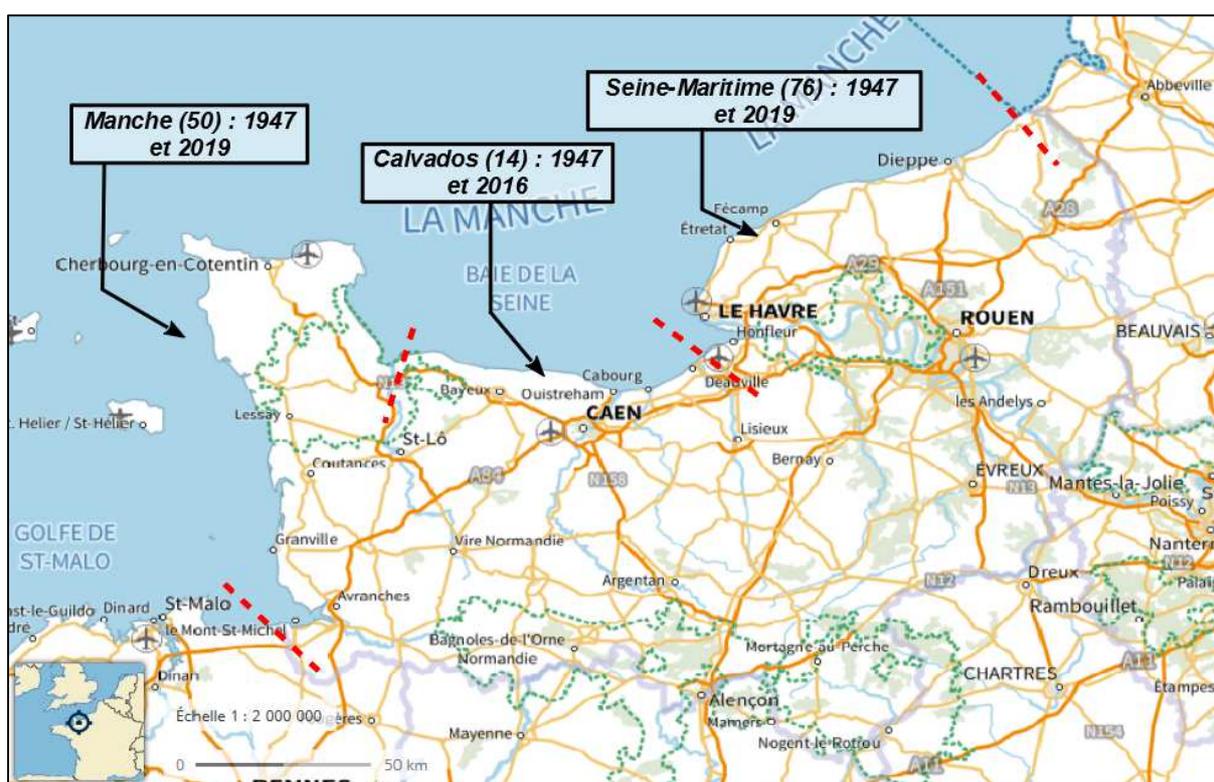


Figure 45 Illustration des territoires digitalisés et dates des orthophotographies utilisées lors de la SNGITC.

Sur les prises de vues aériennes verticales récentes et anciennes, la méthodologie nationale préconisait la réalisation de la digitalisation au 1/2 500^e.

Dans la pratique, et pour affiner le rendu, certains secteurs ont été digitalisés au 1/1 000^e, parfois moins. Ces échelles de travail supérieures à celles prévues dans la méthodologie nationale ont été essentielles pour mieux préciser le choix de l'indicateur et la position du trait.

Ce travail, qui a généré un trait de côte digitalisé sous forme de polygone avec un nombre de nœuds important, a été nécessaire pour une meilleure appropriation graphique des phénomènes locaux. Cela a permis de déceler de nombreux glissements, éboulements qui n'auraient sans doute pas été décelés à une échelle au 1/2 500^e.

Cette digitalisation a nécessité un travail de photo-interprétation important (analyse des images aériennes récentes et anciennes), et une compréhension du contexte littoral levé.

En s'appuyant sur cette compréhension du contexte, la digitalisation du trait de côte s'est d'abord opérée sur les supports photographiques les plus récents, en choisissant l'indicateur le plus pertinent (bien visible et fiable), le plus continu et le plus homogène sur le site analysé. Le même travail a ensuite été réalisé sur les clichés anciens, en recherchant ce même indicateur.

Sur certains sites, l'indicateur choisi sur le cliché récent n'était pas ou peu visible sur le cliché ancien de qualité dégradée (ou/où la continuité de l'indicateur n'était pas optimale). Dans ces cas, un indicateur alternatif pertinent et observable sur les deux clichés a été choisi.

Pour pouvoir comparer l'évolution diachronique du trait de côte sur un site, il est primordial de digitaliser le même indicateur sur les deux clichés. On ne peut comparer que deux indicateurs similaires et homogènes.

Dans le cadre de la SNGITC, la digitalisation du trait de côte (« naturel » et « artificiel »), comme préconisé par la méthodologie nationale, n'a pas été réalisée dans les estuaires et dans les ports.

En complément du levé du trait de côte « naturel », la digitalisation des ouvrages littoraux observables sur les orthophotographies (cliché récent et cliché ancien) a également été réalisée sur le même principe. L'idée était de s'intéresser à la création, modification, ou destruction de tout ou partie d'un ouvrage sur l'échelle de temps séparant les deux clichés.

Dans le cadre de la stratégie Littoraux normands 2027, la position et la typologie des ouvrages s'appuient sur la cartographie nationale des ouvrages et aménagements littoraux, intitulée « Base de donnée nationale des ouvrages et aménagements littoraux » (couche SIG « ouvrages Cerema BRGM »).

3.1.1.3 Choix des indicateurs utilisés

Pour digitaliser le trait de côte (« naturel » ou « artificiel ») plusieurs indicateurs sont possibles suivant les contextes. L'indicateur choisi doit s'appuyer uniquement sur des marqueurs ayant des effets visibles (les conséquences) du recul du trait de côte, identifiables sur une longue période d'observation, afin de dégager des tendances d'évolution sur le long terme.

Il existe 3 types d'indicateurs : les indicateurs instantanés, les morphologiques ou liés à la végétation.

Indicateurs instantanés

Ces indicateurs peuvent être définis comme étant les manifestations de la dernière marée ou comme la limite terre/eau au moment de la prise de vue :

- Laisse de haute mer
- Limite supérieure du sable mouillé
- Limite eau/sable

Ces indicateurs instantanés sont très dépendants du moment de la prise de vue ou du contexte (macro ou microtidal). Ces indicateurs seront pertinents dans un contexte de côte microtidale (faible marnage).

Ces indicateurs n'ont pas été utilisés sur les départements étudiés.

Indicateurs morphologiques

Ces indicateurs sont des discontinuités morphologiques d'un site. Celles-ci se traduisent par des reliefs plus ou moins marqués.

- | | | |
|---|---|--------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • Berme de haut de plage • Pied de dune • Haut de la falaise dunaire • Crête de dune | } | <i>Côte basse meuble</i> |
| <ul style="list-style-type: none"> • Pied de falaise • Haut de falaise • Haut du cône d'éboulis | } | <i>Côte à falaise</i> |

Certains de ces indicateurs ont été utilisés sur les départements étudiés.

Indicateurs liés à la végétation

La végétation est un marqueur du régime de submersion associé au niveau haut des eaux. Ces limites sont, globalement, assez aisées à repérer et donc à digitaliser.

- Limite inférieure de la végétation dunaire
- Limite inférieure de la végétation dunaire pérenne (arbres, arbustes, ...)
- La limite inférieure de la végétation (hors dune)
- La limite supérieure du schorre
- La limite supérieure de la slikke

Certains de ces indicateurs ont été utilisés sur les départements étudiés.

Ci-après, en illustration, la synthèse des marqueurs potentiels en fonction des contextes morphologiques rencontrés, de leurs particularités ainsi que de leur pertinence (Figure 46).

Concrètement, neuf indicateurs parmi ceux listés dans la méthodologie nationale ont été utilisés :

- Pied de dune,
- Haut de falaise dunaire,
- Limite côté mer de la végétation dunaire,
- Limite côté mer de la végétation dunaire pérenne,
- Limite de végétation hors dune,
- Pied de falaise,
- Haut de falaise,
- Limite supérieure du schorre,
- Limite supérieure de la slikke

Ces indicateurs « naturels » traduisent des contextes géomorphologiques différents des côtes basses rocheuses ou meubles (avec/sans massif dunaire) et des côtes à falaises.

| contextes géomorphologiques | | indicateurs du trait de côte | | | | | | | | | |
|---|-------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------|----------------|--------------------------------------|---|---------------|--|---|---|
| | | à court terme | | | | à moyen terme | | à long terme | | | |
| | | limite supérieure de l'eau | limite supérieure du sable mouillé | dernière laisse de haute mer | Crête de berme | ped de dune et/ou de falaise dunaire | limite côté mer de l'extension de la végétation | crête de dune | limite d'extension de la végétation pérenne (arbres et arbustes) | | |
| côte basse (y compris les plateformes d'érosion en pied de falaise) | macrotidale | meuble/sableuse | avec massif dunaire | n | n | L | L | P | P | P | L |
| | | | sans massif dunaire | n | n | L | L | - | P | - | P |
| | | flèche sableuse | | n | n | L | L | P | P | P | L |
| | | | cordon de galet | n | n | L | L | - | P | - | L |
| | microtidale | côte rocheuse | | n | - | L | - | - | P | - | - |
| | | meuble/sableuse | avec massif dunaire | P | P | L | L | P | P | P | L |
| | | | sans massif dunaire | P | P | L | L | - | P | - | P |
| | | flèche sableuse | | P | P | L | L | P | P | P | L |
| | | cordon de galet | | P | N | L | P | - | P | - | L |
| | | côte rocheuse | | P | - | L | - | - | P | - | - |

| | | indicateurs du trait de côte | | |
|---|--------------------------------|------------------------------|-----------------|--|
| | | à moyen terme | à long terme | |
| | | ped de falaise | haut de falaise | limite d'extension de la végétation pérenne (arbres et arbustes) |
| côte à falaise (y compris abers, calanques,...) | falaise à forte pente (> 45°) | P | P | P |
| | falaise à faible pente (< 45°) | P | P | P |

P = Marqueur pertinent (repérable avec précision et/ou représentatif du contexte géomorphologique)

P = Marqueur pertinent et utilisé dans la méthodologie de la SNGITC

L = Marqueur ayant une pertinence limitée (non repérable avec précision et/ou peu représentatif du contexte géomorphologique)

n = Marqueur non adapté (non représentatif du contexte géomorphologique)

« - » = Sans Objet

Figure 46 Marqueurs par contexte géomorphologique

Ci-après (Figure 48 à Figure 51) sont illustrés quelques contextes et quelques indicateurs différents rencontrés sur les trois départements normands. Il a été choisi d'illustrer des exemples de modifications liées à l'évolution du trait de côte « récent » entre la digitalisation levée lors de la SNGITC et celle levée dans le cadre du projet Littoraux normands 2027.



Figure 47 : Pertinence des marqueurs de trait de côte en fonction du contexte.

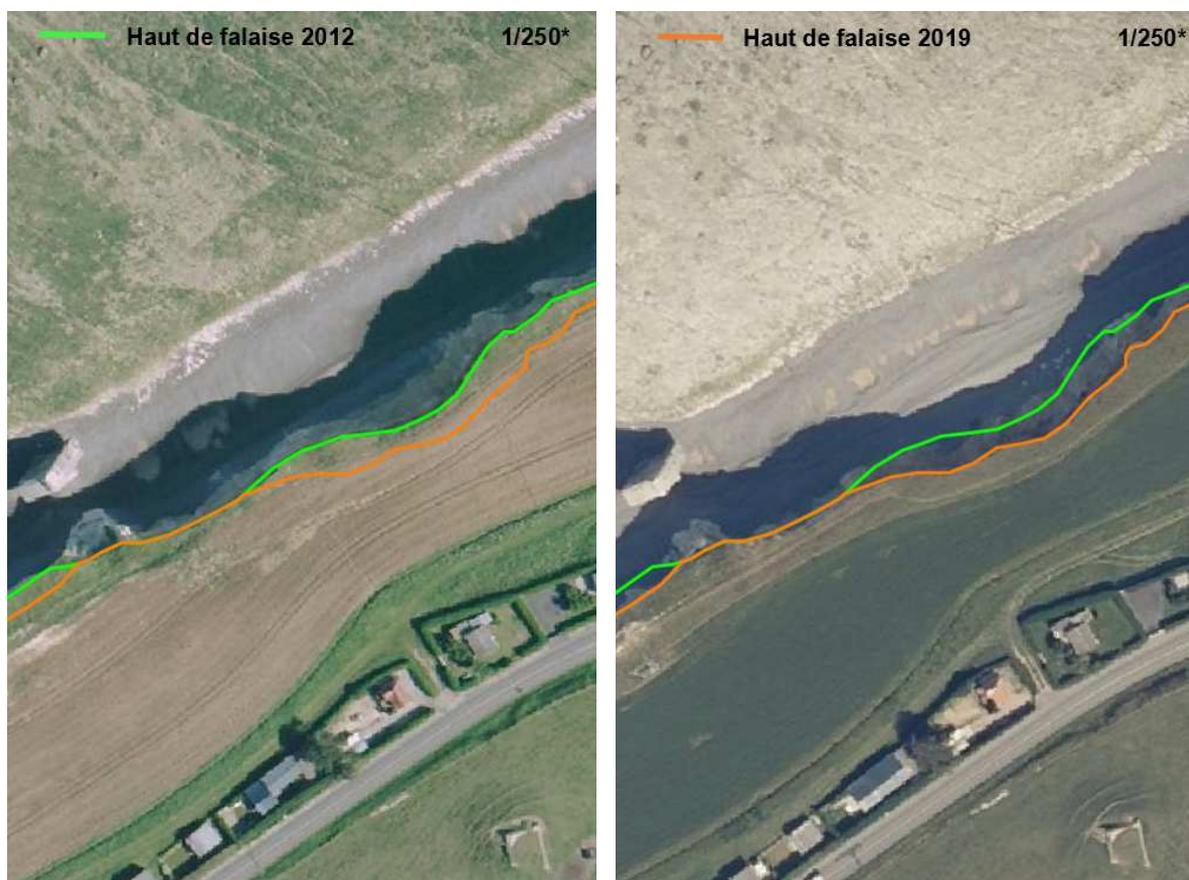


Figure 48 : Erosion du "haut de falaise" de 2012 à 2019 à Quiberville (76).

Cet exemple est issu de la côte de Seine-Maritime. Bien contrastée, la limite du haut de falaise (marqueur 15 dans la table attributaire dédiée) est bien observable sur les clichés récents et anciens.

Cet indicateur est intéressant dans les secteurs où la végétation n'est pas suffisamment contrastée pour être bien perçue. Si cela avait été le cas, le marqueur 13 (limite de végétation hors dune) aurait été plus adapté.

Dans ce contexte de côte, cet indicateur était le plus pertinent (bien visible et fiable), le plus continu et le plus homogène.

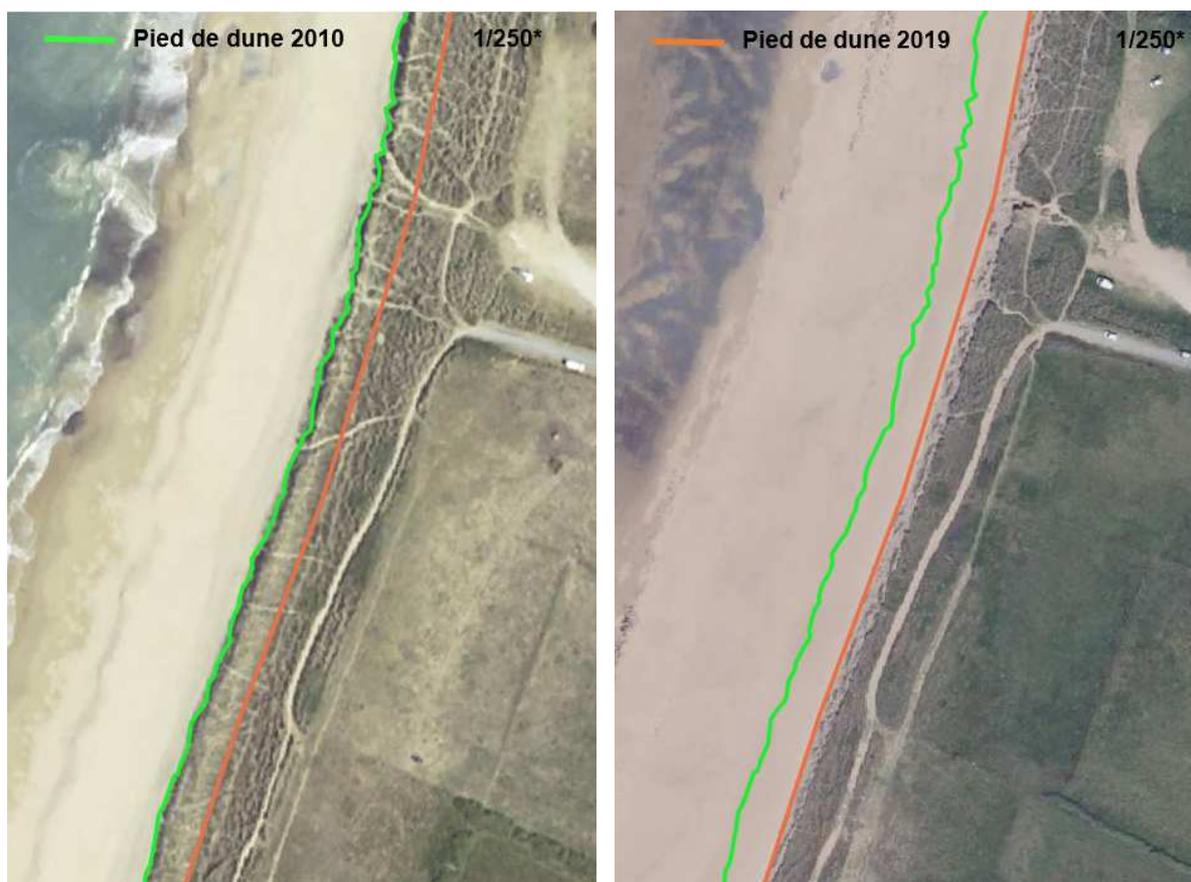


Figure 49 : Érosion du pied de dune de 2010 à 2019 à Siouville (50).

Cet exemple est issu de Siouville dans le Cotentin. La limite de pied de dune (marqueur 8 dans la table attributaire dédiée) est facilement observable sur les clichés récents et également sur les clichés anciens car cette limite est souvent bien contrastée.

Cet indicateur a souvent été utilisé dans les massifs dunaires de l'Ouest Cotentin. Sur ce cliché on voit nettement que l'indicateur 9 (haut de falaise dunaire) n'aurait pas été pertinent.

Dans ce contexte de côte, l'indicateur 8 était le plus pertinent (bien visible et fiable), le plus continu et le plus homogène.

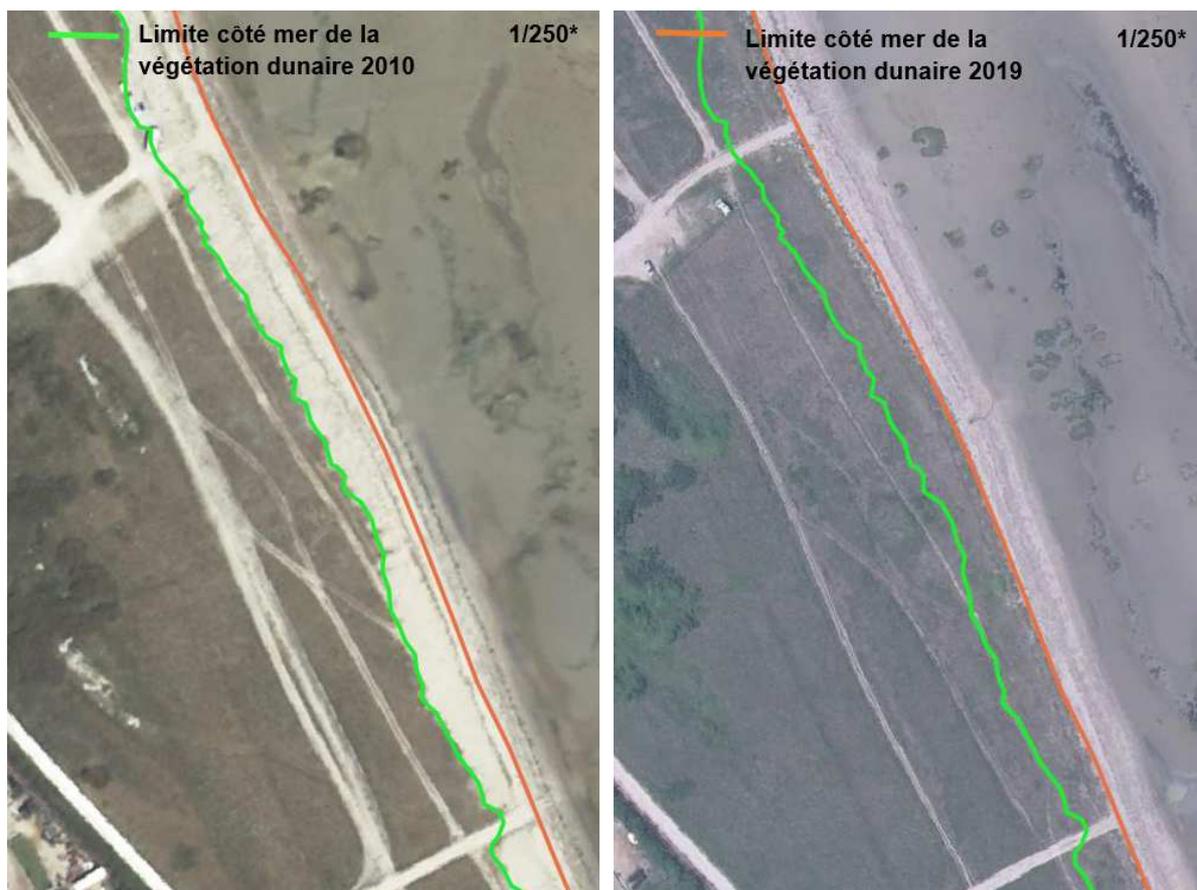


Figure 50 : Accrétion de la limite côté mer de la végétation dunaire de 2010 à 2019 à Lestres (50).

Cet exemple est issu de l'est Cotentin. La limite côté mer de la végétation dunaire (marqueur 11 dans la table attributive dédiée) est particulièrement observable sur les clichés récents et anciens car cette limite est souvent bien contrastée.

Souvent utilisée dans les massifs dunaires de l'ouest Cotentin, cette limite est, ici, utilisée dans l'est Cotentin, au sud de Saint-Vaast-La-Hougue.

Cet indicateur est particulièrement adapté à des contextes où les contrastes liés à des changements topographiques sont peu marqués (notamment sur les clichés anciens).

Dans ce contexte de côte, cet indicateur était le plus pertinent (bien visible et fiable), le plus continu et le plus homogène.



Figure 51 : Érosion de la limite de la végétation hors dune de 2010 à 2019 à Urville (50).

Cet exemple est issu d'Urville en Manche, immédiatement à l'ouest de Cherbourg. La limite de végétation hors dune (marqueur 13 dans la table attributive dédiée), est facilement observable sur les clichés récents et anciens, notamment sur les départements 14 et 50.

Dans ce contexte de côte, cet indicateur était le plus pertinent (bien visible et fiable), le plus continu et le plus homogène.

3.1.1.4 Renseignement des tables attributaires

En complément du travail de digitalisation des traits de côte, des tables attributaires ont été renseignées. Pour chaque polyligne digitalisée sous ArcGis 10.2. (logiciel utilisé dans le cadre de la SNGITC), un certain nombre d'informations géographiques inhérentes à la portion de littoral en question a été renseigné.

La table attributive de la couche du trait de côte « naturel » produite dans le cadre de la SNGITC contient les informations suivantes, la quasi-totalité de ces informations étant également présentées dans la table attributive du trait de côte récent du présent projet Littoraux normands 2027 :

- Date de l'orthophotographie : année
- Fournisseur du trait de côte : CETE Normandie-Centre (ancien nom du Cerema)
- Maître d'ouvrage du trait de côte : CETMEF
- Projection initiale : pour la métropole → RGF 1993 Lambert 93
- Indicateur : codification des marqueurs (Figure 52)

- Type de levé : uniquement numérique car, comme explicité dans la méthode, il n'y a pas eu de phase « terrain »
- Support : orthophotographie géo-référencée
- Résolution : taille du pixel en mètre
- Zoom de la numérisation du trait de côte : 2 500^è (zoom descendu au 800^è parfois moins)
- Couleur : NB (noir et blanc) ou RVB (couleur)
- Conditions météorologiques
- Erreur : +/-5m, +/-10m, +/-25m, >25m. Fonction de la qualité du support et de l'indicateur choisi. Par exemple, la digitalisation d'un environnement dunaire présente une faible précision au vu de sa modification permanente. Au contraire, le levé d'un ouvrage visible sur une orthophotographie récente induit une faible erreur de tracé.
- Date de production de la métadonnée
- Nom du producteur

| | |
|----|---|
| 1 | Non renseigné |
| 2 | Talus pre-littoral |
| 3 | Limite du jet de rive |
| 4 | Limite supérieure du sable mouille |
| 5 | Dernière laisse de haute mer |
| 6 | Crête de la berme |
| 7 | Fond de plage |
| 8 | Pied de dune |
| 9 | Haut de falaise dunaire |
| 10 | Crête de dune |
| 11 | Limite cote mer de la végétation dunaire |
| 12 | Limite cote mer de la végétation dunaire pérenne (arbres, arbustes,...) |
| 13 | Limite de végétation (hors dune) |
| 14 | Pied de falaise |
| 15 | Haut de falaise |
| 16 | Haut du cône d'éboulis |
| 17 | Limite supérieure du schorre |
| 18 | Limite supérieure de la slikke |
| 19 | Cordon de galets |
| 20 | Position de la 1ere barre d'avant-cote |
| 21 | Position de la 2nde barre d'avant-cote |
| 22 | Limite générée par MNT |
| 23 | Limite du Domaine Public Maritime |
| 24 | Limite parcellaire |
| 25 | Front de mangrove |

Figure 52 : Marqueurs du trait de côte "naturel".

3.1.2 Résultats obtenus

Un tracé linéaire du trait de côte récent est numérisé sur l'ensemble du trait de côte normand avec une table attributaire associée. Ce trait de côte est utilisé dans la suite de l'étude pour les *Calcul des valeurs d'évolution du trait de côte* et pour l'application de la *Méthode de projection du trait de côte*.

3.2 Calcul des valeurs d'évolution du trait de côte

Synthèse

Hypothèses et limites identifiées

Afin d'étudier l'évolution du trait de côte, les valeurs de vitesse d'évolution doivent être calculées. Pour cela, la méthode dite des « surfaces perdues ou gagnées » est appliquée.

Le trait de côte est découpé par des transects espacés de 50 m. Des casiers sont délimités entre deux transects. La surface entre deux traits de côte de deux périodes différentes comprise au sein d'un même casier est ensuite mesurée. La formule de la méthode des « surfaces perdues ou gagnées » est appliquée pour calculer la vitesse moyenne en m/an :

$$\frac{S_{totale}}{N_{années} * L_{transect}}$$

Dans la Manche, sept traits de côte ont été utilisés datant de : 1947, 1977, 1982, 1992, 2001, 2010 et 2019. Dans le Calvados, les mêmes traits de côte ont été utilisés, à l'exception de celui de 2019, remplacé par celui de 2016. En Seine-Maritime, deux traits de côte ont été utilisés datant de 1947 et 2019. La différence entre les traits de côte étudiés selon la région s'explique par la qualité des images ortholittorales disponibles au moment de la digitalisation du trait de côte.

Le niveau marin est estimé constant entre chaque position du trait de côte digitalisé.

Des limites liées à la méthode employée sont à noter :

- Les dynamiques d'évolution du trait de côte au sein de la période observée ne peuvent pas être étudiées et les potentiels changements récents de dynamique ne peuvent pas être bien restitués,
- Le taux d'évolution est calculé sur une distance de 50 m ; certains évènements (comme un éboulement ponctuel) peuvent donc modifier la représentation de la réelle mobilité du trait de côte.

Principaux résultats obtenus

Des valeurs de vitesses d'évolution en m/an du trait de côte entre deux périodes sont obtenues, par casier de 50 m.

3.2.1 Méthodologie

La méthode de travail est décomposée en 3 étapes :

1. Découpage du littoral par des transects,
2. Calcul de la surface totale entre deux traits de côte par casier,
3. Calcul de la différence entre la surface perdue et la surface gagnée pour connaître la vitesse d'évolution.

3.2.1.1 Découpage du littoral par des transects

Dans un premier temps, le littoral est découpé par des transects espacés de 50 m. Ces transects ont été positionnés selon les ouvrages impactant le transit sédimentaire. À partir du trait de côte extrait de la BD TOPO de l'IGN, des points sont générés tous les 50 m sur ArcGis. Ces transects permettent de délimiter casiers dans lesquels les calculs seront effectués (Figure 53). La surface de calcul considérée correspond à l'ensemble des polygones compris entre deux traits de côte de millésime différents au sein d'un même casier.

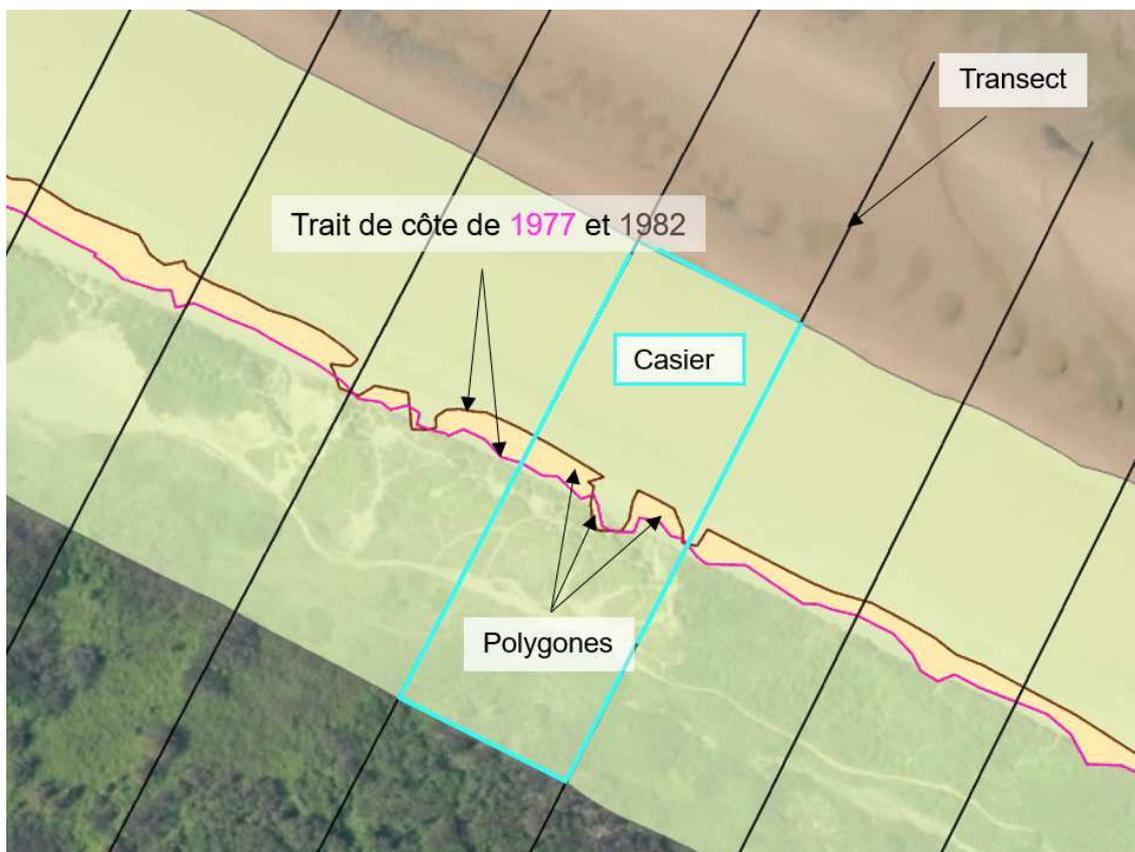


Figure 53 : Terminologie des éléments permettant de calculer la surface gagnée et/ou perdue entre deux traits de côte de millésimes différents.

3.2.1.2 Calcul de la surface totale d'évolution entre deux traits de côte

Afin de mesurer la vitesse d'évolution, la méthode des « surfaces perdues / gagnées » est utilisée. Elle consiste à effectuer le quotient de la surface entre deux traits de côte au sein d'un même casier ($S_{\text{totale d'évolution}}$ des polygones – voir Figure 53) par le produit du nombre d'années séparant les deux traits de côte ($N_{\text{années}}$) et la largeur des transects, ici 50 m (L_{transect}). La valeur obtenue est exprimée en m/an (Figure 54). Il faut donc dans un premier temps mesurer la surface totale (S_{totale}) entre les deux traits de côte au sein d'un même casier.

$$\frac{S_{\text{totale}}}{N_{\text{années}} * L_{\text{transect}}}$$

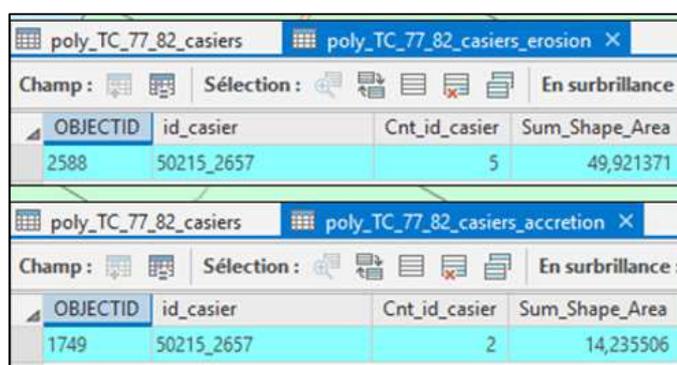
Figure 54 : Formule de la méthode des « surfaces perdues ou gagnées » appliquée pour calculer la vitesse moyenne d'évolution entre deux traits de côte en m/an.

Pour cela, des polygones sont créés par intersection entre les traits de côte et les transects (voir Figure 53). Ils représentent la surface perdue ou gagnée entre les deux périodes étudiées. Un casier peut alors comporter un seul polygone représentant un phénomène d'accrétion ou

d'érosion, ou plusieurs polygones représentant de l'accrétion et de l'érosion. La surface de chaque polygone est indiquée dans la table attributaire de la couche de polygones. A ce stade, la surface de chaque polygone est mesurée mais pas la surface totale de la somme des polygones présents au sein d'un casier.

Ensuite, il faut préciser pour chaque polygone s'il représente une surface en érosion ou en accrétion. Pour déterminer si un polygone est en accrétion ou en érosion, on distingue à partir du trait de côte de référence (un millésime donné) la partie terrestre de la partie maritime. Si l'emprise les polygones considérés sont terrestres, alors le polygone est en érosion, et inversement.

Afin de regrouper les polygones d'un même casier ensemble, la couche « casiers » est jointe à la couche des polygones. Ces casiers sont délimités par des limites imaginaires à une distance éloignée du trait de côte en mer et sur terre (voir Figure 53). Une fois la jointure effectuée, avec une sélection par attribut, les polygones sont séparés en deux tables selon leur évolution. Leurs surfaces sont alors additionnées afin d'obtenir la surface d'érosion totale par casier et la surface d'accrétion totale par casier (Figure 55).



| OBJECTID | id_casier | Cnt_id_casier | Sum_Shape_Area |
|----------|------------|---------------|----------------|
| 2588 | 50215_2657 | 5 | 49,921371 |

| OBJECTID | id_casier | Cnt_id_casier | Sum_Shape_Area |
|----------|------------|---------------|----------------|
| 1749 | 50215_2657 | 2 | 14,235506 |

Figure 55 : Surface totale en érosion et surface totale en accrétion par casier (exemple entre 1977 et 1982).

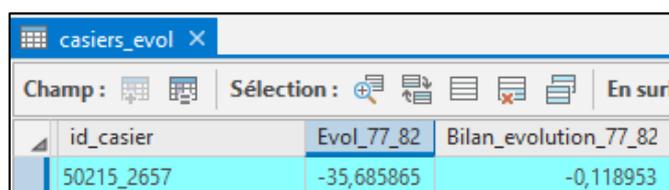
Pour réaliser le calcul de la surface totale d'évolution au sein d'un casier, la table regroupant les valeurs en érosion et celle regroupant les valeurs en accrétion sont jointes à la couche des casiers. Un nouveau champ est créé afin de calculer la surface totale. Trois types de calculs sont nécessaires en sélectionnant :

- Les valeurs positives en érosion et en accrétion = $S_{\text{totale en accrétion}} - S_{\text{totale en érosion}}$
- Les valeurs nulles d'érosion et les valeurs positives en accrétion = $S_{\text{totale en accrétion}}$
- Les valeurs positives en érosion et les valeurs nulles d'accrétion = $S_{\text{totale en érosion}}$

Ces calculs donnent alors les **surfaces totales d'évolution** ($S_{\text{totale d'évolution}}$) au sein de chaque casier.

3.2.1.3 Calcul de la vitesse d'évolution

Pour calculer la vitesse d'évolution par casier, il ne reste plus qu'à appliquer la formule de la méthode des « surfaces perdues / gagnées » (voir Figure 54 et Figure 56).



| id_casier | Evol_77_82 | Bilan_evolution_77_82 |
|------------|------------|-----------------------|
| 50215_2657 | -35,685865 | -0,118953 |

Figure 56 : Surface totale du casier (au centre) et vitesse d'évolution en m/an du casier (à droite).

3.2.2 Résultats obtenus

Des vitesses d'évolution en m/an sont alors obtenues par casier de 50 m.

Ces valeurs de vitesse d'évolution vont être utilisées dans la suite de l'étude afin de déterminer la position du trait de côte aux horizons 2050, 2120 et 2300, à niveau marin constant.

3.3 Méthode de projection du trait de côte

Synthèse

Hypothèses et limites identifiées

L'objectif ici est de déterminer une méthodologie de projection du trait de côte.

Selon la loi Climat et Résilience (article 242) qui fixe ses horizons à 30 et 100 ans, le trait de côte est projeté à l'horizon 2120. Afin de proposer des hypothèses adaptées pour projeter le trait de côte, ce dernier a été découpé en quatre catégories : les côtes à falaises / rocheuses, les Falaises des Vaches Noires et les falaises entre Trouville et Criqueboeuf, les côtes basses à évolution constante (accrétion constante ou érosion constante) et les côtes basses à évolution variée.

Pour étudier les secteurs à falaises, l'hypothèse retenue est de projeter le trait de côte selon les valeurs d'évolution entre 1947 et 2019, en y ajoutant les valeurs des événements historiques. Cette méthode permet de mesurer les grandes tendances évolutives et de prendre en compte les importants éboulements.

Les secteurs des Vaches Noires et entre Trouville et Criqueboeuf présentent une particularité, leurs crêtes de falaises n'est pas visible sur les photographies aériennes. De ce fait, ce sont les pieds de falaises qui ont été digitalisés. Cependant, des glissements de terrain se produisent, notamment sur les falaises meubles des Vaches Noires, et sont donc cartographiés en pied de falaise comme une accrétion ce qui fausse les résultats car c'est bien un phénomène d'érosion qui se produit sur l'ensemble des falaises. Il est proposé de comparer les Modèles Numériques de Terrain fournis par le ROL sur ces deux zones.

Sur les côtes basses à évolution constante, l'hypothèse retenue est de projeter les valeurs moyennes d'évolution entre 1947 et 2019 ainsi que la valeur maximale entre 1947 et 2019 (maximum d'évolution moyenne).

Sur les côtes basses à évolution variée la même hypothèse est retenue.

Cette hypothèse retenue pour les côtes basses permet de définir un espace de divagation et de donner une vision maximale qui rend compte du niveau de connaissance et des incertitudes actuelles.

Un diagramme illustrant les hypothèses retenues est présenté en *3.3.1.1 Présentation de la méthode choisie*.

Sur l'ensemble du littoral de la Normandie, les analyses proposées considèrent la période la plus longue entre 1947 et 2019. L'étude est réalisée sur une période de temps importante donc d'après un plus grand nombre de données, ce qui tend à les fiabiliser. Cependant, les résultats s'appuieront sur des données anciennes qui peuvent présenter des erreurs de géométrie et des incertitudes liées à la qualité des clichés. Par ailleurs, cette durée comprend les années de construction des ouvrages. Le fonctionnement du trait de côte avant la construction des ouvrages sera donc pris en compte, ce qui peut présenter l'avantage de donner une vision intégrant un avenir parfois incertain de ces ouvrages, mais ce qui peut aussi représenter une limite puisque l'évolution du trait de côte peut être totalement modifiée avec la présence de ces infrastructures.

La méthodologie produite présente cependant des limites :

- Incertitudes liées à la qualité et la géométrie des clichés anciens,
- Absence de Modèle Numérique de Terrain ancien,
- Incertitudes liées à l'interprétation par chaque opérateur lors du tracé des traits de côte, tout en respectant le cahier des charges,
- Modélisation qui ne présage pas du réel fonctionnement de la côte.

Les limites sont détaillées en Annexe 1.

Principaux résultats obtenus

Une méthode de projection a été déterminée et est adaptée pour chaque type de côte (voir Figure 57 dans la partie 3.3.1.1 Présentation de la méthode choisie). Des cartes du trait de côte projeté en 2120 ont été réalisées.

3.3.1 Méthodologie

3.3.1.1 Présentation de la méthode choisie

La méthode de projection choisie étudie le type d'évolution du trait de côte entre 1947 et 2019 selon le type de côte, à niveau marin constant (Figure 57).

Dans la suite du document, les titres des parties font référence aux cas listés dans le logigramme ci-après. Selon la loi Climat et Résilience²⁶ qui fixe ses horizons à 30 et 100 ans, le trait de côte est projeté en 2050 et 2120. Ici, la méthodologie sera détaillée seulement pour l'horizon 2120.

²⁶ Légifrance, « Article 242 - LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (1) ».

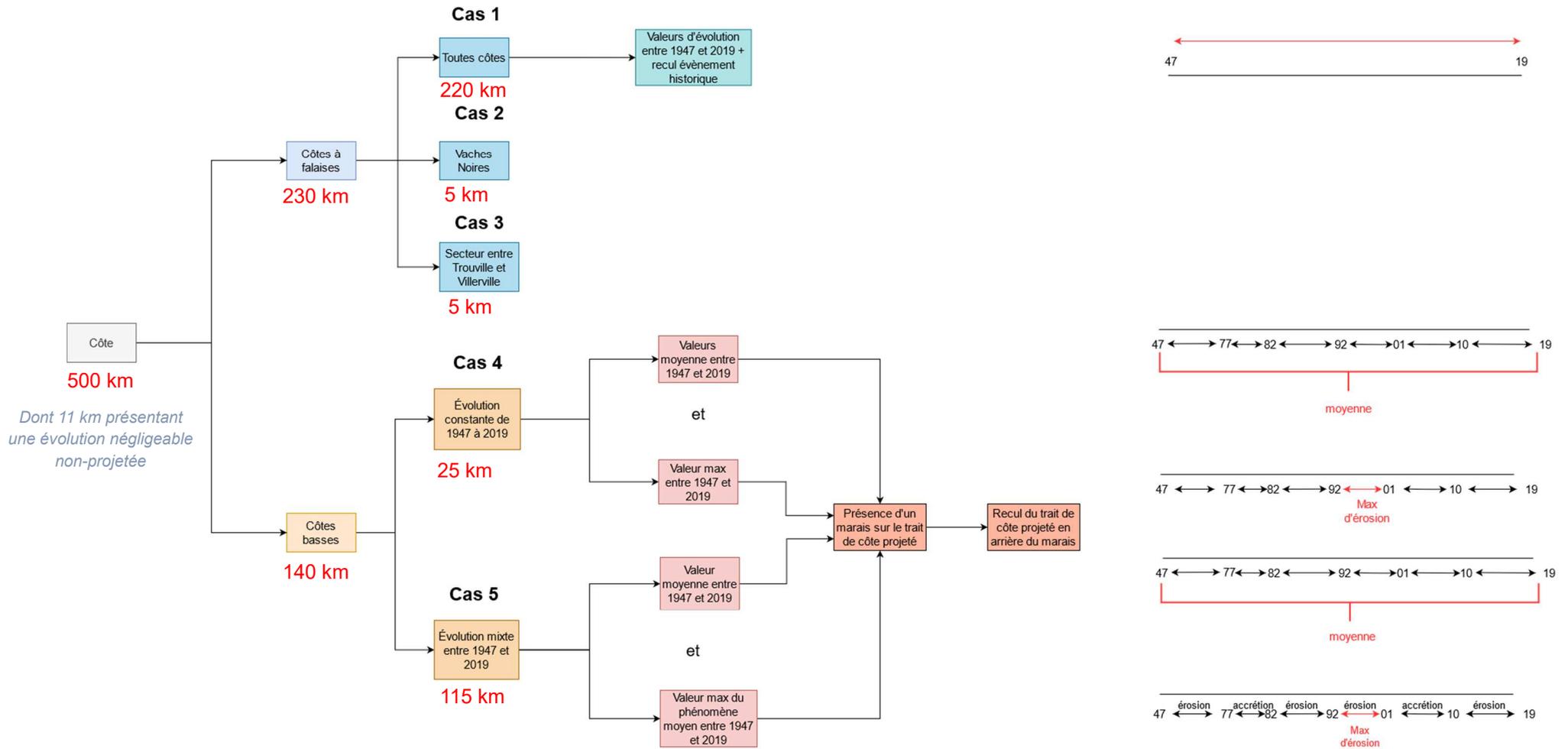


Figure 57 : Logigramme représentant la méthodologie finale de projection du trait de côte.

3.3.1.2 Cas 1 – Méthode de projection des côtes à falaises

Les côtes à falaises, en dehors des falaises des Vaches Noires ainsi que des falaises entre Trouville et Criquebœuf, représentent 220 km du trait de côte normand, dont environ 140 km de falaises sédimentaires et 80 km de côtes rocheuses.

Calcul des valeurs d'évolution entre 1947 et 2019

Les valeurs d'évolution entre le trait de côte ancien de 1947 et le trait de côte actuel de 2019 sont analysées. Pour le suivi de l'évolution des falaises, M.Crowell *et al.* (1993) préconisent un suivi sur 60-80 ans afin de mesurer les grandes tendances évolutives et non le « bruit de fond » créé par la variabilité du recul liée aux tempêtes, aux épisodes de froids intenses, aux variations saisonnières du stock de galets en pied de falaise, etc.²⁷

Les valeurs d'évolution entre 1947 et 2019 sont calculées selon la méthode des surfaces perdues / gagnées. Sont ajoutées à ces valeurs les valeurs de recul causées par un évènement historique sur toutes les côtes présentant les mêmes spécificités (secteurs homogènes).

Projection des valeurs d'évolution entre 1947 et 2019

Afin de visualiser un aperçu de la position du trait de côte à l'horizon 2120, les valeurs d'évolution entre 1947 et 2019 sont multipliées par 101 (101 ans entre 2019 et 2120). Le trait de côte actuel est alors avancé ou reculé selon les valeurs obtenues. Une zone tampon correspondant à ces valeurs est appliquée (Figure 58).

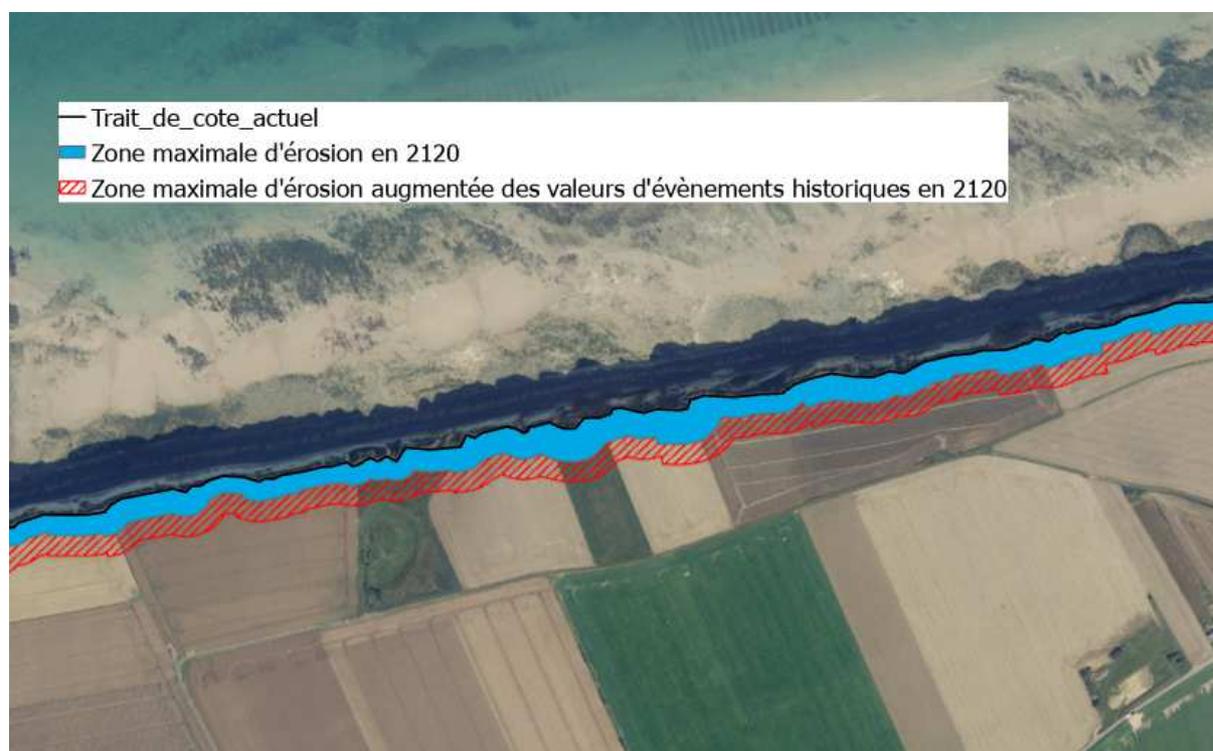


Figure 58 : Exemple de représentation de l'évolution du trait de côte d'ici 2120 selon l'évolution entre 1947 et 2019.

²⁷ Letortu, « Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits ».

3.3.1.3 Cas 2 et 3 – Méthode de projection des falaises des Vaches Noires et des falaises entre Trouville et Criquebœuf

Sur les côtes à falaises, le trait de côte qui est pris pour référence (et donc digitalisé) correspond aux crêtes de falaise hormis sur deux secteurs de côtes dans le Calvados :

- Le secteur Trouville-Villerville-Criquebœuf qui représente environ 5 km du trait de côte,
- Le secteur des Vaches Noires qui représente environ 5 km du trait de côte.

Appliquer seule la méthode décrite ci-avant à ces deux secteurs pourrait être pertinent pour évaluer l'évolution de ces falaises, mais cela n'est matériellement pas possible. En effet, sur Trouville-Villerville-Criquebœuf, **on ne distingue pas nettement une crête de falaise sur les photographies aériennes**. De même, les falaises des Vaches Noires sont très dentelées et **il n'est pas possible à partir des missions photographies verticales de distinguer une crête de falaise continue**. **Sur ces secteurs, c'est donc le pied de falaise qui est levé en tant que trait de côte.**

Or, sur le secteur de Trouville-Villerville-Criquebœuf, ce pied de falaise est parfois artificialisé et donc fixé par des ouvrages. Par ailleurs, ces deux secteurs de falaises sont constitués par des formations géologiques peu cohérentes. Des mouvements de terrain (glissements, coulées) se produisent et peuvent se propager jusqu'en pied de falaise, ces matériaux glissés/éboulés viennent s'accumuler en pied de falaise et en haut de plage. **En observation aérienne, ces glissements peuvent se traduire momentanément par une accumulation de matériaux en pied de falaise, et donc faussement par une "accrétion", alors qu'il s'agit bien de phénomènes d'érosion sur l'ensemble de la falaise.**

La méthode retenue pour les côtes à falaises est donc impossible à utiliser dans ces secteurs, une méthode innovante est nécessaire à mettre en œuvre. Cette méthode devra :

- Permettre de rendre compte de l'évolution de ces falaises,
- Être adaptée au mode d'évolution de ces falaises.

Dans son programme d'actions, le ROL fait procéder à l'acquisition de données LIDAR depuis 2016. Ainsi deux millésimes ont été produits :

- 2017 : un modèle numérique « moyen » a d'abord été livré. Les points altimétriques (z) correspondent à une moyenne entre le sursol et le sol. Ce modèle ne convient donc pas. Il est en cours de reprise. A l'issue, un véritable modèle numérique de terrain (MNT) représentant le relief du terrain naturel sera à disposition.
- 2020 : un modèle numérique d'élévation (MNE) a été acquis avec la production également d'un MNT fiable et validé, et donc directement utilisable.

Aucun autre LIDAR n'est disponible à des dates antérieures.

Il paraît donc possible de comparer uniquement les deux dates 2017 et 2020 lorsque le millésime 2017 sera disponible. Mais il n'est pas possible de procéder à un drapage de clichés anciens sur des MNT récents puisqu'entre les dates, la topographie aura évolué et que le résultat sera donc totalement faussé.

Pour tenter une analyse sur ce secteur, le Cerema propose deux solutions :

1 - collecter les photogrammétries produites à plusieurs dates par le laboratoire Géophen avec deux possibilités d'analyse :

- Si les données sont recalées en x,y alors reconstituer des orthophotographies et des MNT géoréférencés ;
- Si les données ne sont pas recalées en x,y alors comparer les photogrammétriques par analyse des volumes.

2 – Utiliser le MNT Lidar de 2020 en donnée d'entrée. Lever une ligne de crête précise à partir de ce jeu de données. Puis procéder par photo-interprétation des orthophotographies anciennes en affichant en surcouche le trait de côte levé à partir du MNT 2020 et en montrant les évolutions possibles.

Une étude de faisabilité pourra donc être conduite dans un second temps pour traiter le cas particulier de ces secteurs et expérimenter de nouvelles méthodes.

3.3.1.4 Cas 4 – Méthode de projection des côtes basses à évolution constante

Sur les côtes basses, l'analyse de l'évolution se fera sur l'ensemble des périodes disponibles à savoir : 1947-1977, 1977-1982, 1982-1992, 1992-2001, 2001-2010 et 2010-2019. Le choix d'analyser l'ensemble des données permet d'intégrer les effets de grandes tempêtes qui font véritablement évoluer les rivages²⁸, et de réaliser l'étude sur une période la plus importante possible avec le plus grand nombre de données.

Secteurs à évolution constante de 1947 à 2019

Ces secteurs représentent environ 25 km du trait de côte normand, dont environ 12 km en accrétion constante et 13 km en érosion constante.

Calcul des valeurs moyennes et maximales d'évolution de 1947 à 2019

Dans le cas des zones à évolution constante (à savoir en érosion constante ou en accrétion constante), les méthodes de projection choisies sont les suivantes :

- Moyenne des évolutions en m/an entre chaque période :

En tenant compte des dates intermédiaires du ROL, cela revient à analyser les évolutions entre 1947-1977, 1977-1982, 1982-1992, 1992-2001, 2001-2010 et 2010-2019 et à en faire la moyenne. Ces valeurs d'évolution ont été calculées selon la méthode des surfaces perdues / gagnées.

- Évolution maximale :

En tenant compte des dates intermédiaires du ROL, cela revient à analyser les évolutions entre 1947-1977, 1977-1982, 1982-1992, 1992-2001, 2001-2010 et 2010-2019.

Projection des valeurs moyennes et maximales de 1947 à 2019

Afin de visualiser un aperçu de la position du trait de côte à l'horizon 2120, il reste à transformer les valeurs obtenues précédemment pour qu'elles représentent ce dernier. Pour cela il suffit tout d'abord de multiplier les valeurs moyennes et maximales par 101 (101 ans entre 2019 et 2120) et de reculer / avancer le trait de côte actuelle selon ces valeurs. Une zone tampon correspondant à un espace de divagation entre la moyenne et le maximum d'évolution est ensuite créée (Figure 59).

²⁸ Clus-Auby, Paskoff, et Verger, « Impact du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du littoral ».

Ce choix de méthode, projection de la moyenne d'évolution et de la valeur maximale d'évolution, permet de définir un espace de divagation et de donner une vision maximale qui rend compte du niveau de connaissance et des incertitudes actuelles.

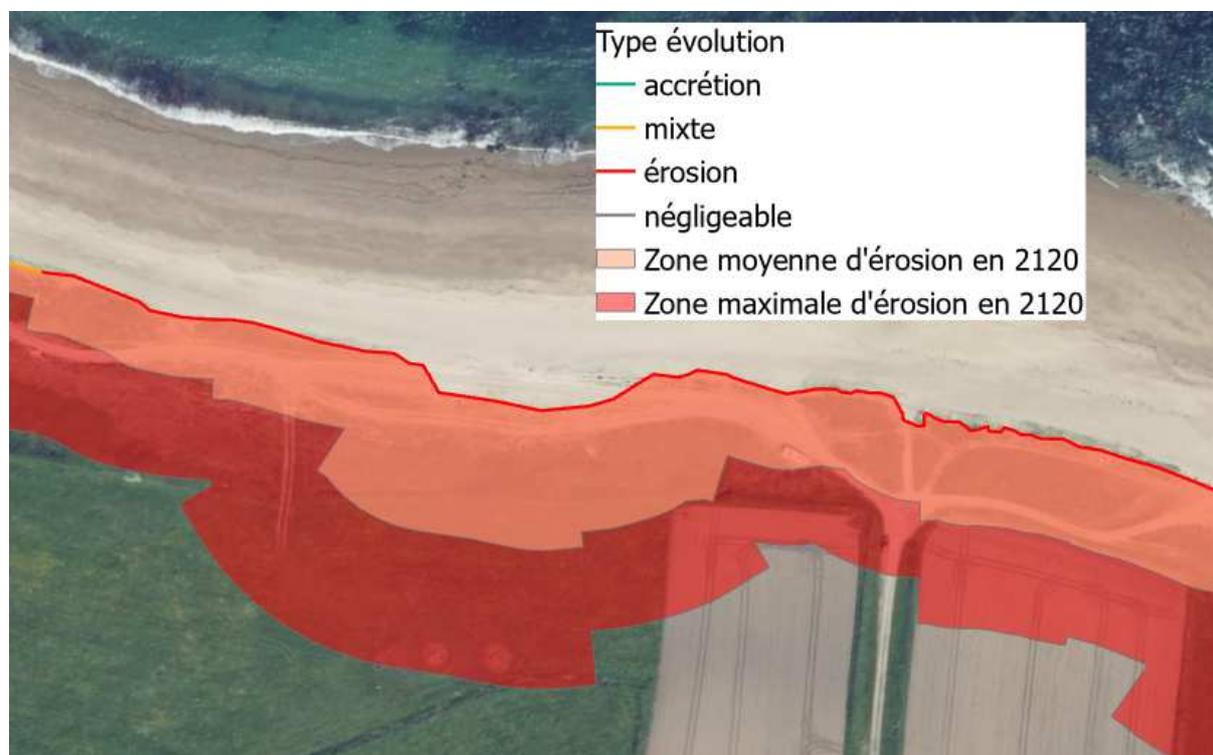


Figure 59 : Exemple de secteur en érosion constante.

3.3.1.5 Cas 5 – Méthode de projection des côtes basses à évolution variée

Ces secteurs représentent environ 115 km du trait de côte normand.

Calcul des valeurs moyennes et maximales d'évolution de 1947 à 2019

Les méthodes de projection appliquées dans la partie sur les Secteurs à évolution constante de 1947 à 2019 sont réutilisées.

Cependant, dans le cas de l'évolution maximale, le maximum d'évolution à projeter correspond au maximum d'évolution moyenne. Par exemple si la moyenne d'évolution représente une accrétion, la valeur maximale choisie est le maximum d'accrétion sur la période.

Projection des valeurs moyennes et maximales de 1947 à 2019

Afin de visualiser un aperçu de la position du trait de côte à l'horizon 2120, il reste à transformer les valeurs obtenues précédemment pour qu'elles représentent ce dernier. Pour cela les valeurs moyennes et maximales sont multipliées par 101 (101 ans entre 2019 et 2100) et de reculer / avancer le trait de côte actuelle selon ces valeurs. Une zone tampon correspondant à un espace de divagation entre la moyenne et le maximum d'évolution est ensuite créée (Figure 60).

Ce choix de méthode, projection de la moyenne d'évolution et de la valeur maximale d'évolution, permet de définir un espace de divagation et de donner une vision maximale qui rend compte du niveau de connaissance et des incertitudes actuelles.



Figure 60 : Exemple de secteur à évolution variée.

Sur l'ensemble du littoral de la Normandie, les analyses proposées considèrent la période la plus longue entre 1947 et 2019. Cette durée comprend les années de construction des ouvrages. Le fonctionnement du trait de côte avant la construction des ouvrages sera donc pris en compte, ce qui peut présenter l'avantage de donner une vision intégrant un avenir parfois incertain de ces ouvrages, mais ce qui peut aussi représenter une limite puisque l'évolution du trait de côte peut être totalement modifiée avec la présence de ces infrastructures.

3.3.1.6 Présence d'un marais en arrière du trait de côte projeté

Des marais maritimes sont présents sur le littoral de la Normandie. Ils sont parfois situés immédiatement en rétro-littoral. Lors de la projection du trait de côte aux horizons définis, si le trait de côte recoupe un marais, alors le trait de côte est déplacé immédiatement derrière le marais, considérant que le marais n'existera plus (Figure 61).

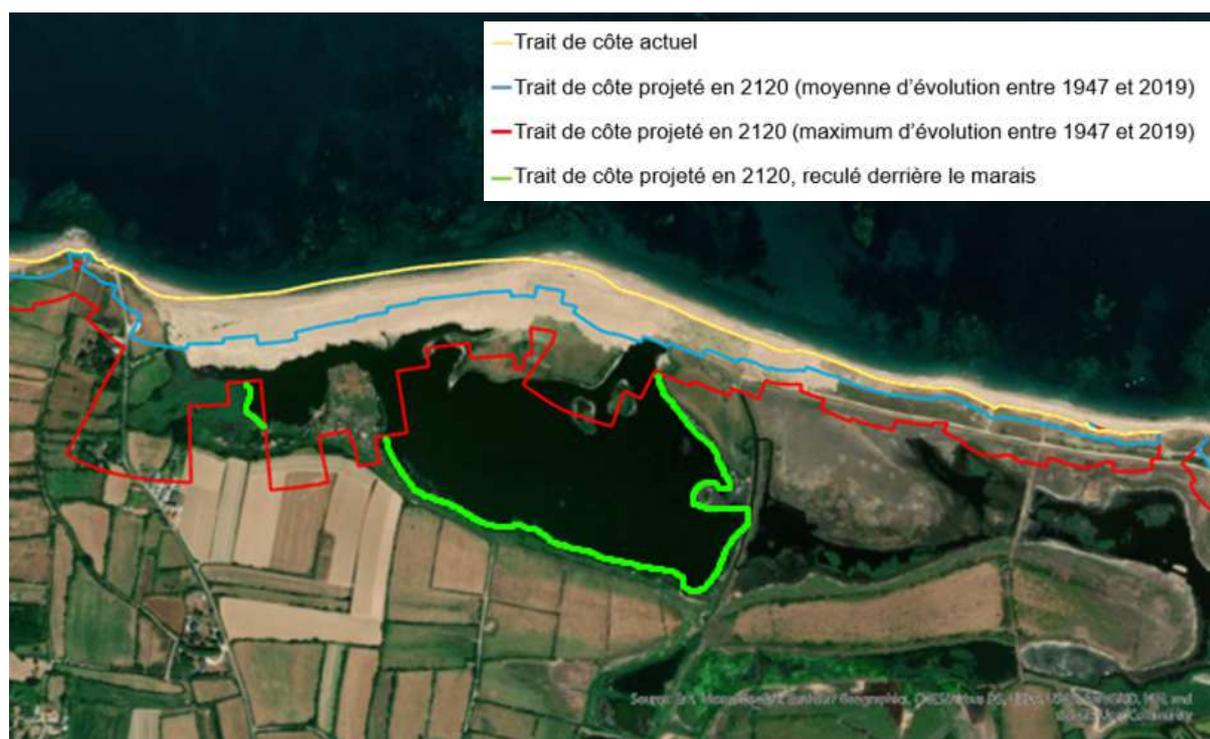


Figure 61 : Position du trait de côte en 2120 selon la moyenne d'évolution 1947-2019 (en bleu), selon le maximum d'évolution 1947-2019 (en rouge) et position du trait de côte une fois reculé en arrière du marais (en vert).

3.3.2 Résultats obtenus

Sur l'ensemble de la façade normande, les projections réalisées montrent des évolutions très variables entre les secteurs à falaise et les côtes basses (Tableau 4). La prise en compte des marais arrière-littoraux ajoute une surface de recul d'environ 261 km² à l'horizon 2050, de 285 km² à l'horizon 2120 et de 364 km² à l'horizon 2300 à l'échelle de la Normandie.

Tableau 4 : Vitesses moyennes d'évolution des côtes normandes par cas d'étude de projection du trait de côte.

| | | Cas 1 | | | Cas 4 | Cas 5 |
|-----------------------------|---------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Type de côte | | Côtes à falaise rocheuse | Côtes à falaise sédimentaires | | Côtes basses | |
| Type d'évolution | | Erosion constante | | | Accrétion constante | Variée |
| Vitesse moyenne d'évolution | | 0,013 m/an | Sans évèn. hist. 0,12 m/an | Avec évèn. hist. 0,7 à 0,2 m/an | 0,35 m/an | 0,48 m/an - 0,3 m/an |
| Evolution moyenne | En 2050 | 0,4 m | 3,7 m | 23 m | 11,1 m | 14,7 m - 9,6 m |
| | En 2120 | 1,3 m | 12 m | 31,3 m | 35,8 m | 48 m -31,2 m |
| | En 2300 | 3,6 m | 33,3 m | 52,7 m | 95,9 m | 133,2 m - 84,8 m |
| Evolution maximale | En 2050 | - | - | - | 32,5 m | 48,9 m - 55,6 m |
| | En 2120 | - | - | - | 105,3 m | 159,3 m - 181,2 m |
| | En 2300 | - | - | - | 278,2 m | 441,9 m - 499,5 m |

Sur les cartes obtenues il est constaté des pics d'évolution nets sur certains casiers. Ces évolutions n'étant pas cohérentes avec la réalité, un lissage de la représentation graphique est nécessaire pour donner un aspect plus réaliste au trait de côte projeté.

3.4 Lissage des zones de projections

Synthèse

Hypothèses et limites identifiées

Suite à l'analyse de l'évolution du trait de côte aux horizons 2050, 2120 et 2300, des zones de projections ont été créées. Issues de modélisations, ces dernières nécessitent une reprise de leur représentation graphique afin de leur donner un aspect plus naturel et plus représentatif de la réelle forme du trait de côte.

Plusieurs tolérances de lissage ont été testées (25 m, 50 m, 75 m, 100 m, 150 m et 200 m) notamment en tenant compte de l'aspect des zones de projections et du nombre de bâtiments impactés. Ce lissage est uniquement graphique, il ne change pas les données brutes.

Les limites identifiées sont les suivantes :

- Forte variation du nombre de bâtiment impacté selon la tolérance de lissage,
- Superpositions de certaines zones d'érosion et d'accrétion.
- Aspect global plus ou moins réaliste du trait de côte.

Principaux résultats

Suite à la comparaison des différentes tolérances de lissage, il a été décidé de représenter les zones de projections selon un lissage de tolérance 75 m.



Cependant, au vu de la variation du nombre de bâtiments impactés selon le lissage, les traitements concernant les enjeux seront réalisés sur les couches de projection brutes, non lissées. Les zones de projections seront découpées au droit des casiers afin de supprimer les superpositions.

3.4.1 Méthodologie

Afin de déterminer quel lissage sera appliqué, les couches de projection du trait de côte en 2120 sont testées selon les tolérances suivantes : 25 m, 50 m, 75 m, 100 m, 150 m et 200 m. Les différentes tolérances de lissage correspondent à une longueur de chemin qui sert à calculer les nouveaux sommets. Plus la longueur est courte, plus le niveau de détail est préservé.

Suite à ces traitements, l'aspect des couches lissées ainsi que le nombre de bâtiment impactés par ces dernières sont étudiés. Ce deuxième point permet d'avoir une idée de l'effet du lissage sur la représentation des enjeux impactés réalisée dans la suite de l'étude.

Les différentes observations sont présentées en Annexe 4.

3.4.2 Résultats obtenus

L'analyse des différentes tolérances de lissage a montré que le nombre de bâtiment diminuait ou augmentait selon la tolérance. Suite à cette observation, il a été décidé que le calcul des enjeux sera réalisé sur les couches de projections brutes, sans lissage. Le lissage sera seulement appliqué pour la représentation cartographique. **Seul l'aspect du lissage est donc à prendre en compte.**

Le lissage de tolérance 75 m semble le plus approprié. En effet, les zones de projections sont plus représentatives du trait de côte réel par leurs formes plus arrondies et par le lissage des fortes variations d'évolution. De plus, avec cette tolérance, le nombre de bâtiments impactés se rapproche de la valeur sans lissage.

Sur certaines zones, la projection de zones en érosion se superpose à la projection de zones en accrétion. Un découpage des zones de projection au droit des casiers est alors réalisé afin de supprimer ces superpositions (Figure 62).



Figure 62 : Découpage des zones de projection au droit des casiers pour supprimer les superpositions de secteurs en accrétion avec des secteurs en érosion.

4. ANALYSE DE LA SUBMERSION MARINE

Synthèse

Hypothèses et limites identifiées

L'objectif de cette partie est d'estimer des zones d'effets de la submersion marine en Normandie en 2050 et 2120, au regard des valeurs d'élévation du niveau marin, afin de pouvoir, par la suite, en cumulant les effets liés à l'érosion et à la submersion, estimer les enjeux impactés. Pour cela, des données de modélisation prospectives existantes de submersion sont croisées avec la vulnérabilité des dunes en avant de ces zones de submersion.

La méthodologie utilisée par la DREAL Normandie pour modéliser les zones de submersion marine a été choisie dans le cadre de cette étude car les données sont en adéquation avec les horizons de projection.

Les données utilisées sont :

- Les Zones Potentiellement sous le Niveau Marin (ZPNM) générées par la DREAL Normandie au NM100al et NM100al + 50 cm,
- La vulnérabilité des dunes, quantifiée dans la partie « Création d'une typologie dunaire ».

A l'horizon 2120, les ZPNM ont été générées d'après :

- Les Niveaux Extrêmes du SHOM et du Cerema,
- Les données topographiques du MNT RGE ALTI à 5 m de l'IGN.

Cette étude présente cependant des limites liées à l'état actuel des connaissances et à la méthode retenue :

- La vulnérabilité des dunes s'appuie sur une hauteur de crête relevée à un temps donné,
- L'analyse est réalisée uniquement sur la submersion des zones basses causée par l'élévation du niveau marin ; les débordements de nappes et de rivières ne sont pas étudiés, ainsi que l'impact des ouvrages,
- L'analyse est réalisée sur le trait de côte actuel et non le trait de côte projeté aux horizons futurs.

Principaux résultats

Cette comparaison permet notamment de confirmer la présence de zones submersibles mais aussi de déterminer les zones submersibles qui sont finalement protégées par des dunes résistantes et extrêmement résistantes, qui agissent comme barrage à la submersion marine. De plus, elles permettent d'affiner et de compléter les projections réalisées.

4.1 Données de modélisation de la submersion marine

La submersion marine est une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et/ou de marée défavorables. Elle peut se produire par débordement (le niveau marin dépasse la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel), par franchissement (après un déferlement de la houle, les paquets de mer dépassent la cote de crête des ouvrages ou du terrain naturel) ou par rupture du système de protection (défaillance d'un ouvrage de protection ou formation de brèches dans le cordon littoral, notamment par érosion).

Avec la hausse du niveau marin, estimée à 0,4 m en 2050 et 1,10 m en 2100, le risque de submersion marine sur le littoral augmente. Afin d'étudier l'impact de cette submersion sur les côtes ainsi que les enjeux qui y sont liés, des modélisations sont créées par différents instituts. Ces modélisations sont construites d'après des méthodologies s'appuyant sur différentes données : un niveau marin, des valeurs d'élévation du niveau marin, des données topographiques, etc. Les méthodologies utilisées par le BRGM et par la DREAL Normandie sont décrites dans les parties suivantes.

4.1.1 Méthodologie appliquée par le BRGM

Le BRGM s'est appuyé sur des données topographiques pour identifier les zones basses, qui pourraient être soumises à la submersion marine sous l'effet de l'élévation du niveau marin. La topographie utilisée provient des données à très haute résolution acquises par LiDAR. La modélisation est réalisée pour une élévation de 0 à 4 m avec un pas de 50 cm (Figure 63).

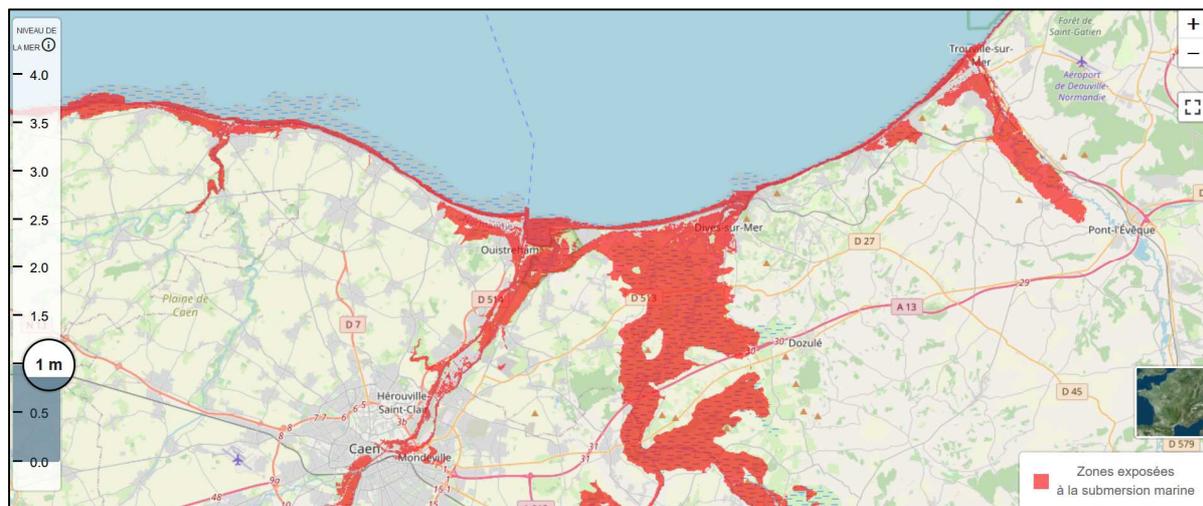


Figure 63 : Modélisation des zones submergées à 1 m d'élévation du niveau marin réalisée par le BRGM.

Les estimations d'élévation du niveau marin proviennent du Rapport Spécial du GIEC de 2019. Les zones submergées correspondent aux zones sous le niveau des plus hautes marées astronomiques (PHMA), ajouté à la valeur d'élévation du niveau marin sélectionnées, ajoutée à une valeur de surcote (Figure 64).

Dans cette modélisation les ouvrages sont considérés comme transparents à l'écoulement, ils n'agissent pas comme obstacle à la submersion. Les calculs et la visualisation sont disponibles à une résolution de 25 m sur de grandes emprises (échelles inférieures à 1/20 000^e –et à une résolution de 1 m ou 5 m en zoomant (échelles entre 1/20 000^e et 1/1 000^e).

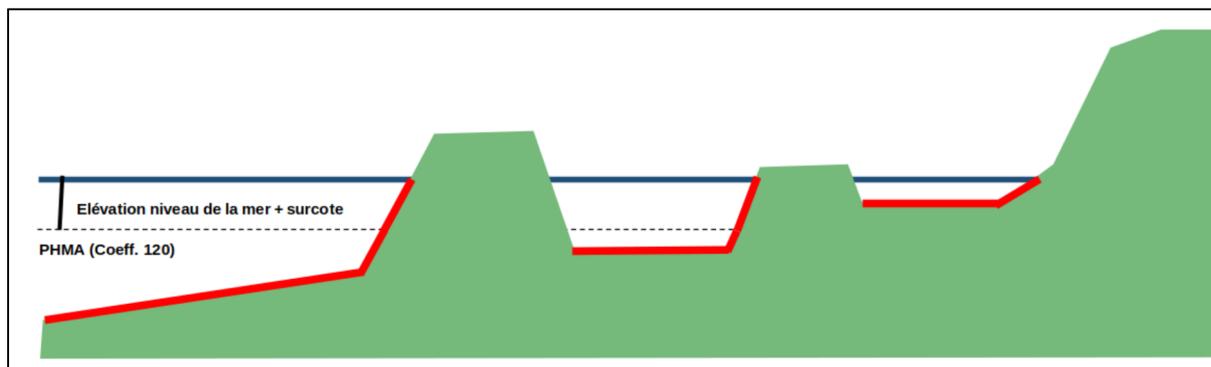


Figure 64 : Schéma explicatif de la méthodologie appliquée par le BRGM.

Ce modèle présente plusieurs limites, notamment liées à la méthode employée. Tout d'abord, la projection « statique » du niveau sur la topographie ne prend pas compte de la dynamique des phénomènes (marée, débordement limité dans le temps, etc.). De plus, les franchissements par paquets de mer ainsi que les rivières ne sont pas considérés dans cette modélisation. La prise en compte de l'ensemble de ces phénomènes nécessiterait une modélisation dynamique, une caractérisation des vagues au large, un modèle hydrodynamique et une importante connaissance des paramètres des rivières. Ces analyses ne peuvent pas être réalisées à l'échelle de la région. Des limites liées aux données utilisées peuvent aussi apparaître.

4.1.2 Méthodologie appliquée par la DREAL Normandie

Comme pour le modèle du BRGM, le modèle de la DREAL a identifié des zones basses grâce aux données topographiques acquises par LiDAR. Les données d'élévation du niveau marin utilisées sont celles estimées dans le scénario RCP8.5 présenté dans le Rapport Spécial du GIEC de 2019. Ces estimations sont de 50 cm en 2050 et 1,10 m en 2100 (Figure 65).



Figure 65 : Modélisation des zones submergées à différents niveaux d'élévation du niveau marin réalisée par la DREAL Normandie.

Un des points différenciant la méthodologie de ce modèle et celle du BRGM est le niveau marin étudié. En effet, pour établir les zones sous le niveau marin, le DREAL a découpé le littoral normand en plusieurs classes de zones basses déterminées en s'appuyant sur des éléments physiques, géographiques et géologiques. A chacune de ces classes a ensuite été attribué la valeur maximale du niveau marin de référence (NMR). Le niveau marin centennal déterminé pour chaque classe de zone basse est ensuite projeté sur un modèle numérique de terrain (MNT) afin de délimiter le périmètre des zones sous le niveau marin. Cette méthode

est ensuite reproduite pour chacune des hypothèses d'élévation. Les zones, appelées « zones potentiellement sous le niveau marin (ZPNM) », sont exploitées au 1/25 000^e.

Les limites du modèle du BRGM sont aussi applicables au modèle de la DREAL. Cependant, ce dernier présente une limite supplémentaire : sa précision. En effet, les ZPNM sont déterminés à une échelle de 1/25 000^e. Toute interprétation ou lecture des données à une échelle plus grande n'est pas fiable. Cette faible résolution entraîne une perte en précision qui peut se révéler problématique notamment lors de la détermination des enjeux liés à la submersion.

4.1.3 Choix de la méthodologie

Les éléments des deux méthodologies ont été comparés (Tableau 5). Le choix de la méthodologie retenue s'est fait par analyse de deux critères indispensables pour cette étude :

- L'adéquation des horizons de projection,
- L'échelle de travail.

La finesse de la précision existante pour l'affichage du modèle utilisé par le BRGM, n'est pas forcément utile dans le cadre de cette étude, réalisée à l'échelle régionale.

De plus, le scénario utilisé pour l'élévation du niveau marin dans le modèle utilisé par le DREAL Normandie est le même que celui appliqué dans le cadre de cette étude ; ce dernier se base sur des valeurs d'élévation du niveau marin mesurée par rapport au NM100al.

Ce sont donc les données de submersion marine utilisées par la DREAL Normandie qui sont retenues pour les estimations à l'horizon 2050.

Tableau 5 : Comparaison des deux méthodologies de modélisation de la submersion marine.

| | Donnée élévation | Niveau marin | Projection | Topographie | Résolution / échelle | Prise en compte ouvrages | Limites |
|------------------------|----------------------|-------------------------------------|------------|--|--|--------------------------|--|
| BRGM | IPCC 2019 | PHMA + surcote + élévation NM | Statique | LiDAR (RGE-ALTI), partie terrestre Litto3D | 25 m ($< 1/20\ 000^e$) 1 m ou 5 m (entre $1/20\ 000^e$ et $1/1\ 000^e$). | Non | Pas de dynamique phénomènes Franchissement par paquet de mer et débit rivières non-considérés |
| DREAL Normandie | IPCC 2019 RCP 8.5 | NM100al, + 50 cm, + 110 cm | Statique | LiDAR 2017 (RGE ALTI) | 1/25 000 ^e | Non | Si affichage $< 1/25\ 000 =$ donnée pas fiable Pas de dynamique des phénomènes |

Cependant une modélisation des ZPNM supplémentaire doit être réalisée aux horizons 2120 et 2300 avec une élévation du NM100al de 1.2 m et 3 m.

4.1.4 Méthodologie des ZPNM en 2120

Afin de modéliser les ZPNM aux horizons 2120 et 2300 avec une hausse du niveau marin centennal de 1.2 m et 3 m, deux couches de données ont été utilisées :

- Les valeurs de NM100al issus des Niveaux Extrêmes du SHOM et du Cerema,
- Les données topographiques issus du MNT RGE Alti à 5 m de l'IGN.

Le niveau marin centennal (NM100al) correspond à un niveau marin de période de retour d'au moins 100 ans. C'est-à-dire qu'il a une chance sur cent d'être atteint chaque année. Ces niveaux extrêmes sont essentiels dans le cadre de la prévention des risques à la submersion.²⁹

Dans un premier temps, les valeurs de NM100al sont augmentées de 1.2 m. Ces nouvelles valeurs sont ensuite croisées avec les données topographiques afin de mettre en avant les zones dont l'altitude est inférieure au NM100al + 1.2 m. Après ce traitement, une couche de zone basse par NM100al est obtenue.

Pour rappel, différentes valeurs de niveaux marins centennaux impactent le littoral normand (Figure 66).

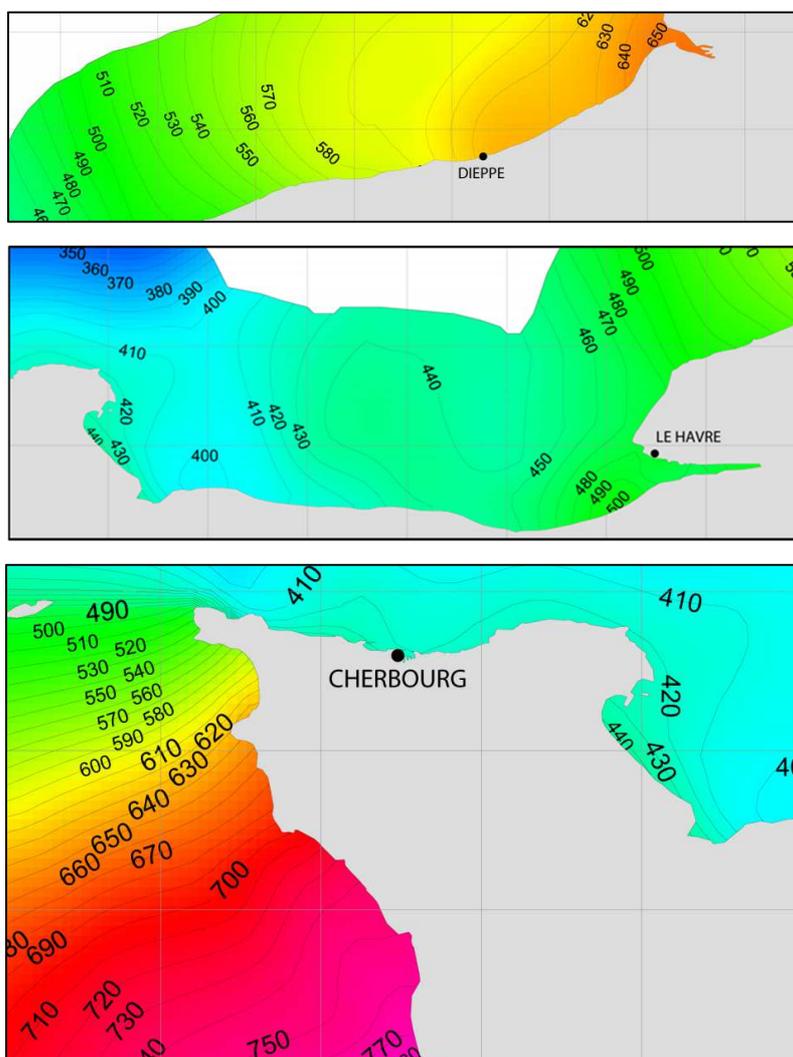


Figure 66 Cartes des estimations des niveaux marins centennaux en Normandie

²⁹ SHOM et CETMEF, « Note méthodologique - SHOM CETMEF - Niveaux extrêmes ».

Un découpage à dire d'expert est ensuite réalisé afin de combiner les différentes couches de zones basses pour obtenir une unique couche de zone basse le long du littoral.

La même méthodologie est appliquée pour les ZPNM en 2300 avec une augmentation de 3 m des niveaux marins centennaux.

4.1.5 Résultat obtenus

Trois couches de ZPNM sont obtenues : les ZPNM en 2050, en 2120 et en 2300 (Figure 67).

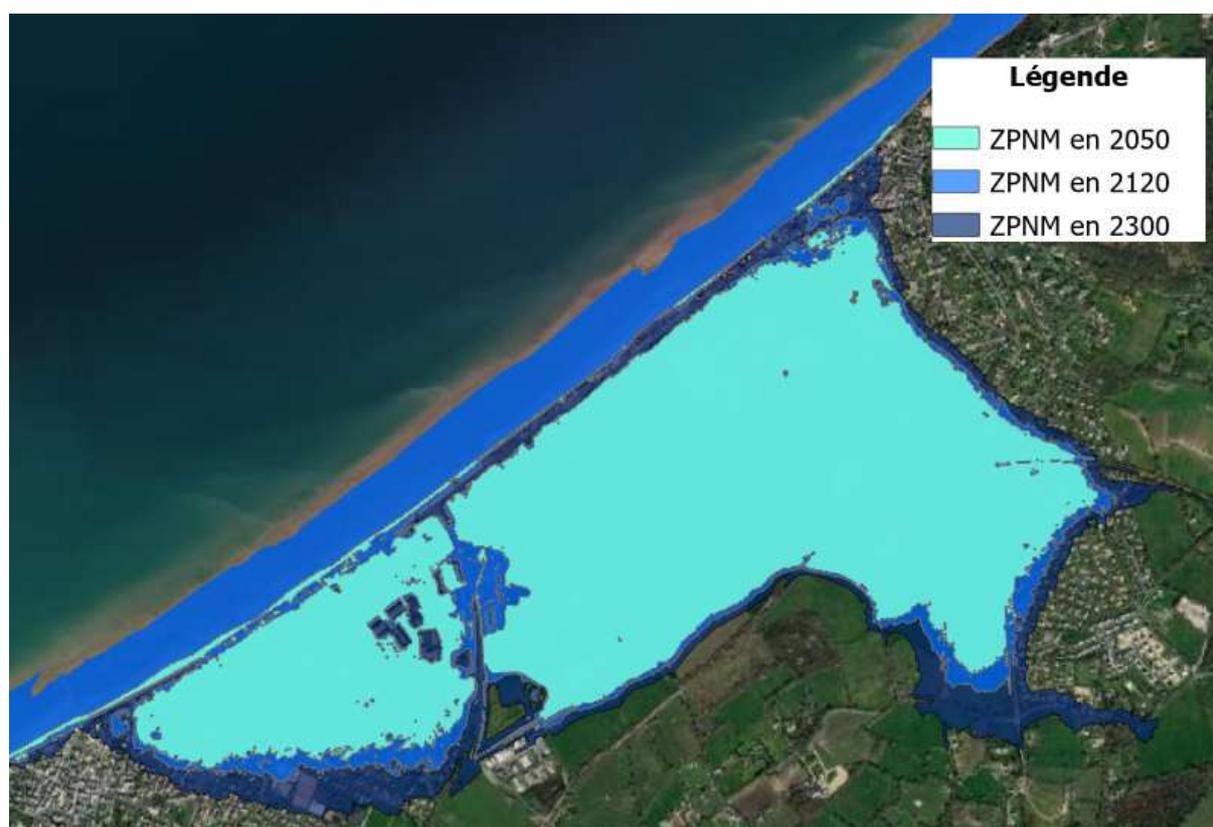


Figure 67 Exemple des ZPNM 2050, 2120 et 2300 entre Blonville-sur-Mer et Villers-sur-Mer

4.2 Création d'une typologie dunaire

Synthèse

Hypothèses et limites identifiées

Cette partie présente le travail réalisé dans le cadre de la création d'une typologie des dunes de Normandie. Cette typologie est une aide à la détermination de leur vulnérabilité à l'érosion causée par la submersion marine.

La typologie créée s'appuie sur la méthodologie de l'ONF, affinée selon quatre critères :

- Leurs profils topographiques (« équilibré » ou « droit »),
- La couverture végétale présente sur les dunes (discontinue, continue et rase ou continue avec des arbustes/arbres),
- Leur capacité de recul qui peut être possible ou bloquée,
- Leur robustesse face à la submersion marine, estimée d'après la hauteur et la largeur des dunes vis-à-vis des niveaux marins aux horizons actuel et 2120 (respectivement NM100al et NM100al+1,20 m).

A noter que les dunes présentant une hauteur inférieure au NM100al sont directement considérées « Très vulnérables » (ou « Transparentes » d'après la terminologie de l'ONF) et ont été exclues des pondérations par les critères cités.

A chacun de ces critères a été attribué une valeur représentant un niveau plus ou moins fort de sensibilité à l'érosion par submersion. Le tableau ci-après présente ces valeurs de pondération ainsi que les résultats une fois la somme des différents critères faite.

| Critère | Choix | Description | Valeur | Résultat |
|---------------------|---------------------------|---|--------|---|
| Profil dunaire | Equilibré | L = ou > 3h | 2 | Somme des valeurs des 4 critères : = de 3 à 6 : Vulnérable = de 7 à 11 : Résistante |
| | Etroit | L < 3h | 1 | |
| Couverture végétale | Discontinue | Végétation psammophile éparse | 1 | |
| | Continue rase | Végétation rase dense | 2 | |
| | Continue arbuste ou arbre | Végétation arbustive et ligneuse | 3 | |
| Capacité de recul | Possible | Pas d'aménagements en arrière-dune | 2 | |
| | Bloquée | Présence d'aménagement en arrière-dune | 0 | |
| Robustesse | Peu robuste | Largeur au NM100al inférieure à 20m et sous le NM100al +1.2 m | 1 | |
| | Robuste | Largeur au NM100al supérieure à 20m et sous le NM100al +1.2 m | 2 | |
| | Très robuste | Largeur au NM100al+1.2 m inférieure à 20 m | 3 | |

Afin de préciser la résistance des dunes entre 2120 et 2300, l'exercice a été réalisé avec le NM100al+1,20 m et le NM100al+3,00 m.

| Description | Résultat |
|--|--------------------------------|
| Largeur au NM100al+1.2 m supérieure à 20m et hauteur inférieure au NM100al+3.0 m | Extrêmement résistante en 2120 |
| Largeur au NM100al+1.2 m supérieure à 20m et hauteur supérieure au NM100al+3.0 m | Extrêmement résistante en 2300 |

Ainsi, quatre niveaux de vulnérabilité sont obtenus :

- **Très vulnérable (ou « transparente »)** : Dune submergée à l'horizon 2120,
- **Vulnérable** : Dune dont l'érosion peut la rendre submersible à l'horizon 2120,
- **Résistante** : Dune qui ne sera probablement pas submergée et peu érodée à l'horizon 2120,
- **Extrêmement résistante en 2120** : Dune qui ne sera ni submergée ni érodée à l'horizon 2120,
- **Extrêmement résistante en 2300** : Dune qui ne sera ni submergée ni érodée à l'horizon 2300.

Cette typologie présente cependant quelques limites :

- Incertitudes liées au niveau marin de référence,
- Détermination qui ne présage pas du fonctionnement réel de la côte.

Les limites détaillées sont présentées en annexe 1 du rapport d'étude.

Principaux résultats obtenus

Les résultats ont mis en évidence que sur les côtes normandes :

- 0.5 % des dunes sont Très vulnérables
- 5 % sont Vulnérables
- 15 % sont Résistantes
- 28.5 % sont Extrêmement résistantes
- 51 % sont Extrêmement résistantes en 2300

4.2.1 Méthodologie

La typologie dunaire appliquée dans le cadre de cette étude s'appuie sur la méthodologie de l'Office National des Forêts (2014)³⁰ qui définit notamment les critères de classement à partir de la taille, la forme de la dune et la végétation présente. Le type d'arrière-littoral ainsi que la présence d'aménagements anthropiques arrière et latéraux sont également des critères de définition des types de dunes. Le guide de l'ONF obtient pour résultat final un classement en

³⁰ Office National des Forêts, « Identification et qualification des dunes domaniales susceptibles de jouer un rôle d'obstacle aux submersions marines ».

trois grandes catégories de robustesse en fonction de la morphologie dunaire : « transparentes », « vulnérables » et « très robustes » (Figure 68).

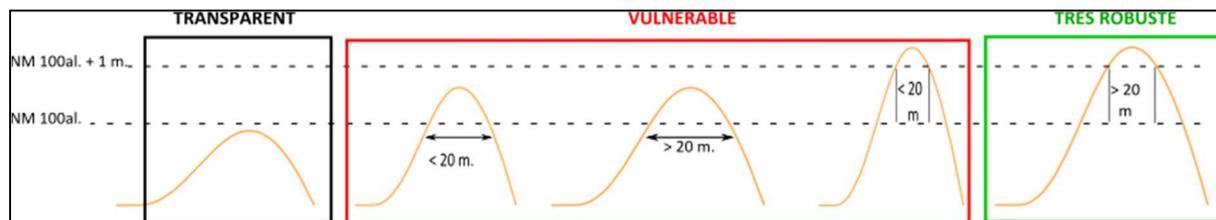


Figure 68 : Catégorisation des dunes selon la méthodologie de l'ONF³¹.

Afin d'appliquer la méthodologie de l'ONF sur les dunes de Normandie, un premier travail de détermination d'ensembles dunaires a été réalisé.

4.2.2 Création des profils dunaires

Afin d'analyser la topographie du trait de côte, des profils topographiques ont été générés tous les 50 mètres le long du trait de côte (Figure 69). Les données utilisées proviennent du levé topo-bathy (topographie et bathymétrie) du Réseau d'Observatoire du Littoral (ROL).

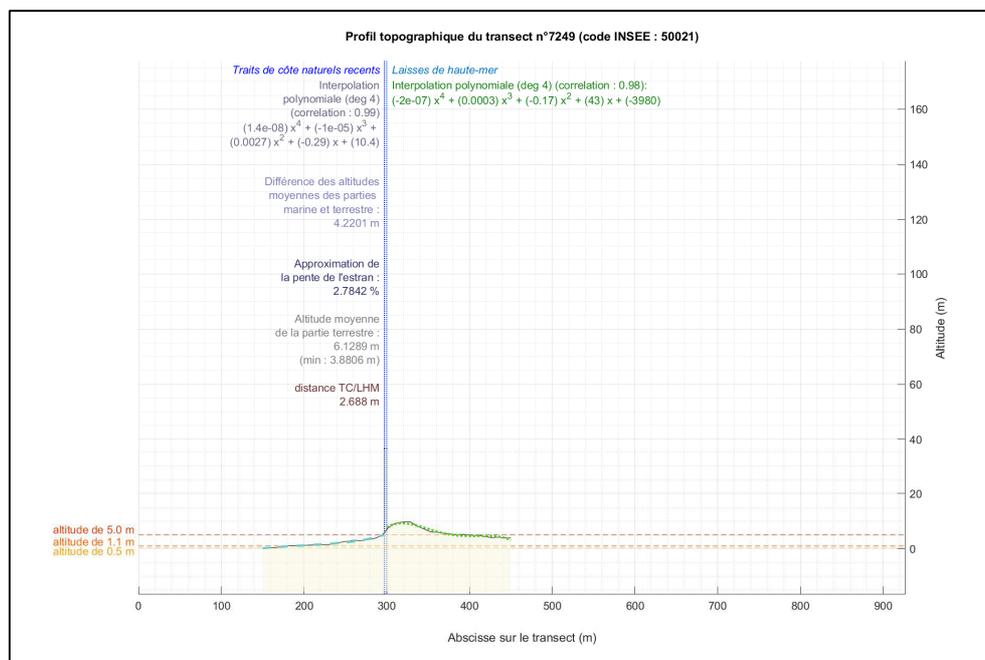


Figure 69 : Exemple de profil topographique généré.

A partir de ces profils, il a été possible de relever la hauteur et la largeur des dunes.

La hauteur d'une dune a été mesurée du pied de dune à sa crête comme la montre la Figure 70 ci-après :

³¹ Office National des Forêts.

e

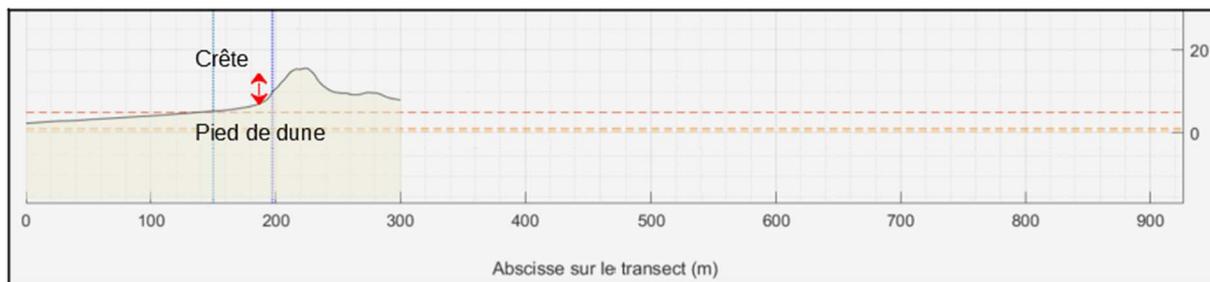


Figure 70 : Méthode de détermination de la hauteur d'une dune.

Les hauteurs sont relevées selon des intervalles décidés préalablement à savoir :

- < 1 – 2 m
- 2 – 5 m
- 5 – 10 m
- > 10 m

La largeur d'une dune est mesurée depuis son pied jusqu'à la rupture de pente côté terre (Figure 71).

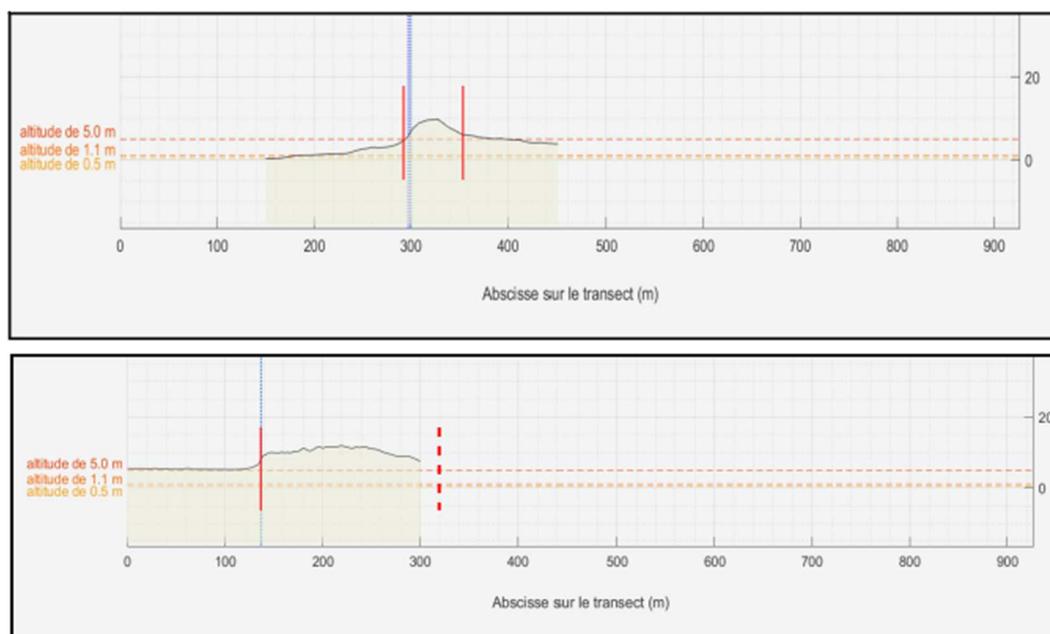


Figure 71 : Méthode de détermination de la largeur d'une dune.

Les largeurs sont relevées selon des intervalles décidés préalablement à savoir :

- 10 – 20 m
- 20 – 40 m
- 40 – 80 m
- 80 – 100 m

Pour la suite de l'étude, les hauteur et largeur moyennes de chaque ensemble de dune sont calculées.

Une fois cette première étape terminée, l'application de la méthodologie de l'ONF commence.

4.2.2.1 Exclusion des dunes « transparentes »

Afin de pouvoir comparer la hauteur du NM100al avec la hauteur des dunes, cette dernière doit être mesurée par rapport à la même origine : le zéro NGF. Pour cela, les données Lidar sont utilisées pour mesurer la hauteur de la crête de dune. Cependant, une dune peut être formée de plusieurs crêtes (Figure 72). Dans ce cas-là, un choix méthodologique de retenir seulement la hauteur de la plus haute crête a été réalisé, en estimant que celle-ci agira comme « barrage » sur le reste de la dune. Sur la figure ci-contre, la hauteur de la crête n°2 est alors retenue comme hauteur de dune.

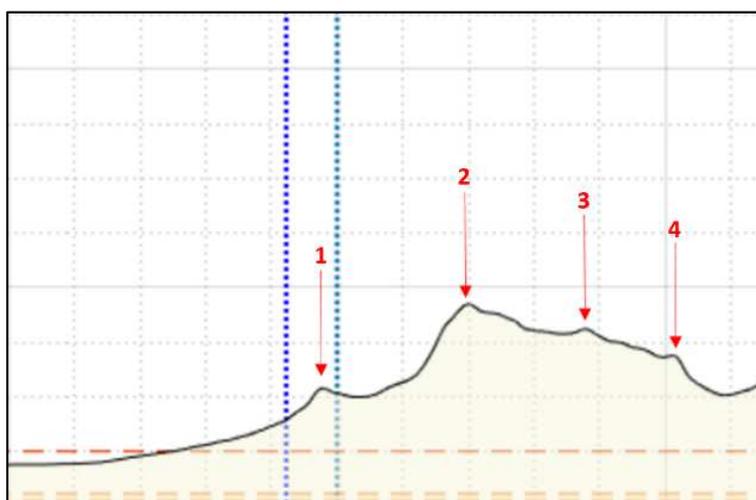


Figure 72 : Exemple de dune formée de plusieurs crêtes.

Le NM100al (couche « NM100al » du Shom) est alors appliqué afin d'exclure les dunes « transparentes ». Les dunes « transparentes » sont caractérisées par une hauteur inférieure au NM100al ; ces dunes correspondent notamment aux cordons-obstacles présents devant un marais.

4.2.2.2 Détermination des largeurs des dunes

La robustesse est déterminée selon la morphologie de la dune. Ce critère a été défini dans la mise à jour des catégories dunaires de l'ONF (Figure 73).

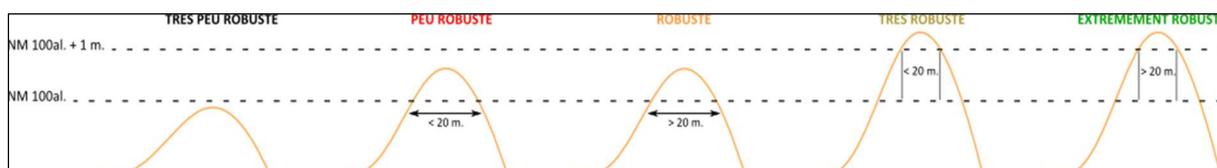


Figure 73 : Catégories de robustesse des dunes d'après la méthodologie de l'ONF.

Le « Rapport Spécial sur les effets du changement climatique sur les océans et les glaciers »³² du GIEC de 2019 estime que le niveau marin augmentera de 1,10 m d'ici 2100 et de 3 m d'ici 2300 sous le scénario RCP8.5. Suite à ces prévisions, la robustesse des dunes est étudiée selon le NM100al, le NM100al + 1.2 m et NM100al + 3 m. En effet, il n'est pas possible d'étudier selon le NM100al + 1,10 m car les données topographiques utilisées pour estimer la robustesse ont un pas de 0.15 cm. Nous estimons que cette augmentation de 0.1 m nous place à une échéance à 2120.

³² IPCC, « Summary for Policymakers ».

L'objectif ici est donc de déterminer la largeur des dunes selon un niveau marin. Tout d'abord des polygones représentant les dunes de hauteur supérieure ou égale au NM100al, NM100al + 1.2 m et NM100al + 3 m sont créés selon le modèle suivant (Figure 74) :

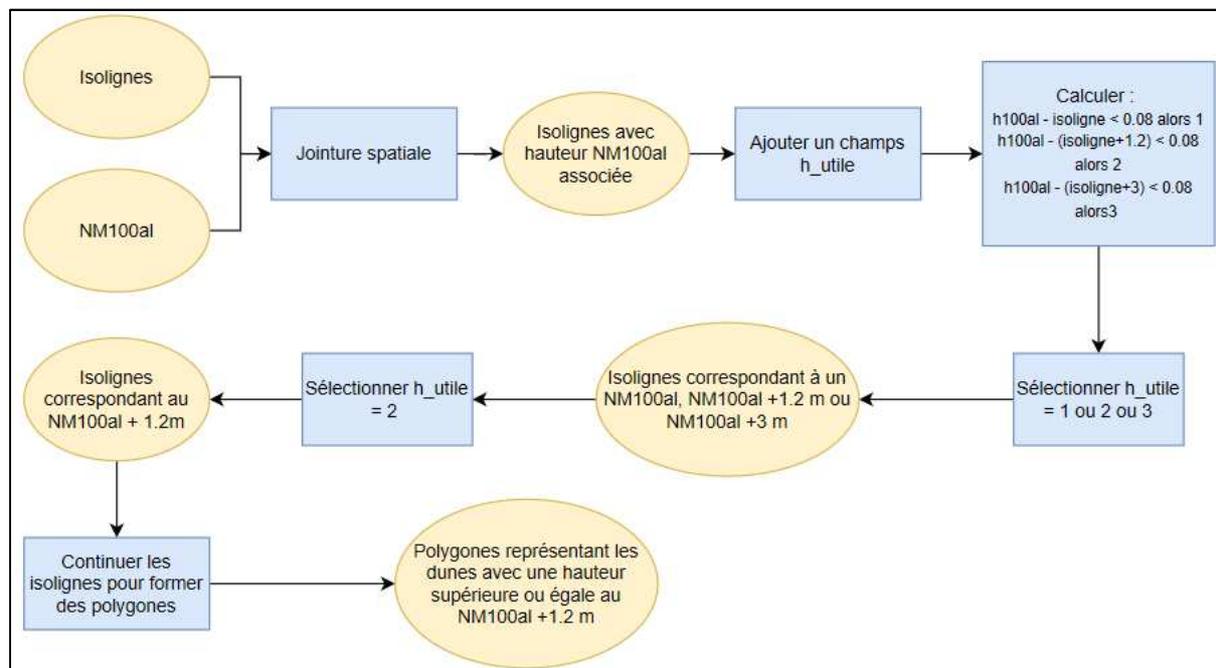


Figure 74 : Modèle de construction des polygones représentant les dunes de hauteur supérieure ou égale au NM100al + 1.2 m.

Les polygones créés, il est possible de mesurer leur largeur en mesurant la longueur des transects qui les traversent (Figure 75).

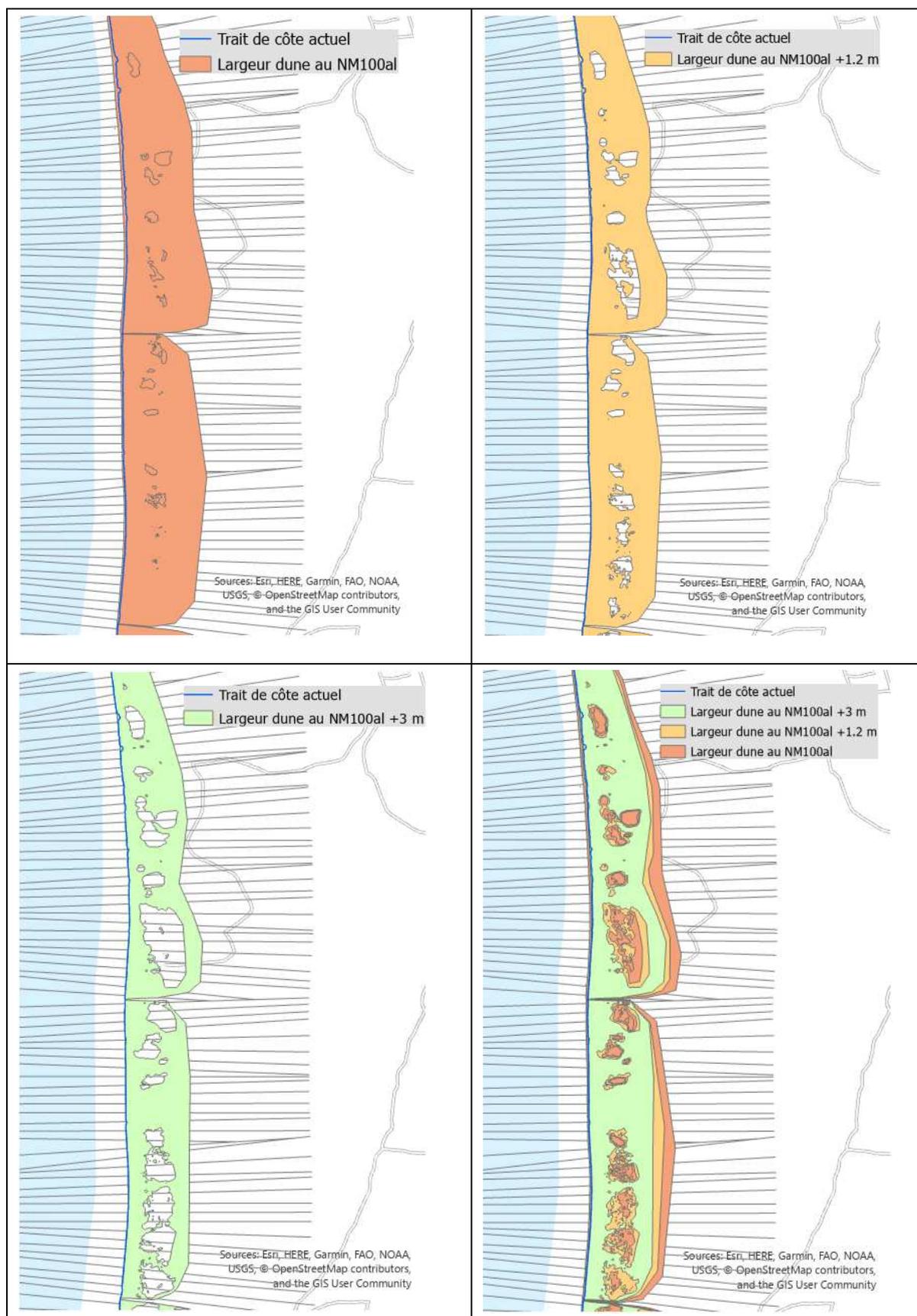


Figure 75 : Exemple des polygones représentant des dunes de hauteur supérieure ou égale au NM100al, NM100al + 1.2 m et NM100al + 3 m.

Une fois la largeur des dunes selon le NM100al, NM100al + 1.2 m et le NM100al + 3 m obtenue, la robustesse peut être déterminée. D'après la méthodologie de l'ONF adaptée aux niveaux

marins de cette étude, la robustesse est caractérisée par les éléments suivants (voir Figure 73) :

- Les dunes « Peu robustes » sont caractérisées par une hauteur inférieure au NM100al + 1.2 m et une largeur au NM100al inférieure à 20 m,
- Les dunes « Robustes » sont caractérisées par une hauteur inférieure au NM100al + 1.2 m et une largeur au NM100al supérieure à 20 m,
- Les dunes « Très robustes » sont caractérisées par une hauteur supérieure au NM100al + 1.2 m et une largeur au NM100al + 1.2 m inférieure à 20 m,
- Les dunes « Extrêmement robustes » sont caractérisées par une hauteur supérieure au NM100al + 1.2 m et une largeur au NM100al + 1.2 m supérieure à 20 m,

Dans le cadre de cette étude, l'évolution du trait de côte à l'horizon 2300 est étudiée. La robustesse « Extrêmement résistantes en 2300 » est donc ajoutée aux critères définies par l'ONF :

- Les dunes « Extrêmement résistantes en 2300 » sont caractérisées par une hauteur supérieure au NM100al + 3 m et une largeur supérieure à 20 m au NM100al + 3 m

Les dunes « Extrêmement résistantes en 2120 » et « Extrêmement résistantes en 2300 » correspondent aux dunes « Très robustes » de la Figure 68, elles sont donc exclues, comme les dunes transparentes, des traitements réalisées dans les parties suivantes.

4.2.2.3 Classification des dunes « vulnérables »

Il a été choisi de trier les dunes « vulnérables » (voir Figure 68) en deux sous-catégories, « Vulnérables » et « Résistantes », selon les quatre critères suivants :

- Robustesse
- Profil dunaire,
- Végétation dunaire,
- Présence d'aménagement en arrière des dunes.

La robustesse ayant été déterminée dans la phase précédente, il s'agit de traiter les trois autres critères ; leur application est détaillée dans les parties suivantes.

Profil dunaire

La forme de la dune est déterminée par sa largeur et sa hauteur, relevées auparavant sur les profils topographiques.

Selon la méthodologie de l'ONF, il existe trois grandes formes de profils dunaires :

- Les profils équilibrés : un cordon dunaire trapu dont la largeur est au minimum supérieure à trois fois la hauteur.
- Les profils étroits : une dune étroite très sensible à l'érosion dont la largeur est inférieure à trois fois sa hauteur.
- Les profils plats : profil ne présentant pas ou très peu de relief. Ici il est considéré que ce type de profil est exclu lors du traitement des dunes transparentes.

Végétation dunaire

La végétation dunaire est déterminée d'après des photographies satellites de la côte normande. Après une observation de l'ensemble du trait de côte, quatre catégories de végétation sont ressorties (Figure 76).

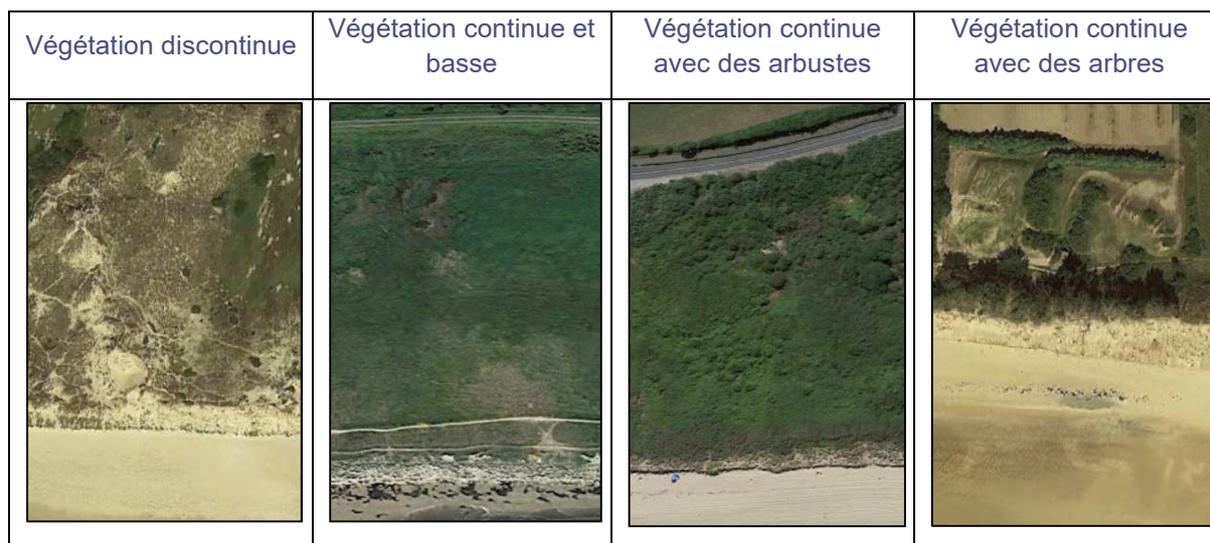


Figure 76 : Catégories de végétation dunaire.

Afin de faciliter le traitement des données les quatre catégories sont regroupées en trois catégories :

- Couverture végétale discontinue : végétation psammophile éparse.
- Couverture végétale continue rase : Végétation rase et dense.
- Couverture végétale avec des arbustes et des arbres : Végétation arbustive et ligneuse.

Présence d'aménagement en arrière des dunes

Il s'agit de caractériser les espaces en arrière de la dune : sont-ils aménagés ou naturels ? Cette donnée permet de connaître la capacité de mouvement naturel du cordon dunaire.

Pour cela, les aménagements situés en arrière de la dune sur une bande représentant 125 % de sa largeur sont analysés. Les aménagements étudiés sont les Bâtiments et les Constructions linéaires relevés dans la BD-topo de l'IGN (Figure 77).



Figure 77 : Exemple d'aménagement en arrière-dune à dans le département de la Manche.

Pondération des résultats

Une fois la totalité des critères étudiée, une valeur de pondération, déterminée en fonction de l'importance des critères vis-à-vis de la submersion marine, est attribuée à chaque choix (Tableau 6).

Tableau 6 : Pondération des critères de classification dunaire.

| Critère | Choix | Description | Valeur | Résultat |
|---------------------|---------------------------|---|--------|---|
| Profil dunaire | Equilibré | L = ou > 3h | 2 | Somme des valeurs des 4 critères : = de 3 à 6 : Vulnérable = de 7 à 11 : Résistante |
| | Etroit | L < 3h | 1 | |
| Couverture végétale | Discontinue | Végétation psammophile épars | 1 | |
| | Continue rase | Végétation rase dense | 2 | |
| | Continue arbuste ou arbre | Végétation arbustive et ligneuse | 3 | |
| Capacité de recul | Possible | Pas d'aménagements en arrière-dune | 2 | |
| | Bloquée | Présence d'aménagement en arrière-dune | 0 | |
| Robustesse | Peu robuste | Largeur au NM100al inférieure à 20m et sous le NM100al +1.2 m | 1 | |
| | Robuste | Largeur au NM100al supérieure à 20m et sous le NM100al +1.2 m | 2 | |
| | Très robuste | Largeur au NM100al+1.2 m inférieure à 20 m | 3 | |

Cinq classes de vulnérabilité peuvent alors être obtenues :

- **Très vulnérables** : Dunes submergées au moins une fois d'ici l'horizon 2120,
- **Vulnérables** : Dunes dont l'érosion peut les rendre submersibles à l'horizon 2120,
- **Résistantes** : Dunes qui ne seront probablement pas submergées et peu érodées à l'horizon 2120,
- **Extrêmement résistantes** : Dunes qui ne seront ni submergées ni érodées à l'horizon 2120,
- **Extrêmement résistantes en 2300** : Dunes qui ne seront ni submergées ni érodées à l'horizon 2300.

4.2.2.4 Résultats obtenus

Après pondération, les résultats de vulnérabilité suivants sont obtenus (Tableau 7) :

- 0.5 % des dunes sont Très vulnérables
- 5 % sont Vulnérables
- 15 % sont Résistantes
- 28.5 % sont Extrêmement résistantes
- 51 % sont Extrêmement résistantes en 2300

Tableau 7 : Résultats obtenus après pondération.

| Critère | Choix | Nombre d'ensemble de dune |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Profil dunaire | Equilibré | 719 |
| | Etroit | 0 |
| Couverture végétale | Discontinue | 427 |
| | Continue rase | 211 |
| | Continue arbuste ou arbre | 81 |
| Capacité de recul | Possible | 451 |
| | Bloquée | 268 |
| Robustesse | Peu robuste | 19 |
| | Robuste | 27 |
| | Très robuste | 90 |
| Dune transparente | 3 | |
| Dune extrêmement résistante | 194 | |
| Dune extrêmement résistante en 2300 | 347 | |

4.2.3 Comparaison des données de submersion marine et de la vulnérabilité des dunes

Suite à l'application de la méthodologie de l'ONF, cinq typologies dunaires correspondant à différentes classes de vulnérabilité à l'érosion par submersion marine ont été identifiées :

- **Très vulnérables** : Dunes submergées à l'horizon 2120,
- **Vulnérables** : Dunes dont l'érosion peut les rendre submersibles à l'horizon 2120,
- **Résistantes** : Dunes qui ne seront probablement pas submergées et peu érodées à l'horizon 2120,
- **Extrêmement résistantes** : Dunes qui ne seront ni submergées ni érodées à l'horizon 2120,
- **Extrêmement résistantes au-delà de 2120** : Dunes qui ne seront ni submergées ni érodées au-delà de l'horizon 2120.

En tenant compte de ces classes on peut donc identifier les zones submersibles au NM100a1, submersibles, possiblement submersibles et insubmersibles à l'horizon 2120 ainsi que les zones insubmersibles au-delà de l'horizon 2120.

| Vulnérabilité des dunes | Submersion marine des zones basses |
|--|---|
| Très vulnérable | Submersion à partir du NM100al |
| Vulnérable | Submersion à partir du NM100al + 1.2 m |
| Résistante | Possible submersion à partir du NM100al + 1.2 m |
| Extrêmement résistante | Pas de submersion au NM100al + 1.2 m |
| Extrêmement résistante au-delà de 2120 | Pas de submersion au NM100al + 3 m |

En tenant compte du tableau ci-dessus, les zones indiquées comme submergées à différents horizons peuvent donc être confirmées ou indiquées comme protégées par les dunes.

Sur la figure 74, les zones submergées en arrière-dune seraient finalement protégées par des dunes « Extrêmement résistantes au-delà de 2120 ». Cependant des modélisations dynamiques supplémentaires sont nécessaires afin de prendre en compte, par exemple, le volume d'eau, les points d'entrées de l'eau...

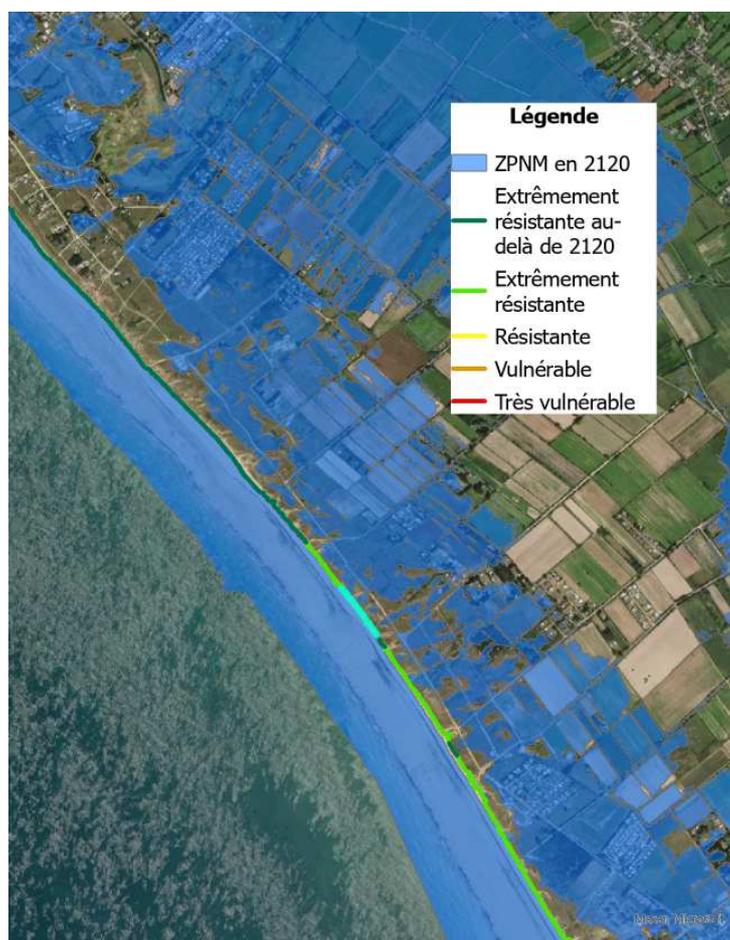


Figure 78 : Exemple de correction de la modélisation de submersion marine.

5. EFFETS DE L'ÉLEVATION DU NIVEAU MARIN SUR LA DYNAMIQUE DE LA BANDE CÔTIÈRE

Synthèse

Hypothèses et limites identifiées

Les différents rapports du GIEC ont montré que le changement climatique causera une élévation du niveau marin. Cette élévation aura un impact important sur les littoraux, une recherche bibliographique a permis de relever ses possibles effets sur la dynamique des falaises et des plages.

Il faut cependant noter qu'avec cette variation du niveau marin (décimètres à mètre), la réponse du système côtier reste difficile à évaluer. De plus, très peu d'études disposent d'un nombre de données assez fiables, homogènes et réparties sur une période assez longue (une décennie) sur les relations entre les processus d'évolution et les formes littorales. Il est donc difficile d'étudier une éventuelle accélération des processus d'évolution des phénomènes depuis le siècle dernier afin de les projeter au siècle à venir.

Principaux résultats

Sur les côtes sableuses, déjà soumises à des problématiques de pénurie sédimentaire, l'élévation du niveau des mers va accélérer l'érosion. En effet, les bas-reliefs seront submergés plus régulièrement dû aux tempêtes plus fréquentes.

Les linéaires côtiers « protégés » par des ouvrages longitudinaux ne pourront plus s'adapter par translation. Au droit des ouvrages, les plages vont alors disparaître, permettant l'accentuation des forces marines sur les ouvrages et une accentuation des submersions de tempêtes.

Le recul des côtes à falaises se verra s'accélérer. Les actions des agents érosifs (marins et continentaux) seront plus importantes : pluie plus intense, tempêtes plus fréquentes, vagues plus hautes atteignant des zones de falaises peu résistantes, etc. Pour les falaises crayeuses de Seine-Maritime, un doublement des vitesses actuelles de recul est envisagé.

5.1 Impact d'une élévation du niveau marin sur la dynamique des falaises et des plages/dunes

L'élévation du niveau marin aura un grand impact sur les littoraux. En effet il est attendu que cette élévation entraîne une forte augmentation de l'érosion côtière³³ et, en cas d'élévation rapide et importante du niveau de la mer, des répercussions sur le recul du trait de côte³⁴. Les

³³ Le Cozannet et al., « Exploring the Relation between Sea Level Rise and Shoreline Erosion Using Sea Level Reconstructions », 3 janvier 2013.

³⁴ Cerema, « Indicateur national de l'érosion côtière : Méthodologie ».

espaces actuellement proches du niveau des pleines mers actuelles seront les plus vulnérables³⁵.

L'élévation eustatique du niveau marin est causée par le réchauffement climatique. Ce réchauffement pourrait également entraîner une augmentation des instabilités climatiques telles que la fréquence des tempêtes³⁶, une intensification des cyclones tropicaux et extratropicaux, une augmentation de la hauteur des vagues, des ondes de tempêtes, de l'énergie de la houle et enfin une amplification de la fréquence de tsunami³⁷. Ces éléments pourraient accroître l'érosion des plages là où elle se manifeste déjà et atteindre de nouveaux territoires³⁸. Plus généralement, ces phénomènes pourraient avoir de nombreux effets sur les systèmes côtiers (Tableau 8)³⁹. Par exemple, selon le GIEC normand, les marées hautes de forts coefficients de marée (110-115) en Manche Orientale et Occidentale pourraient, d'ici 2100, apparaître près de 65 fois par an contre 4 fois actuellement⁴⁰.

Tableau 8 Principaux facteurs climatiques et leurs effets sur les systèmes côtiers (↑ : Augmentation, ? : Incertain, R: Variation régionale) (Robert J Nicholls et al. 2007) (traduction Cerema)

| Facteur climatique | Principaux effets physiques et sur l'écosystème sur les systèmes côtiers |
|---|---|
| Concentration en CO2 (↑) | Augmentation de la fertilisation du CO2 ; diminution du pH dans l'eau de mer (acidification de l'océan) |
| Température de la surface de la mer (↑, R) | Augmentation des changements de circulation ; diminution de l'incidence de la banquise aux hautes latitudes ; augmentation du blanchiment des coraux ; migration des espèces vers les pôles ; augmentation de la prolifération d'algues |
| Niveau marin (↑, R) | Inondations, dégâts causés par crues et tempêtes ; érosion ; intrusion d'eau salée ; élévation des niveaux hydrostatiques ; pertes et changements des milieux humides |
| Intensité des tempêtes (↑, R) | Augmentation des niveaux extrêmes d'eau et de la hauteur des vagues ; augmentation d'érosion épisodique ; risque d'inondation |
| Fréquences des tempêtes (? , R) | Altération des ondes et des vagues de tempêtes |

³⁵ GIEC normand, « Systèmes côtiers, Risques naturels et restauration des écosystèmes. »

³⁶ Chaumillon et al., « Mesures et modélisations des évolutions du niveau marin, des vagues, des tempêtes et des évolutions des littoraux pour une gestion durable des littoraux ».

³⁷ Nicholls et al., « Coastal Systems and Low-Lying Areas », 2007.

³⁸ Cerema, *Dynamique et évolution du littoral : Synthèse des connaissances, du cap d'Antifer au cap de la Hague.*

³⁹ Nicholls et al., « Coastal Systems and Low-Lying Areas », 2007.

⁴⁰ GIEC normand, « Systèmes côtiers, Risques naturels et restauration des écosystèmes. »

| | |
|---------------------------------|---|
| Trajectoire des tempêtes (?, R) | |
| Régime des vagues (?, R) | Altération des états de l'onde (houle) ; Altérations des modèles d'érosion et d'accrétion ; réorientation de la plage |
| Ruissellement (R) | Altération des risques de crue dans les basses-terres côtières ; altération de la qualité de l'eau / salinité ; altération des apports sédimentaires ; altération des apports en nutriments |

Il faut toutefois noter qu'avec cette variation du niveau marin (décimètres à mètre), la réponse du système côtier reste difficile à évaluer⁴¹. De plus, très peu d'études disposent d'un nombre de données assez fiables, homogènes et réparties sur une période assez longue (une décennie) sur les relations entre les processus d'évolution et les formes littorales. Il est donc difficile d'étudier une éventuelle accélération des processus d'évolution des phénomènes depuis le siècle dernier afin de les projeter au siècle à venir⁴². Par exemple, Éric Brun dans le rapport de l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique sur « Le littoral dans le contexte du changement climatique », indique, contrairement à Chaumillon *et al.* (2011), que le Cinquième rapport du GIEC prévoit une baisse dans la fréquence des tempêtes de l'hémisphère Nord sous le scénario RCP8.5. Mais il insiste sur le caractère incertain de ces projections dans ce domaine⁴³.

5.1.1 Impact sur les plages / dunes

Les zones à cordons littoraux sableux avec plages ouvertes ont pour principaux agents d'érosion la houle, le vent et les courants qui entraînent les sédiments vers les terres ou les fonds marins. Aujourd'hui, l'érosion des plages est notamment liée à une pénurie naturelle d'apports en sédiments, aggravée par des actions anthropiques⁴⁴. Compte tenu des prévisions actuelles, l'élévation du niveau de la mer est considérée comme un facteur aggravant de l'érosion des plages dans une période de pénurie sédimentaire. Les secteurs déjà soumis à de l'érosion verront donc cette érosion s'accroître dans le siècle à venir⁴⁵.

⁴¹ Le Cozannet et al., « Exploring the Relation between Sea Level Rise and Shoreline Erosion Using Sea Level Reconstructions », 3 janvier 2013.

⁴² Cerema, *Dynamique et évolution du littoral : Synthèse des connaissances, du cap d'Antifer au cap de la Hague*.

⁴³ Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, *Le littoral dans le contexte du changement climatique*, 2015.

⁴⁴ Cerema, *Dynamique et évolution du littoral : Synthèse des connaissances, du cap d'Antifer au cap de la Hague*.

⁴⁵ Paskoff, « Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies ».

Le réchauffement climatique et notamment l'élévation du niveau marin auront un grand impact sur les bas-reliefs et les côtes de faibles altitudes⁴⁶, entraînant une augmentation de leur érosion. En effet, les côtes basses meubles seront susceptibles de subir plus régulièrement l'action des vagues et d'être submergées⁴⁷. Ce dernier point serait causé par l'érosion des dunes due à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes. La végétation recouvrant les dunes sera réduite, entraînant l'augmentation de transport de sédiments par-delà les dunes, diminuant leur capacité de résilience⁴⁸.

Les linéaires côtiers « protégés » par des ouvrages longitudinaux ne pourront plus s'adapter par translation. Au droit des ouvrages, les plages vont alors disparaître, permettant l'accentuation des forces marines sur les ouvrages et une accentuation des submersions de tempêtes⁴⁹.

5.1.2 Impact sur les côtes à falaises

Contrairement aux côtes d'accumulation, qui avancent et reculent selon leur budget sédimentaire, le recul des côtes à falaises est irréversible⁵⁰. Ce recul va s'accroître avec une élévation du niveau de la mer⁵¹. Cependant, les vitesses de recul des falaises en lien avec l'érosion dépendent fortement du type de matériaux rocheux les composant⁵².

Il est possible de distinguer plusieurs types de falaises :

- Les falaises constituées de roches tendres (falaises crayeuses ou taillées dans du grès tendre) à recul rapide⁵³ (voir localisation en Normandie Figure 5),
- Les falaises constituées de roches dures (falaises gréseuses, métamorphiques, magmatiques ou composé d'un certain type de calcaire) à recul lent⁵⁴, résistant bien à l'action des vagues⁵⁵ (voir localisation en Normandie Figure 5),
- Les falaises plongeantes sur lesquelles les vagues sont réverbérées sans libérer leur énergie,
- Les falaises à plateformes sur lesquelles les vagues déferlent⁵⁶

⁴⁶ Letortu, « Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits ».

⁴⁷ Cerema, *Dynamique et évolution du littoral : Synthèse des connaissances, du cap d'Antifer au cap de la Hague*.

⁴⁸ Davidson-Arnott, « Conceptual Model of the Effects of Sea Level Rise on Sandy Coasts ».

⁴⁹ GIEC normand, « Systèmes côtiers, Risques naturels et restauration des écosystèmes. »

⁵⁰ Pierre, « L'influence des paramètres hydroclimatiques et météo-marins sur le recul des côtes à falaises. »

⁵¹ Cerema, *Dynamique et évolution du littoral : Synthèse des connaissances, du cap d'Antifer au cap de la Hague*.

⁵² Costa et Pfeiffer, « Connaître le littoral ».

⁵³ Pierre, « L'influence des paramètres hydroclimatiques et météo-marins sur le recul des côtes à falaises. »

⁵⁴ Pierre.

⁵⁵ Paskoff, « Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies ».

⁵⁶ Paskoff.

Les falaises, qu'elles soient constituées de roches tendres ou dures, reculent par éboulement⁵⁷. Plus précisément, dans les matériaux meubles, l'érosion se fait par glissement et dans les matériaux cohérents le recul se fait par écroulement⁵⁸.

Les côtes à falaises sont sous influences continentale (infiltration d'eaux pluviales) et marine (houles, marées, tempêtes)⁵⁹.

En effet les infiltrations jouent un rôle important dans l'ébouilisation des falaises, de même que les périodes de gel/dégel. Or, le réchauffement climatique va entraîner une diminution du nombre de jours de gel, cela va limiter les effets de ce paramètre dans l'érosion des falaises. Cependant, les pluies, probablement plus intenses, vont favoriser le déclenchement de glissements ou d'effondrements sur les falaises constituées de roches plus tendres⁶⁰.

Les actions marines, elles, ont une action de mise à nu des pieds de falaises. Or, le recul des falaises « exposées » à l'action des vagues est plus important que les falaises aux abrupts plus faiblement battus⁶¹. L'élévation du niveau de la mer va permettre aux vagues d'atteindre plus régulièrement des zones pouvant être peu résistantes, normalement à l'abri de l'action des vagues, dans la partie supérieure des falaises⁶².

Dans ce contexte, le recul des falaises ne peut qu'accélérer⁶³. Plus précisément, ce sont les falaises déjà en situation de recul visible à l'échelle d'une vie humaine qui verront leur évolution s'accélérer avec l'élévation du niveau de la mer⁶⁴. Par exemple, pour les falaises crayeuses de Seine-Maritime, un doublement des vitesses actuelles de recul est envisagé⁶⁵.

En conclusion, l'évolution du trait de côte sera affectée par l'élévation du niveau marin mais cela reste difficile aujourd'hui de la quantifier avec exactitude. D'après le rapport sur « Le climat de la France au XXI^e siècle » de la Direction Générale de l'Energie et du Climat⁶⁶, deux mesures d'adaptation peuvent tout de même déjà être bénéfiques :

- Prendre en compte l'élévation du niveau de la mer dans la gestion des risques (infrastructures)
- Préserver de l'espace pour les processus de transports sédimentaires littoraux afin de permettre au système côtier de s'ajuster naturellement à de nouvelles conditions environnementales.

⁵⁷ Paskoff.

⁵⁸ Costa et Pfeiffer, « Connaître le littoral ».

⁵⁹ Cerema, *Dynamique et évolution du littoral : Synthèse des connaissances, du cap d'Antifer au cap de la Hague*.

⁶⁰ Cerema.

⁶¹ Cerema.

⁶² Pierre, « L'influence des paramètres hydroclimatiques et météo-marins sur le recul des côtes à falaises. »

⁶³ Pierre.

⁶⁴ Paskoff, « Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies ».

⁶⁵ GIEC normand, « Systèmes côtiers, Risques naturels et restauration des écosystèmes. »

⁶⁶ Planton et al., « Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises. Le climat de la France au XXI^e siècle ».

Dans cette optique, la Région Normandie et ses Universités ont lancé de nombreux projets afin d'améliorer la connaissance et d'adapter le littoral normand.

5.2 Projets lancés en Normandie afin d'adapter le littoral normand aux conséquences de l'élévation du niveau marin

5.2.1 Notre Littoral Pour Demain

La Région Basse-Normandie a lancé en 2014 un appel à projets « Notre Littoral Pour Demain » afin de mobiliser les élus du littoral autour d'une gestion durable et intégrée de la bande côtière⁶⁷. Les territoires de la Côte Est du Cotentin, la Côte Ouest du Cotentin, la Côte Nord du Cotentin, le Pays du Bessin au Virois, l'embouchure de l'Orne et le Pays de Coutances ont décidé de s'unir derrière ce projet⁶⁸.

L'objectif principal est d'anticiper les conséquences du changement climatique sur le littoral (élévation du niveau marin, augmentation de la fréquence des tempêtes) d'ici 20, 50 et 100 ans⁶⁹. Cela permet aux territoires de réfléchir aux bonnes échelles d'espace et de temps, de prendre en compte les conséquences du changement climatique et enfin d'élaborer des stratégies sur le long terme en collaboration avec les acteurs du territoire et avec l'intervention de nombreux acteurs normands telle que les Universités, la DREAL, l'IRD2, le ROL...⁷⁰.

Des ateliers ont été réalisés dans les différents territoires concernées afin d'élaborer une stratégie. Les ateliers ayant eu lieu sur la Côte Est Cotentin ont permis d'imposer deux choix⁷¹ :

- Une « lutte active » sur les espaces à forts enjeux afin de les protéger et de maintenir des activités menacées. Cela se traduit par un renforcement des ouvrages de protection.
- Une adaptation qui passe par une amélioration de la résilience, une réduction de leur vulnérabilité et possiblement une recomposition spatiale du territoire afin de relocaliser les enjeux à l'abri des risques côtiers.

De plus des scénarios de court-moyen terme (2050) et long-terme (2100) ont été proposés. Les deux points présentés ci-avant feront partie du scénario à l'horizon 2050. Les principes des scénarios à l'horizon 2100 consistent à poursuivre la lutte active dans les zones d'habitat dense et des espaces et activités devront s'adapter ou se relocaliser si possible⁷².

⁶⁷ Coutances mer et bocage, « Notre Littoral Pour Demain ».

⁶⁸ Institut Régional du Développement Durable, « Notre Littoral Pour Demain ».

⁶⁹ Coutances mer et bocage, « Notre Littoral Pour Demain ».

⁷⁰ Université Caen Normandie et LETG Caen, « Diffuser la connaissance scientifique – illustrations au travers de projets menés en Normandie ».

⁷¹ Université Caen Normandie et LETG Caen.

⁷² Université Caen Normandie et LETG Caen.

5.2.2 Rivages Normands 2100

Rivages normands 2100 " est un projet de recherche partenarial porté par la DREAL Normandie - l'Université de Rennes - l'Agence de l'eau Seine Normandie. Le projet implique la communauté urbaine de Caen, la communauté d'agglomération du Cotentin, la communauté de communes de la Baie du Cotentin, la communauté de communes Granville Terre et Mer, la communauté de communes Coutances Mer et Bocage, le Syndicat Départemental de l'eau de la Manche, la ville de Carentan-les-Marais et la communauté de communes Côte Ouest Centre Manche⁷³. Il s'inscrit dans La stratégie régionale normande de gestion intégrée de la bande côtière : Littoraux normands 2027 en contribuant à produire une connaissance approfondie de l'évolution de la bande côtière et des enjeux qui y prennent place.

L'objectif de ce programme de recherche est de proposer des plans d'actions réalistes d'adaptation des activités socio-économiques sur le littoral de la Manche et du Calvados face aux impacts de l'augmentation des risques hydrogéologiques (inondation, salinisation) liée à l'élévation du niveau marin⁷⁴. Pour cela, le projet est structuré en plusieurs points permettant :

- D'améliorer la connaissance de l'évolution des aléas hydrogéologiques selon le changement climatique grâce à des modélisations hydrologiques,
- D'identifier grâce à ces modèles le rôle des mécanismes principaux selon les configurations morpho-hydrologiques afin de produire une typologie des risques sur l'ensemble du littoral normand,
- D'analyser les évolutions socio-économiques potentielles de ces territoires,
- De proposer finalement des stratégies réalistes d'adaptations.

5.2.3 Projet RICOCHET

Le projet RICOCHET est porté par le LETG Caen GEOPHEN et financé par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) sur la période 2017-2020 Institut Régional du Développement Durable, « Projet RICOCHET ». Trois territoires ont été choisis afin de réaliser cette étude : de Houlgate à Honfleur, de Quiberville à Puys et de Criel-sur-Mer à Ault⁷⁵.

Ce projet s'intéresse à la gestion des aléas et risques naturels (érosion côtière et submersion marine, inondation...) et se construit selon trois objectifs principaux :

- Une meilleure compréhension de la dynamique actuelle du continuum Terre / Mer et la réalisation d'un bilan des échanges de matière,
- La détermination des impacts multisectoriels du changement global (climatique, environnementaux et socio-économiques) causés par l'augmentation des tempêtes et l'élévation du niveau marin sur le système falaise / plage et à l'arrière littoral,
- Un accompagnement des élus locaux afin qu'ils s'approprient la thématique du changement côtier et pour favoriser la compréhension de leurs préoccupations face au changement global.

⁷³ Agence de l'eau Seine Normandie, « Caen la mer : une ambition territoriale face à la montée de la mer ! »

⁷⁴ Université Caen Normandie et LETG Caen, « Diffuser la connaissance scientifique – illustrations au travers de projets menés en Normandie ».

⁷⁵ Université Caen Normandie et LETG Caen.

5.2.4 Projet RAIV-COT

Ce projet est porté par le LETG Caen et notamment par Stéphane Costa sur la période 2018-2019. Il étudie le risque et l'aléa inondation sur les villes côtières et leur possible aggravation causée par le changement climatique⁷⁶. Quatre villes côtières ont été choisies afin de réaliser cette étude : Etretat, Quiberville Sainte-Marguerite, Villers-sur-Mer et Lancieux⁷⁷.

Ce projet a pour objectifs⁷⁸ :

- D'améliorer la connaissance de l'aléa inondation actuel,
- D'étudier et de cartographier l'évolution de ce phénomène selon le changement climatique et l'élévation du niveau marin par le biais de modélisations,
- De diffuser les résultats auprès des décideurs, des aménageurs et des populations via la réalité virtuelle afin de les sensibiliser à cet aléa et à leurs possibles villes côtières à dans le futur.

Pour cela, le projet se divise en trois étapes. Une première étape de recensement des événements et de définition des facteurs responsables, une deuxième étape de modélisation des phénomènes passés et futurs avec une élévation de + 1 m du niveau marin et enfin, une dernière étape de scénarisation de l'aléa inondation par la réalité virtuelle et augmentée⁷⁹.

5.2.5 Loi Climat et Résilience

La loi « Climat et Résilience », publiée le 22 août 2021, vise à accélérer la transition écologique de la société et de l'économie à travers plusieurs mesures⁸⁰. Cette loi introduit, notamment, une évolution de la gestion de l'érosion côtière, tournée vers le réaménagement du littoral et l'intégration du recul du trait de côte dans la planification de l'urbanisme.

Une réforme du code de l'urbanisme et des modalités de prise en compte du risque érosion dans les documents de planification est présentée. Elle permet d'améliorer la gestion des nouvelles constructions dans les zones où le recul du trait de côte est connu, afin d'éviter l'augmentation de la vulnérabilité des personnes et des biens. Ce rôle est dorénavant une obligation transférée aux collectivités locales compétentes en matière de Plans Locaux d'Urbanisme. Les règles d'inconstructibilité seront plus progressives que celles des actuels Plans de Prévention des Risques Littoraux. En effet, il sera quasiment impossible de construire dans la zone exposée à 0-30 ans mais il sera possible de construire dans la zone exposée à 30-100 ans, sous conditions d'une démolition des constructions dans leurs dernières années de vie avant la réalisation du risque⁸¹.

⁷⁶ LETG Caen, « Recherche ».

⁷⁷ Costa, « Risque et Aléa inondation de villes côtières : Approche quantitative et diffusion par la réalité virtuelle (Raiv Côt) ».

⁷⁸ LETG Caen, « Recherche ».

⁷⁹ Costa, « Risque et Aléa inondation de villes côtières : Approche quantitative et diffusion par la réalité virtuelle (Raiv Côt) ».

⁸⁰ Vie publique, « Loi "Climat et Résilience" des avancées et des limites ».

⁸¹ GIP Littoral 2030, « Promulgation de la loi Climat et Résilience : dispositions relatives à la gestion de l'érosion côtière ».

5.2.6 GIEC normand

La Région Normandie a confié à un groupe de 23 chercheurs et experts normands l'étude des conséquences locales du changement climatique. Ce groupe d'experts est coprésidé par Stéphane Costa, professeur de Géographie Physique et environnement à l'Université de Caen, également président du Conseil scientifique de la stratégie nationale de gestion du trait de côte, et Benoît Laignel, professeur en géosciences et environnement à l'Université de Rouen, également membre du GIEC international. Leur but est de traduire les prévisions du GIEC international (IPCC) pour le territoire et de faire la synthèse des travaux scientifiques locaux sur ce sujet⁸².

Leur diagnostic se porte sur neuf domaines d'étude :

- Les changements climatiques et aléas météorologiques,
- La qualité de l'air,
- La qualité de l'eau,
- La biodiversité,
- Les sols et l'agriculture,
- La pêche et la conchyliculture,
- Les territoires (habitats et mobilité),
- Les systèmes côtiers,
- La santé (pollutions et nouvelles maladies).

Les résultats de leurs travaux sont traduits au sein d'un corpus de documents de synthèse à destination de tous les décideurs de la région et du grand public⁸³.

⁸² Région Normandie, « GIEC normand | Région Normandie ».

⁸³ GIEC normand, « Systèmes côtiers, Risques naturels et restauration des écosystèmes. »

6. IDENTIFICATION DES ENJEUX

Synthèse

Hypothèses et limites identifiées

L'objectif de cette phase est de déterminer les enjeux concernés par les effets cumulés de l'évolution du trait de côte et de la submersion marine aux horizons 2050, 2120 et 2300.

Cette phase s'est déroulée en deux étapes :

- Une première étape de recensement des enjeux qui a mené à la création d'une typologie d'enjeux à partir de l'usage du sol. Cette typologie est divisée en trois niveaux de précision à analyser selon les données disponibles.
- Une seconde étape de traitements de données. Les données sources pour chaque type d'enjeux ont été téléchargées, modifiées et regroupées dans une base de données. Leurs positions ont été comparées aux zones de projection du trait de côte et aux zones submersibles. Les surfaces impactées ou le nombre de bâtiments impactés ont ensuite été regroupés sous forme de tableaux.

Les données proviennent de différentes sources : BD_topo_v3, MOS BN 2020, MOS HN 2009, RPG 2020...(voir Tableau 9Tableau 9 détaillé).

Cette identification présente cependant des limites notamment liée à la disponibilité des données (Annexe 1).

Principaux résultats

Usage du sol

| Niveau 1 | Niveau 2 |
|--|--|
| Production primaire | Élevage |
| | Cultures |
| | Bâtiments exploitation agricole |
| | Aquaculture |
| | Sylviculture |
| | Autres productions primaires dont : chasse |
| Production secondaire, production tertiaire et usage résidentiel | Production d'énergie |
| | Bâtiments à usage industriel |
| | Commerce et hôtellerie |
| | Enseignement |
| | Santé |
| | Culture et loisirs |
| | Résidentiel |
| | Réseau d'utilité publique |
| Déchets, traitement et recyclage | |

| | |
|--|---|
| Réseaux de transports logistiques et infrastructures | Réseau routier |
| | Réseaux ferrés |
| | Réseau de transport aérien |
| | Service de logistiques et de stockage |
| | Réseau d'utilité publique |
| | Transport et distribution d'électricité, de gaz, de pétrole |
| | Réseau d'utilité publique |
| | Eau et traitement de l'eau |
| Réseau d'utilité publique | |
| Déchets, traitement et recyclage | |

| Type de risque | Évolution du trait de côte | | | Submersion marine | | | Combinaison évolution du trait de côte et submersion marine | | |
|-------------------|----------------------------|------|------|-------------------|-------|--------|---|-------|-------|
| | 2050 | 2120 | 2300 | 2050 | 2120 | 2300 | 2050 | 2120 | 2300 |
| Primaire | | | | | | | | | |
| Surface (ha) | 309 | 1109 | 4863 | 25675 | 34207 | 38197 | 25092 | 34988 | 41730 |
| Infrastructure | 8 | 66 | 302 | 1088 | 1269 | 1578 | 795 | 1316 | 1803 |
| Secondaire | | | | | | | | | |
| Surface (ha) | 1 | 2 | 32 | 211 | 330 | 408 | 1458 | 2133 | 2504 |
| Infrastructure | 99 | 153 | 284 | 6228 | 9241 | 12918 | 6301 | 9342 | 13112 |
| Résidence | 292 | 1427 | 6639 | 42880 | 64467 | 101259 | 977 | 1837 | 5368 |
| Transport | | | | | | | | | |
| Linéaire (km) | 105 | 222 | 583 | 5924 | 7724 | 10526 | 6122 | 8081 | 11457 |
| Infrastructure | 17 | 28 | 47 | 262 | 319 | 373 | 276 | 335 | 402 |

6.1 Méthodologie

6.1.1 Typologies d'enjeux socio-économiques

La typologie mise en place pour identifier les enjeux du littoral normand fait appel à l'usage du sol, majoritairement basé sur la nomenclature du MOS (Mode d'Occupation du Sol) de l'ancienne Basse-Normandie afin de répondre à l'objectif d'identification des enjeux socio-économiques (biens et activités humaines) liés aux différents scénarii d'élévation du niveau de la mer projetés. La qualification des enjeux environnementaux sera réalisée par ailleurs, notamment en lien avec les travaux en cours sur le document stratégique de façade.

La nomenclature se divise en trois niveaux de précision, les deux premiers étant à minima étudiés dans la présente étude. Certains postes sont davantage détaillés dans un niveau 3,

parce qu'ils présentent des enjeux forts (par exemple les bâtiments vulnérables), ou parce qu'ils correspondent à des caractéristiques du littoral normand.

Plusieurs versions de cette typologie ont été partagées dans le cadre du comité de suivi. La version finale approuvée par ce dernier est présentée en 6.2.1 Typologie d'enjeux.

6.1.2 Traitement des données

6.1.2.1 Construction des couches

Une fois la typologie construite, les données correspondant aux enjeux relevés sont téléchargées d'après différentes sources complétées si nécessaire, et regroupées dans une base de données. Les sources de données mobilisées sont listées et proposées dans un souci de disponibilité de la donnée de manière homogène sur l'ensemble du littoral normand (Tableau 9).

Afin de faciliter le traitement sur ArcGis Pro, les données des enjeux sur terre ont été relevés uniquement sur les communes littorales, augmentées des valeurs d'érosion maximales.

Tableau 9 Source des données utilisées par type d'enjeux

| Producteur | Source de données | Enjeux |
|---------------------------|--------------------------|---|
| IGN | BD_TopoV3_R28_2021-12-15 | Activité équestre |
| | | Bâtiment agricole (y.c. serre ou silo) |
| | | Cadastre conchylicole + zones conchylicole à terre+réseaux de pompage et de rejet |
| | | Centrale thermique |
| | | Site nucléaire |
| | | Centrale photovoltaïque |
| | | Site classé SEVESO seuil haut/bas (surfacique) |
| | | Parcelle à usage industriel |
| | | Camping |
| | | Aire d'accueil des gens du voyage |
| | | Hébergement de loisirs |
| | | Enseignement primaire |
| | | Collège |
| | | Lycée |
| | | Enseignement supérieur |
| | | Établissement thermal |
| Établissement hospitalier | | |
| Maison de retraite | | |

| | | |
|--------------------|--------------|---|
| | | Bâtiments résidentiels |
| | | Bâtiments historiques (ouvrages militaires, églises...) |
| | | Musée |
| | | Autres structures de loisirs |
| | | Route revêtue |
| | | RD, RN |
| | | Voie ferrée |
| | | Piste d'aérodrome |
| | | Stockage d'eau |
| | | STEU |
| | | Site de production d'eau potable |
| | | Déchèterie |
| | | Sylviculture |
| CRIGE | MOS BN 2020 | Services de logistiques et de stockage |
| | | Camping |
| | Déchèterie | |
| | MOS HN 2009 | Site nucléaire |
| Région | GeoNormandie | Pâturage de prés salés |
| | Carmen | Éolienne (mât) |
| | SRDAM | Cadastre mytilicole |
| Département | DDTM 50 | Cadastre mytilicole |
| | | Parcs piscicoles |
| | | Gabion |
| | | Décharge ancienne |
| | DDTM 27 | Gabion |
| | DDTM 14 | Parcs piscicoles |
| Décharge ancienne | | |
| Ministères | Géorisques | Site classé SEVESO (ponctuel) |
| | | Site classé SEVESO seuil haut/bas (surfactive) |
| | RPG 2020 | Surface pastorale / prairie permanente |
| | | Verger |

| | | |
|--|--------------------------------------|-------------------------|
| | | Maraîchage |
| | | Pépinière |
| | | Autre espace de culture |
| DIRM | | Parcs piscicoles |
| Musée National d'Histoire Naturelle | INPN | Réserve de chasse |
| Maison de l'Estuaire | | Gabion |
| DGIP | Fichiers Fonciers | Activité équestre |
| | | Local industriel |
| | | Commerce ou service |
| Google | GoogleMap | Établissement thermal |
| SANDRE | Système de traitement des eaux usées | Point de rejet de STEU |
| Cerema | Recensement des décharges anciennes | Décharge ancienne |

Afin de garder un historique des couches traitées, un tableau est créé (Figure 79). Ce dernier reprend la typologie des enjeux, les sources de données utilisées, le nom de la couche créée ainsi que la méthode de traitement appliquée.

| niveau 1 | niveau 2 | niveau 3 | sources des données | info | généalogie |
|---------------------|----------|--|---|-------------------------------|--|
| Production primaire | Élevage | Pâturage de prés salés | GeoNormandie (et non pas AGRESTE Normandie) | Paturages_pres-sales.shp | couche L_ZONAGE_AOC_PRE_SALE_050.shp avec filtre "ZONAGE" = 'paturage' |
| | | Surface pastorale / prairie permanente | RPG 2020 | RPG_2020_z_elevage_cultures.s | RPG 2020 url https://wxs.ign.fr/agriculture/geoportail/wfs?SERVICE=WFS&VERSION=2.0.0&REQUEST=GetCapabilities du WFS récupéré sur https://geoservices.ign.fr/actualites/2022-01-03-RPG2020 , connexion sur QGIS puis sélection par localisation des parcelles intersectant zone_enjeux_reculTdC_R28.shp puis export en shp. Enfin, filtre tel que "code_group" IN('17' , '18') (respectivement nom_groupe_culture IN('ESTIVES LANDES' , 'PRAIRIES PERMANENTES')). |
| | | Activité équestre | MOS BN / OSCOM / CLC | BDTopv3_ZAI_FF_tup_2021_Haras | BDTopo v3 couche ZONE_D_ACTIVITE_OU_D_INTERET_BDT avec filtre "NATURE" = 'Haras' puis croisement des entités de type carré de 25 m² (11 sur 34 pour la zone d'étude ; aussi sélectionnables avec "FICTIF"='Oui') avec les unités foncières (couches z14ou27ou50ou76_2021tup.shp) pour substituer le bon contour. |

Figure 79 : Généalogie des couches d'enjeux créées.

6.1.2.2 Croisement des enjeux et des zones d'évolution du trait de côte

Une fois les couches d'enjeux créées, elles sont croisées avec les couches de projection du trait de côte aux horizons 2050, 2120 et 2300 (obtenue en partie 3 :Analyse de l'évolution du trait de côte), en utilisant l'outil « Intersecter » sur ArcGis Pro.

Pour chaque type d'enjeux, 18 couches peuvent être créées :

- Enjeux situés dans la zone moyenne d'érosion en 2050,
- Enjeux situés dans la zone maximale d'érosion en 2050,
- Enjeux situés dans la zone d'érosion des falaises en 2050,
- Enjeux situés dans la zone d'érosion des falaises augmentée des événements historiques en 2050,

- Enjeux situés dans la zone moyenne d'accrétion en 2050,
- Enjeux situés dans la zone maximale d'accrétion en 2050,
- Enjeux situés dans la zone moyenne d'érosion en 2120,
- Enjeux situés dans la zone maximale d'érosion en 2120,
- Enjeux situés dans la zone d'érosion des falaises en 2120,
- Enjeux situés dans la zone d'érosion des falaises augmentée des événements historiques en 2120,
- Enjeux situés dans la zone moyenne d'accrétion en 2120,
- Enjeux situés dans la zone maximale d'accrétion en 2120,
- Enjeux situés dans la zone moyenne d'érosion en 2300,
- Enjeux situés dans la zone maximale d'érosion en 2300,
- Enjeux situés dans la zone d'érosion des falaises en 2300,
- Enjeux situés dans la zone d'érosion des falaises augmentée des événements historiques en 2300,
- Enjeux situés dans la zone moyenne d'accrétion en 2300,
- Enjeux situés dans la zone maximale d'accrétion en 2300.

Selon le type d'enjeux, le croisement avec les zones en accrétion n'est pas réalisé car elles ne représentent pas un risque.

6.1.2.3 Croisement des enjeux et des zones submergées

Les couches d'enjeux sont croisées avec les couches de submersion présentées en 4. Effets de l'élévation du niveau marin sur la dynamique de la bande côtière, en utilisant l'outil « Intersecter » sur ArcGis Pro.

Pour chaque type d'enjeux 3 couches peuvent être créées :

- Enjeux situés dans une zone potentiellement submergée à l'horizon 2050,
- Enjeux situés dans une zone potentiellement submergée à l'horizon 2120,
- Enjeux situés dans une zone potentiellement submergée à l'horizon 2300.

6.1.2.4 Croisement des enjeux et des zones à risques littoraux

Les zones d'évolution du trait de côte obtenues en partie 3 et les zones potentiellement submergées obtenues en partie 5 sont fusionnées afin de créer une couche « risques littoraux ». Cette couche est ensuite croisée avec les différentes couches d'enjeux. Pour chaque type d'enjeux, 3 couches peuvent être créées :

- Enjeux situés dans une zone impactée par les risques littoraux en 2050,
- Enjeux situés dans une zone impactée par les risques littoraux en 2120,
- Enjeux situés dans une zone impactée par les risques littoraux en 2300.

6.1.2.5 Calcul des enjeux impactés

A la suite du croisement des données réalisé sur ArcGis Pro, les tables attributaires des couches impactées par l'évolution du trait de côte, par la submersion marine et par l'addition des deux sont exportées sur Excel. Des tableaux croisés dynamiques sont ensuite construits (Figure 80) afin d'obtenir la surface et / ou le nombre des enjeux impactés en 2050, 2120 et 2300.

| | | |
|----------------------|--|------------|
| Horizon | 2120 | |
| Somme de Shape_Area | | |
| NOM | type_evolution | Total |
| Calvados | Zone d'érosion des falaises ajoutée aux événements historiques en 2120 | 51613,6255 |
| | Zone d'érosion des falaises en 2120 | 2379,48119 |
| | Zone maximale d'érosion en 2120 | 474461,786 |
| | Zone moyenne d'érosion en 2120 | 20104,151 |
| Total Calvados | | 548559,044 |
| Manche | Zone d'érosion des falaises en 2120 | 9916,58527 |
| | Zone maximale d'érosion en 2120 | 4918936,67 |
| | Zone moyenne d'érosion en 2120 | 709013,389 |
| Total Manche | | 5637866,65 |
| Seine-Maritime | Zone d'érosion des falaises ajoutée aux événements historiques en 2120 | 956396,665 |
| | Zone d'érosion des falaises en 2120 | 356434,017 |
| Total Seine-Maritime | | 1312830,68 |
| Total général | | 7499256,37 |

Figure 80 : Tableau croisé dynamique présentant la surface des surfaces pastorales / prairies permanentes impactée par le recul du trait de côte.

6.2 Résultats obtenus

6.2.1 Typologie d'enjeux socio-économiques

La typologie d'enjeux créée est divisée en trois grand type d'enjeux :

- Production primaire,
- Production secondaire, production tertiaire et usage résidentiel,
- Réseaux de transport logistique et infrastructures.

Chacun de ces types d'enjeux est divisé en deux niveaux de précision (Tableau 10).

Tableau 10 Typologie d'enjeux

| Niveau 1 | Niveau 2 | Niveau 3 |
|---------------------|-----------------------------------|---|
| Production primaire | Élevage | Pâturage de prés salés |
| | | Surface pastorale / prairie permanente |
| | | Activité équestre |
| | Cultures | Verger |
| | | Maraîchage |
| | | Pépinière |
| | | Autre espace de culture |
| | Bâtiments d'exploitation agricole | Bâtiment agricole (y.c. serre ou silo) |
| | Aquaculture | Cadastre conchylicole + zones conchylicole à terre + réseaux de pompage et de rejet |
| | | Cadastre mytilicole |
| | | Parcs piscicoles |

| | | |
|--|---|--|
| | Sylviculture | 7 différents types de production |
| | Autres productions primaires dont chasse | Réserve de chasse Gabion |
| Production secondaire, production tertiaire et usage résidentiel | Production d'énergie | Éolienne (mât) |
| | | Centrale thermique |
| | | Site nucléaire |
| | | Centrale photovoltaïque |
| | Industrie à risque | Site classé SEVESO (ponctuel) |
| | | Site classé SEVESO seuil haut/bas (surfacique) |
| | Zone industrielle | Parcelle à usage industriel |
| | Établissement industriel | Local industriel |
| | Commerce et hôtellerie | Commerce ou service |
| | | Camping |
| | | Aire d'accueil des gens du voyage |
| | | Hébergement de loisirs |
| | Enseignement | Enseignement primaire |
| | | Collège |
| | | Lycée |
| | | Enseignement supérieur |
| | Santé | Établissement thermal |
| Établissement hospitalier | | |
| Maison de retraite | | |
| Culture et loisirs | Bâtiments historiques (ouvrages militaires, églises...) | |
| | Musée | |
| | Autres structures de loisirs | |
| Résidentiel | Résidentiel individuel | |
| | Résidentiel collectif | |
| | Résidentiel secondaire | |
| | Dépendance | |
| Réseaux de transport logistique et infrastructures | Réseau routier | Routes de marais |
| | | Chemin ou sentier ou route empierrée |
| | | Route revêtue |
| | | RD, RN |

| | | |
|-------------------|---|--|
| | Réseaux ferrés | Voie ferrée |
| | Réseau de transport aérien | Piste d'aérodrome |
| | Services de logistiques et de stockage | |
| | Réseau d'utilité publique : transport et distribution d'électricité, de gaz, de pétrole | Poste de transformation |
| | | Réseaux enterrés |
| | Réseau d'utilité publique : eau et traitement de l'eau | Stockage d'eau |
| | | STEU |
| | | Point de rejet de STEU |
| | | Site de production d'eau potable |
| | | Réseau de collecte des eaux en lien avec la STEP |
| | Réseau d'utilité publique : déchets, traitement et recyclage | Déchèterie |
| Décharge ancienne | | |

6.2.2 Enjeux impactés par le recul du trait de côte

Pour rappel, un enjeu est considéré comme impacté dès qu'il intersecte avec une zone de projection du trait de côte.

Avec les tableaux dynamiques présentés en Figure 80, le nombre ou la surface des enjeux impactés par l'évolution du trait de côte sont mesurés. Ces résultats sont présentés sous forme d'un tableau détaillé en Annexe 5. Le nombre / surface total par département sont présentés ci-après.

6.2.2.1 Production primaire

Les productions primaires seront les plus impactées par le recul du trait de côte. Le Calvados, la Manche et la Seine-Maritime perdront plusieurs hectares de zones de productions primaires :

Tableau 11 Enjeux liés à la production primaire impactés par l'évolution du trait de côte par département

| Département | Type enjeux | 2050 | 2120 | 2300 |
|----------------|-----------------|------|------|------|
| Calvados | Surface (en ha) | 21 | 92 | 391 |
| | Construction | 0 | 8 | 33 |
| Manche | Surface (en ha) | 147 | 786 | 3994 |
| | Construction | 8 | 58 | 269 |
| Seine-Maritime | Surface (en ha) | 141 | 231 | 478 |
| | Construction | 0 | 0 | 0 |

Il est possible de constater que dès 2050 les enjeux seront importants. En 2120, les surfaces impactées se verront se multiplier en moyenne par 4 et par 16 en 2300. Le nombre de bâtiment impacté reste faible excepté dans la Manche.

Les surfaces pastorales et les autres espaces de cultures seront les zones les plus touchées par le recul du trait de côte, notamment dans la Manche.

Il n'y a pas de pépinière ni de réserve nationale de chasse dans la zone d'étude.

Tableau 12 Enjeux liés à de la production primaire impactés par l'évolution du trait de côte

| Type d'enjeux | Département | 2050 | 2120 | 2300 |
|---|----------------|------|------|------|
| Pâturage de prés salés (en ha) | Calvados | 0 | 0 | 0 |
| | Manche | 0 | 1 | 42 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Surface pastorale / prairies permanentes (en ha) | Calvados | 13 | 53 | 170 |
| | Manche | 120 | 500 | 1900 |
| | Seine-Maritime | 65 | 95 | 170 |
| Activité équestre | Calvados | 0 | 0 | 1 |
| | Manche | 0 | 0 | 1 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Verger (en ha) | Calvados | 0 | 1 | 13 |
| | Manche | 0 | 0 | 7 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Maraîchage (en ha) | Calvados | 0 | 0 | 1 |
| | Manche | 1 | 21 | 200 |
| | Seine-Maritime | 6 | 10 | 24 |
| Autre espace de culture (en ha) | Calvados | 8 | 36 | 170 |
| | Manche | 26 | 240 | 1700 |
| | Seine-Maritime | 67 | 120 | 270 |
| Bâtiment d'exploitation agricole | Calvados | 0 | 6 | 28 |
| | Manche | 7 | 42 | 241 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Cadastre aquacole (en ha) | Calvados | 0 | 0 | 6 |
| | Manche | 0 | 6 | 52 |

| | | | | |
|--|----------------|---|----|----|
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Bassin conchylicole ou piscicole à terre | Manche | 0 | 11 | 22 |
| Zones conchylicole ou piscicole à terre (en ha) | Calvados | 0 | 3 | 3 |
| | Manche | 1 | 8 | 31 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Réseau de pompage | Calvados | 0 | 0 | 0 |
| | Manche | 0 | 1 | 1 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Cadastre mytilicole (en ha) | Calvados | 0 | 0 | 2 |
| | Manche | 0 | 0 | 0 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Sylviculture (en ha) | Calvados | 0 | 0 | 27 |
| | Manche | 0 | 0 | 40 |
| | Seine-Maritime | 4 | 6 | 14 |
| Gabions | Calvados | 0 | 2 | 4 |
| | Manche | 1 | 4 | 4 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |

6.2.2.2 Production secondaire et tertiaire

De nombreux enjeux listés dans la typologie ne seront pas impactés par l'évolution du trait de côte d'ici 2300 :

- Éoliennes,
- Centrales thermiques,
- Centrales photovoltaïques,
- Sites classés SEVESO (seuil haut et bas),
- Aires d'accueil des gens du voyage,
- Collèges,
- Maisons de retraite,
- Établissements thermale,
- Établissement hospitaliers.

Les enjeux de production secondaire des départements du Calvados, de la Manche et de Seine-Maritime seront touchés plus ou moins équitablement en 2050 et 2120. En 2300, la Manche connaîtra une forte augmentation du nombre d'établissement impacté, passant de 68 à 177 (Tableau 13).

Tableau 13 Enjeux liés à la production secondaire impactés par l'évolution du trait de côte par département

| Département | Type enjeu | 2050 | 2120 | 2300 |
|----------------|-----------------|------|------|------|
| Calvados | Surface (en ha) | 0 | 0 | 0 |
| | Établissement | 21 | 30 | 47 |
| | Résidence | 56 | 175 | 741 |
| Manche | Surface (en ha) | 1 | 2 | 32 |
| | Établissement | 29 | 68 | 177 |
| | Résidence | 198 | 1096 | 5386 |
| Seine-Maritime | Surface (en ha) | 0 | 0 | 0 |
| | Établissement | 49 | 55 | 60 |
| | Résidence | 38 | 156 | 512 |

Les bâtiments résidentiels seront les plus impactés par le recul du trait de côte, en 2050 presque 300 résidences seront déjà impactées en Normandie. Ce chiffre se verra se multiplier par 5 d'ici 2120 et par 23 d'ici 2300. Les bâtiments historiques seront aussi très impactés par le recul du trait de côte. En effet, dans le Calvados ils représenteront 60 % des établissements impactés, 40 % dans la Manche et 90 % en Seine-Maritime (Tableau 14).

Tableau 14 Enjeux liés à la production secondaire impactés par l'évolution du trait de côte

| Type enjeu | Département | 2050 | 2120 | 2300 |
|--|----------------|------|------|------|
| Site nucléaire | Seine-Maritime | 2 | 2 | 2 |
| Parcelle à usage industriel (en ha) | Calvados | 0 | 0 | 0 |
| | Manche | 1 | 2 | 32 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Local industriel | Calvados | 0 | 1 | 1 |
| | Manche | 0 | 1 | 4 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Commerce ou service | Calvados | 0 | 4 | 9 |
| | Manche | 2 | 16 | 85 |

| | | | | |
|--|----------------|-----|------|------|
| | Seine-Maritime | 0 | 2 | 2 |
| Camping | Calvados | 3 | 5 | 7 |
| | Manche | 10 | 17 | 26 |
| | Seine-Maritime | 1 | 1 | 3 |
| Hébergement de loisirs | Calvados | 0 | 0 | 2 |
| | Manche | 1 | 1 | 2 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Enseignement primaire | Calvados | 0 | 0 | 0 |
| | Manche | 0 | 0 | 1 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Lycée | Calvados | 3 | 3 | 3 |
| | Manche | 0 | 0 | 0 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 1 |
| Enseignement supérieur | Calvados | 0 | 0 | 0 |
| | Manche | 0 | 0 | 1 |
| | Seine-Maritime | 1 | 1 | 1 |
| Bâtiments historiques (ouvrages militaires, églises...) | Calvados | 15 | 17 | 25 |
| | Manche | 14 | 31 | 55 |
| | Seine-Maritime | 45 | 49 | 52 |
| Musée | Calvados | 0 | 0 | 0 |
| | Manche | 1 | 1 | 1 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Autres structures de loisirs | Calvados | 0 | 0 | 0 |
| | Manche | 1 | 1 | 2 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Résidentiel | Calvados | 56 | 175 | 741 |
| | Manche | 198 | 1096 | 5386 |
| | Seine-Maritime | 38 | 156 | 512 |

6.2.2.3 Réseaux de transport logistique et infrastructures

Les réseaux de transport dans la Manche seront les plus impactés par la submersion marine avec 58 km situés dans une zone potentiellement submergée en 2050, 159 km en 2120 et 459 km en 2300. Le nombre d'infrastructures impactés par l'évolution du trait de côte reste assez faible. En effet, il y aura au maximum 47 infrastructures impactés en Normandie en 2300.

Tableau 15 Type d'enjeux liés aux réseaux de transport logistique et infrastructures impactés par l'évolution du trait de côte par département

| Département | Type enjeu | 2050 | 2120 | 2300 |
|----------------|------------------|------|------|------|
| Calvados | Linéaire (en km) | 20 | 29 | 69 |
| | Infrastructure | 0 | 0 | 2 |
| Manche | Linéaire (en km) | 58 | 159 | 459 |
| | Infrastructure | 2 | 11 | 26 |
| Seine-Maritime | Linéaire (en km) | 27 | 34 | 55 |
| | Infrastructure | 15 | 17 | 19 |

Les routes / chemins seront le plus touchés par l'évolution du trait de côte. En effet au total, 105 km en 2050, 222 km en 2120 et 578 km en 2300 seront impactés.

Les enjeux liés à l'eau et au traitement de l'eau seront aussi à surveiller car certains seront à risque dès 2050. De même pour les décharges anciennes dans la Manche et en Seine-Maritime, 14 d'entre elles se trouveront dans une zone érodée en 2050. En Seine-Maritime, le risque est qu'elles s'écroulent sur l'estran en bas des falaises et se fassent emporter par la marée.

Tableau 16 Enjeux liés aux réseaux de transport logistique et infrastructures impactés par l'évolution du trait de côte

| Type enjeu | Département | 2050 | 2120 | 2300 |
|---|----------------|------|------|------|
| Chemin ou sentier ou route empierrée (en km) | Calvados | 12 | 16 | 36 |
| | Manche | 33 | 86 | 206 |
| | Seine-Maritime | 13 | 17 | 27 |
| Route revêtue (en km) | Calvados | 8 | 13 | 33 |
| | Manche | 25 | 73 | 248 |
| | Seine-Maritime | 14 | 17 | 28 |
| RD, RN (en km) | Calvados | 2 | 4 | 13 |
| | Manche | 7 | 24 | 91 |
| | Seine-Maritime | 3 | 3 | 5 |
| Voie ferrée (en km) | Calvados | 0 | 0 | 0 |
| | Manche | 0 | 0 | 5 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Piste d'aérodrome | Calvados | 0 | 0 | 0 |
| | Manche | 0 | 3 | 4 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |

| | | | | |
|---|----------------|----|----|----|
| Stockage d'eau | Calvados | 0 | 0 | 1 |
| | Manche | 0 | 0 | 5 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| STEU | Calvados | 0 | 0 | 1 |
| | Manche | 1 | 4 | 9 |
| | Seine-Maritime | 1 | 3 | 5 |
| Point de rejet de STEU | Calvados | 0 | 0 | 0 |
| | Manche | 0 | 2 | 5 |
| | Seine-Maritime | 1 | 1 | 1 |
| Site de production d'eau potable | Calvados | 0 | 0 | 0 |
| | Manche | 0 | 0 | 4 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Déchèterie | Calvados | 0 | 0 | 0 |
| | Manche | 0 | 0 | 1 |
| | Seine-Maritime | 0 | 0 | 0 |
| Décharge ancienne | Calvados | 0 | 0 | 0 |
| | Manche | 1 | 2 | 3 |
| | Seine-Maritime | 13 | 13 | 13 |

6.2.3 Enjeux impactés par la submersion marine

Un enjeu est estimé impacté par la submersion marine lorsque qu'il intersecte avec la zone de submersion délimitée en MMM

Avec les tableaux dynamiques le nombre ou la surface des enjeux impactés par la submersion marine sont mesurés.

6.2.3.1 Production primaire

Les enjeux surfaciques impactés augmentent de 33 % entre 2050 et 2120 et de 11 % entre 2120 et 2300. Les infrastructures impactées augmentent de 16 % entre 2050 et 2120 et de 24 % en 2120 et 2300.

Tableau 17 Type d'enjeux liés aux enjeux secondaires impactés par la submersion marine

| Type enjeu | 2050 | 2120 | 2300 |
|-----------------|-------|-------|-------|
| Surface (en ha) | 25675 | 34207 | 38197 |
| Infrastructure | 1088 | 1269 | 1578 |

Les surfaces pastorales ou prairies permanentes seront les plus impactées par la submersion marine. Elles représentent 69 % des surfaces totales impactées en 2050, 63 % en 2120 et 61 % en 2300. Les autres espaces de cultures seront aussi très impactés avec en moyenne 7100 ha situés sur dans une zone potentiellement submergée. Le nombre de bâtiments agricoles impactés est important dès 2050, avec 745 bâtiments touchés, passant à 821 en 2120 et 1098 en 2300 (Tableau 18).

Tableau 18 Enjeux liés à la production primaire impactés par la submersion marine

| Type d'enjeux | 2 050 | 2 120 | 2 300 |
|---|--------|--------|--------|
| Pâturage de prés salés (en ha) | 123 | 4 386 | 4 389 |
| Surface pastorale / prairie permanente (en ha) | 17 832 | 21 582 | 23 502 |
| Activité équestre | 9 | 10 | 11 |
| Verger (en ha) | 0 | 1 | 3 |
| Maraîchage (en ha) | 911 | 1 077 | 1 572 |
| Pépinière (en ha) | 0 | 0 | 0 |
| Autre espace de culture (en ha) | 6 422 | 6 712 | 8 174 |
| Bâtiment d'exploitation agricole | 745 | 821 | 1 098 |
| Cadastre aquacole (en ha) | 0 | 0 | 0 |
| Bassin conchylicoles ou piscicoles à terre de la Manche | 58 | 78 | 102 |
| Zones conchylicole ou piscicole à terre (en ha) | 86 | 96 | 107 |
| Réseau de pompage | 0 | 0 | 0 |
| Cadastre mytilicole (en ha) | 0 | 0 | 0 |
| Parcs piscicoles (en ha) | 0 | 0 | 0 |
| Sylviculture (en ha) | 301 | 353 | 450 |
| Réserve de chasse | 0 | 0 | 0 |
| Gabion | 276 | 360 | 367 |

6.2.3.2 Production secondaire, tertiaire et résidentiel

Les infrastructures liées à la production secondaire et tertiaire seront fortement impactées par la submersion marine. De plus leur nombre se verra doubler entre 2050 et 2300.

Tableau 19 Type d'enjeux liés à la production secondaire, tertiaire et résidentiel impacté par la submersion marine.

| Type enjeux | 2050 | 2120 | 2300 |
|-----------------|-------|-------|-------|
| Surface (en ha) | 211 | 330 | 408 |
| Infrastructure | 6228 | 9241 | 12918 |
| Résidentiel | 41739 | 62352 | 98525 |

Les commerces et services seront le plus impactés par la submersion marine, ils représentent 87 % des bâtiments impactés en 2050, 89 % en 2120 et 90 % en 2300. Les bâtiments historiques et les locaux industriels seront aussi très impactés avec en moyenne 254 bâtiments historiques situés dans une zone submersible et 316 locaux industriels.

Le nombre de résidences augmentera fortement entre 2050 et 2300 avec une hausse de 33 % entre 2050 et 2120 et 37 % entre 2120 et 2300 (Tableau 20).

Tableau 20 Enjeux liés à la production secondaire, tertiaire et résidentiel impacté par la submersion marine

| Type d'enjeux | 2050 | 2120 | 2300 |
|---|-------|-------|-------|
| Éolienne (mât) | 0 | 0 | 0 |
| Centrale thermique | 1 | 1 | 1 |
| Site nucléaire | 3 | 3 | 3 |
| Centrale photovoltaïque | 0 | 0 | 0 |
| Site classé SEVESO (ponctuel) | 13 | 19 | 23 |
| Site classé SEVESO seuil haut/bas (surfacique) | 23 | 23 | 23 |
| Parcelle à usage industriel (en ha) | 1458 | 2132 | 2503 |
| Local industriel | 211 | 330 | 408 |
| Commerce ou service | 5468 | 8230 | 11641 |
| Camping | 102 | 111 | 122 |
| Aire d'accueil des gens du voyage | 6 | 6 | 7 |
| Hébergement de loisirs | 18 | 21 | 23 |
| Enseignement primaire | 54 | 68 | 91 |
| Collège | 15 | 17 | 21 |
| Lycée | 17 | 18 | 19 |
| Enseignement supérieur | 17 | 18 | 18 |
| Établissement thermal | 6 | 6 | 7 |
| Établissement hospitalier | 10 | 11 | 12 |
| Maison de retraite | 12 | 13 | 17 |
| Bâtiments historiques (ouvrages militaires, églises...) | 181 | 243 | 337 |
| Musée | 14 | 20 | 31 |
| Autres structures de loisirs | 57 | 83 | 113 |
| Résidentiel | 41739 | 62352 | 98525 |

6.2.3.3 Réseaux de transport logistique et infrastructures

Les réseaux de transport vont être fortement impactés par la submersion marine avec presque 6000 km impactés en 2050, 7700 en 2120 et 10500 en 2300. Le nombre d'infrastructures liées aux réseaux de transport logistique et infrastructures impactés par la submersion marine est assez stable entre 2050 et 2300 avec une moyenne de 318 (Tableau 21) .

Tableau 21 Type d'enjeux liés aux réseaux de transport logistique et infrastructures impactés par la submersion marine

| Type enjeu | 2050 | 2120 | 2300 |
|------------------|------|------|-------|
| Linéaire (en km) | 5924 | 7724 | 10526 |
| Infrastructure | 262 | 319 | 373 |

| Type d'enjeux | 2050 | 2120 | 2300 |
|---|------|------|------|
| Chemin ou sentier ou route empierrée (en km) | 1809 | 2253 | 3034 |
| Route revêtue (en km) | 3136 | 4192 | 5736 |
| RD, RN (en km) | 707 | 909 | 1318 |
| Voie ferrée (en km) | 273 | 370 | 438 |
| Piste d'aérodrome (en km) | 1 | 4 | 7 |
| Services de logistiques et de stockage | 74 | 93 | 110 |
| Poste de transformation | 13 | 20 | 22 |
| Stockage d'eau | 26 | 27 | 35 |
| STEU | 52 | 54 | 65 |
| Point de rejet de STEU | 45 | 60 | 63 |
| Site de production d'eau potable | 24 | 31 | 40 |
| Déchèterie | 8 | 12 | 13 |
| Décharge ancienne | 20 | 22 | 25 |

6.2.4 Effet cumulé de l'évolution du trait de côte et de la submersion marine

Pour rappel, un enjeu est considéré comme impacté dès qu'il intersecte avec une zone d'évolution du trait de côte ou une zone estimée comme sous le niveau marin.

Avec les tableaux dynamiques, le nombre ou la surface des enjeux impactés par l'évolution du trait de côte ou les zones de submersion marine sont mesurés.

6.2.4.1 Production primaire

| Type d'enjeux | 2050 | 2120 | 2300 |
|-----------------|-------|-------|-------|
| Surface (en ha) | 25907 | 34988 | 41730 |
| Infrastructure | 795 | 1316 | 1803 |

| Niveau 3 | 2050 | 2120 | 2300 |
|---|-------|-------|-------|
| Pâturage de prés salés (en ha) | 123 | 4386 | 4389 |
| Surface pastorale / prairie permanente (en ha) | 17964 | 22002 | 25037 |
| Activité équestre | 9 | 10 | 12 |
| Verger (en ha) | 0 | 1 | 20 |
| Maraîchage (en ha) | 917 | 1097 | 1652 |
| Pépinière (en ha) | 0 | 0 | 0 |
| Autre espace de culture (en ha) | 6512 | 7038 | 9970 |
| Bâtiment d'exploitation agricole | 752 | 866 | 1321 |
| Cadastre aquacole (en ha) | 0 | 7 | 58 |
| Bassin conchylicoles ou piscicoles à terre de la Manche | 13 | 79 | 103 |
| Zones conchylicole ou piscicole à terre (en ha) | 87 | 98 | 107 |
| Réseau de pompage | 0 | 1 | 1 |
| Cadastre mytilicole (en ha) | 0 | 0 | 2 |
| Parcs piscicoles (en ha) | 0 | 0 | 0 |
| Sylviculture (en ha) | 304 | 358 | 496 |
| Réserve de chasse | 0 | 0 | 0 |
| Gabion | 21 | 361 | 367 |

6.2.4.2 Production secondaire, tertiaire et résidentiel

| Type d'enjeux | 2050 | 2120 | 2300 |
|-----------------|-------|-------|--------|
| Surface (en ha) | 1458 | 2133 | 2504 |
| Infrastructure | 6301 | 9342 | 13112 |
| Résidentiel | 41783 | 62592 | 101525 |

| Niveau 3 | 2050 | 2120 | 2300 |
|--------------------|------|------|------|
| Éolienne (mât) | 0 | 0 | 0 |
| Centrale thermique | 1 | 1 | 1 |

| | | | |
|---|-------|-------|--------|
| Site nucléaire | 3 | 3 | 3 |
| Centrale photovoltaïque | 0 | 0 | 0 |
| Site classé SEVESO (ponctuel) | 13 | 19 | 23 |
| Site classé SEVESO seuil haut/bas (surfactive) | 23 | 23 | 27 |
| Parcelle à usage industriel (en ha) | 1458 | 2133 | 2504 |
| Local industriel | 211 | 332 | 411 |
| Commerce ou service | 5468 | 8240 | 11695 |
| Camping | 107 | 117 | 129 |
| Aire d'accueil des gens du voyage | 6 | 6 | 7 |
| Hébergement de loisirs | 18 | 21 | 24 |
| Enseignement primaire | 54 | 68 | 96 |
| Collège | 15 | 17 | 21 |
| Lycée | 18 | 18 | 20 |
| Enseignement supérieur | 18 | 19 | 21 |
| Établissement thermal | 6 | 6 | 7 |
| Établissement hospitalier | 10 | 11 | 12 |
| Maison de retraite | 12 | 13 | 17 |
| Bâtiments historiques (ouvrages militaires, églises...) | 247 | 325 | 452 |
| Musée | 14 | 20 | 31 |
| Autres structures de loisirs | 57 | 83 | 115 |
| Résidentiel | 41783 | 62592 | 101525 |

6.2.4.3 Réseaux de transports logistique et infrastructure

| Type d'enjeux | 2050 | 2120 | 2300 |
|-----------------|------|------|-------|
| Surface (en ha) | 6122 | 8081 | 11457 |
| Infrastructure | 276 | 335 | 402 |

| Niveau 3 | 2050 | 2120 | 2300 |
|--|------|------|------|
| Chemin ou sentier ou route empierrée (en km) | 1907 | 2416 | 3349 |
| Route revêtue (en km) | 3215 | 4337 | 6173 |
| RD, RN (en km) | 727 | 952 | 1478 |
| Voie ferrée (en km) | 273 | 370 | 450 |

| | | | |
|---|----------|----------|----------|
| Piste d'aérodrome (en km) | 1 | 5 | 8 |
| Services de logistiques et de stockage | 74 | 93 | 110 |
| Poste de transformation | 13 | 20 | 22 |
| Stockage d'eau | 26 | 27 | 40 |
| STEU | 53 | 58 | 73 |
| Point de rejet de STEU | 46 | 62 | 66 |
| Site de production d'eau potable | 24 | 31 | 42 |
| Déchèterie | 8 | 12 | 14 |
| Décharge ancienne | 32 | 32 | 35 |

7. CONCLUSION

Cette étude, commandée par la DREAL Normandie et validée par un comité de suivi, a permis d'estimer les enjeux concernés par les risques littoraux (évolution du trait de côte et submersion marine) aux horizons 2050, 2120 et 2300, à l'échelle régionale. Dans cet objectif, de nouvelles données sur le trait de côte normand ont été créées : une typologie du trait de côte normand, une typologie de la vulnérabilité des dunes, un trait de côte de 2016-2019 et des ZPNM en 2120 et 2300. Ces données pourront être réutilisées ou affinées dans de futures études telle que l'élaboration des cartes locales d'exposition au recul du trait de côte. Il est à noter que l'ensemble des analyses ont été réalisées en tenant compte de l'hypothèse maximisante.

Les horizons ont été déterminés selon les règles d'inconstructibilité de la loi Climat et Résilience à 30 et 100 ans. L'horizon 2300 est aussi analysé afin d'étudier un horizon plus lointain. Afin de prendre en compte l'impact du changement climatique, le niveau marin a été analysé avec une élévation de 50 cm en 2050, 120 cm en 2120 et 300 cm en 2300, en suivant le scénario RCP8.5 du Rapport spécial du GIEC de 2019.

La typologie du trait de côte, créée dans le but d'analyser les secteurs de mêmes caractéristiques, s'appuie sur trois familles de critères : la morphologie de la côte, son exposition aux facteurs météo-marins ainsi que la géologie et les mécanismes d'évolution de la côte et de l'estran. Au total, 38 typologies différentes ont été observées au niveau régionale.

Afin d'estimer l'évolution future du trait de côte, son évolution passée a été analysé en s'appuyant sur les trait de côte de 1947, 1977, 1982, 1992, 2001, 2010 et 2016-2019 et en appliquant la méthode des surfaces perdues / gagnées. Des vitesses d'évolution en m/an ont été obtenues. Ces dernières ont ensuite été projetées en 2050, 2120 et 2300 d'après une méthodologie variant selon le type d'évolution et le type de côte.

Pour l'analyse de la submersion marine, la méthodologie des Zones Potentiellement sous le Niveau Marin (ZPNM) de la DREAL Normandie a été utilisée. Elle consiste à afficher les zones basses sous le niveau marin centennal aux horizons étudiés en tenant compte des prévisions d'élévation du niveau marin du Rapport spécial du GIEC de 2019 sous le scénario RCP8.5.

En parallèle, une typologie dunaire a été créée afin de déterminer la vulnérabilité des dunes face à la submersion marine. Cette typologie s'appuie sur la méthodologie de l'ONF de 2014. Quatre critères sont analysés : leur profil topographique, la couverture végétale présente sur les dunes, leur capacité de recul et leur robustesse face à la submersion marine. Ces paramètres sont analysés un à un selon différentes méthodologie (photo-interprétation, analyse de profil topographique, analyse SIG...), puis pondérées selon leur sensibilité à l'érosion par submersion. Au final, quatre niveaux de vulnérabilités peuvent être obtenus. Ces résultats pourront être croisés avec les ZPNM afin de, avec des modélisations supplémentaires, préciser les zones submergées.

Finalement, une typologie des enjeux a été construite. Cette dernière est divisée en trois grands ensemble d'enjeux (Production primaire/Production secondaire, tertiaire et résidentiel/Réseaux de transports logistiques et infrastructures), découpés selon trois niveaux de précision. Les données utilisées proviennent de sources variées (IGN, CRIGE, Cerema...) et sont croisées avec les zone d'évolution du trait de côte et les ZPNM obtenues. Les résultats sont présentés en hectare de surface impacté ou en nombre d'infrastructure impacté.

L'ensemble de ces analyses ont montré que les résultats variaient selon les méthodologies utilisées et qu'elles pouvaient être mises à jour selon les futures estimations du GIEC.

L'évaluation économique des enjeux sera réalisée par le Cerema à partir de 2023.

Les Vaches Noires, le secteur entre Trouville et Villerville ainsi que les havres et estuaires n'ont pas été étudiés dans le cadre de cette étude et pourraient faire l'objet d'une étude à part entière. De même pour le volet inondation par remontée de nappe.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Agence de l'eau Seine Normandie. « Caen la mer : une ambition territoriale face à la montée de la mer ! » Eau Seine Normandie. Consulté le 27 avril 2020. http://www.eau-seine-normandie.fr/caen_la_mer_CC_aout_2019.
- BRGM. « Cartes géologiques ». InfoTerre, s. d. <https://infoterre.brgm.fr/page/cartes-geologiques>.
- . « Mouvements de terrain ». InfoTerre, s. d. <https://infoterre.brgm.fr/page/mouvements-terrain>.
- Cazenave, A., et R. J. Nicholls. « Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal zones ». *Science* 328 (18 juin 2010). <https://doi.org/10.1126/sciences.1185782>.
- Cerema. « Cartographie de l'artificialisation du trait de côte. Spécification technique du produit. », janvier 2018. <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/20180118-specif-tech-artif-tdc-littoraux.pdf#:~:text=D%C3%A9finition%20du%20produit%20Pour%20cette%20cartographie%2C%20le%20trait,%C3%A9volution%20est%20potentiellement%20influenc%C3%A9e%20par%20ces%20constructions.%202.4>.
- . « Cartographie nationale des ouvrages et aménagements littoraux ». Géolittoral : Le portail de la mer et du littoral, 27 août 2021. <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/cartographie-nationale-des-ouvrages-et-r502.html>.
- . « Dynamique et évolution du littoral : Synthèse des connaissances des côtes françaises ». Dynamique et évolution du littoral, s. d. <https://cerema.maps.arcgis.com/apps/MapJournal/index.html?appid=a0e7a75fcfda48218d6160c0ae4eb514>.
- . *Dynamique et évolution du littoral : Synthèse des connaissances, du cap d'Antifer au cap de la Hague*. Cerema. Vol. Fascicule 3. Connaissances, 2019.
- . « Dynamique et évolution du littoral, synthèse des connaissances du cap de la Hague à la pointe de Corsen. » Connaissances, 2021.
- . « Dynamiques et évolution du littoral - Synthèse des connaissances ». Géolittoral : Le portail de la mer et du littoral, 27 août 2021. <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/les-documents-de-synthese-r464.html>.
- . « Indicateur national de l'érosion côtière : Méthodologie ». Géolittoral : Le portail de la mer et du littoral. Consulté le 20 août 2020. <http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/methodologie-r475.html>.
- Chaumillon, Eric, Guy Wöppelmann, Mikhail Karpytchev, et Xavier Bertin. « Mesures et modélisations des évolutions du niveau marin, des vagues, des tempêtes et des évolutions des littoraux pour une gestion durable des littoraux ». *Vertigo*, n° Hors-série 9 (6 juillet 2011). <https://doi.org/10.4000/vertigo.10947>.
- Clus-Auby, Christine, Roland Paskoff, et Fernand Verger. « Impact du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du littoral », 2005, 36.
- Costa, Stéphane. « Risque et Aléa inondation de villes côtières : Approche quantitative et diffusion par la réalité virtuelle (Raiv Côt) ». Caen, 26 septembre 2019. <https://www.rolnp.fr/rolnp/index.php/documents/seminaire-scientifique/2019/777-presentation-seminaire-2019-costa/file>.
- Costa, Stéphane, et Nathalie Pfeiffer. « Connaître le littoral ». In *Notre littoral pour demain : Livrable complément aux cycles d'orientation réalisés dans le cadre de l'appel à projet et lancé par la région Basse-Normandie Notre Littoral Pour Demain*, 2:64. Les cahiers de l'IRD2, 2016.
- Coutances mer et bocage. « Notre Littoral Pour Demain ». Coutances mer et bocage. Consulté le 28 avril 2020. <https://www.coutancesmeretbocage.fr/lesprojets/notre-littoral-pour-demain/>.
- Davidson-Arnott, Robin G. D. « Conceptual Model of the Effects of Sea Level Rise on Sandy Coasts ». *Journal of Coastal Research* 216 (novembre 2005): 1166-72. <https://doi.org/10.2112/03-0051.10>.

- Direction générale de l'énergie et du climat. « Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC ». Synthèse, septembre 2013.
- DREAL Normandie. « Littoraux normands 2027 ». DREAL Normandie, 9 décembre 2020. <http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/littoraux-normands-2027-a3535.html>.
- Dutton, A., et K. Lambeck. « Ice Volume and Sea Level During the Last Interglacial ». *Science* 337, n° 6091 (13 juillet 2012): 216-19. <https://doi.org/10.1126/science.1205749>.
- Espargilière, Louis. « Nouveau rapport du GIEC : cinq scénarios (plus ou moins apocalyptiques) pour la fin du siècle ». *Vert*, 9 août 2021. <https://vert.eco/articles/nouveau-rapport-du-giec-cinq-scenarios-pour-la-fin-du-siecle>.
- Folland, C.K., T.R Karl, J.R Christy, R.A Clarke, G.V Gruba, J Jouzel, M.E Mann, J Oerlemans, M.J Salinger, et S.-W Wang. « 2001: Changes in Sea Level ». In *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 881. Cambridge, United-Kingdom and New-York, NY, USA, 2001.
- GIEC. « Rapport spécial du GIEC : Scénarios d'émissions. Résumé à l'intention des décideurs », 2001.
- GIEC normand. « Systèmes côtiers, Risques naturels et restauration des écosystèmes. », 2021. https://cloud.normandie.fr/s/RqqMPzaeStop9GG?dir=undefined&path=%2F6_Littoral&openfile=5069977.
- GIP Littoral 2030. « Promulgation de la loi Climat et Résilience : dispositions relatives à la gestion de l'érosion côtière ». GIP Littoral 2030, 9 septembre 2021. <https://www.giplittoral.fr/actualites/promulgation-de-la-loi-climat-et-resilience-dispositions-relatives-la-gestion-de>.
- Hansen, J., M. Sato, et R. Ruedy. « Radiative Forcing and Climate Response ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 102, n° D6 (27 mars 1997): 6831-64. <https://doi.org/10.1029/96JD03436>.
- Hédou, François, Amélie Roche, Céline Trmal, Sabine Moraud, et Yann Deniaud. « Élaboration de l'indicateur national de l'érosion côtière ». In *XVèmes Journées, La Rochelle*, 647-54. Editions Paralia, 2018. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2018.075>.
- Institut Régional du Développement Durable. « Notre Littoral Pour Demain ». IRD2 Institut Régional du Développement Durable Normandie. Consulté le 27 avril 2020. <http://www.ird2.org/?foad=notre-littoral-pour-demain>.
- . « Projet RICOCHET ». IRD2 Institut Régional du Développement Durable Normandie. Consulté le 28 avril 2020. www.ird2.org/rencontres-chercheur/projet-ricochet/.
- IPCC. « Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ». Geneva, Switzerland, 2014.
- . « Climate Change 2021, The Physical Science Basis, Summary for Policymakers ». Sixth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change, 7 août 2021.
- . « Summary for Policymakers ». In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, 2019.
- Kopp, Robert E., Frederik J. Simons, Jerry X. Mitrovica, Adam C. Maloof, et Michael Oppenheimer. « Probabilistic Assessment of Sea Level during the Last Interglacial Stage ». *Nature* 462, n° 7275 (décembre 2009): 863-67. <https://doi.org/10.1038/nature08686>.
- Le Cozannet, Gonéri, Manuel Garcin, Lise Petitjean, Anny Cazenave, Mélanie Becker, Benoit Meyssignac, Patrice Walker, et al. « Exploring the Relation between Sea Level Rise and Shoreline Erosion Using Sea Level Reconstructions: An Example in French Polynesia ». *Journal of Coastal Research* 165 (3 janvier 2013): 2137-42. <https://doi.org/10.2112/SI65-361,10>.
- . « Exploring the Relation between Sea Level Rise and Shoreline Erosion Using Sea Level Reconstructions: An Example in French Polynesia ». *Journal of Coastal Research* 165 (3 janvier 2013): 2137-42. <https://doi.org/10.2112/SI65-361,10>.
- Légifrance. « Article 242 - LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets (1) ». Légifrance.

- Consulté le 1 décembre 2021. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/article_jo/JORFARTI000043957148.
- LETG Caen. « Recherche ». LETG - UMR6554 Littoral-Environnement-Téledétection-Géomatique. Consulté le 28 avril 2020. letg.cnrs.fr/rubrique5.html#programmes8.
- Letortu, Pauline. « Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits ». Université de Caen, 2013.
- Météofrance. « Les scénarios du GIEC ». Les scénarios du GIEC. Consulté le 16 mars 2020. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-giec-groupe-dexperts-intergouvernemental-sur-levolution-du-climat/les-scenarios-du-giec>.
- Ministère de l'Écologie, du développement durable, des Transports et du Logement. « Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Vers la relocalisation des activités et des biens. », 2012. http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/sngitc_20120301_cle211b7c.pdf.
- Nicholls, Robert J, Poh Poh Wong, Virginia Burkett, Jorge Codignotto, John Hay, Colin D Woodroffe, Pamela Abuodha, *et al.* « Coastal Systems and Low-Lying Areas ». In *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 315-56, 2007.
- . « Coastal Systems and Low-Lying Areas ». *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*, 2007, 43.
- Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, éd. *Le littoral dans le contexte du changement climatique: rapport au Premier ministre et au Parlement*. Paris: La Documentation française, 2015.
- , éd. *Le littoral dans le contexte du changement climatique: rapport au Premier ministre et au Parlement*. Paris: La Documentation française, 2015.
- Office Nationale des Forêts. « Identification et qualification des dunes domaniales susceptibles de jouer un rôle d'obstacle aux submersions marines ». Mission d'intérêt général « Prévention des risques naturels », décembre 2014.
- Paskoff, Roland. « Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies ». *Annales de Géographie* 107, n° 600 (1998): 233-48. <https://doi.org/10.3406/geo.1998.20847>.
- Pfeffer, W. T., J. T. Harper, et S. O'Neel. « Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise ». *Science* 321, n° 5894 (5 septembre 2008): 1340-43. <https://doi.org/10.1126/science.1159099>.
- Pierre, Guillaume. « L'influence des paramètres hydroclimatiques et météo-marins sur le recul des côtes à falaises. », 2015, 8.
- Planton, Serge, Gonéri Le Cozannet, Anny Cazenave, Stéphane Costa, Olivier Douez, Pierre Gaufrès, François Hissel, *et al.* « Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises. Le climat de la France au XXIème siècle », 2015.
- Région Normandie. « GIEC normand | Région Normandie », 23 mars 2022. <https://www.normandie.fr/giec-normand>.
- Rohling, E. J., K. Grant, Ch. Hemleben, M. Siddall, B. A. A. Hoogakker, M. Bolshaw, et M. Kucera. « High Rates of Sea-Level Rise during the Last Interglacial Period ». *Nature Geoscience* 1, n° 1 (janvier 2008): 38-42. <https://doi.org/10.1038/ngeo.2007.28>.
- SHOM. « Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique) », 2012.
- SHOM, et CETMEF. « Note méthodologique - SHOM CETMEF - Niveaux extrêmes », 2012.
- Université Caen Normandie, et LETG Caen. « Diffuser la connaissance scientifique – illustrations au travers de projets menés en Normandie ». Dieppes, 25 juin 2019.
- Vie publique. « Loi "Climat et Résilience" des avancées et des limites ». Vie publique, 28 octobre 2021. <https://www.vie-publique.fr/eclairage/281953-loi-climat-et-resilience-des-avancees-et-des-limites>.

9. GLOSSAIRE

Accrétion : Progression de la ligne de rivage par accumulation de sédiments.

Agent érosif : Agents favorisant l'érosion du trait de côte. Peut-être continental (ruissèlement, gel...) ou marin (vague, marée...).

Agent submersif : Agent favorisant une submersion (vague...)

Ajustement isostatique : Soulèvement des masses terrestres lié à la déglaciation.

Aquaculture : Activité de production animale ou végétale en milieu aquatique.

Bathymétrie : Mesure des profondeurs marine.

Ensemble de polygones : Zone fictive délimitée par deux transects de 50 m, contenant deux traits de côtes de différentes périodes. Les traits de côtes en s'entrecroisant, forment des polygones représentant une accrétion ou une érosion. Un ensemble de polygones est donc formé de plusieurs polygones représentatifs d'un type d'évolution.

Casier : Couche SIG regroupant les polygones d'une même ensemble de polygones. Cette couche de casiers permet de calculer les vitesses d'évolution par tronçon de 50 m.

Cadastre conchylicole : Cadastre des établissements de culture marine.

Cadastre mytilicole : Cadastre des établissements d'élevage de moules.

Capacité de recul : Capacité d'une dune ou d'un cordon dunaire à reculer.

Centrale thermique : Centrale électrique fonctionnant à partir d'une source de chaleur (charbon, fioul, gaz).

Centrale photovoltaïque : Dispositif de production d'électricité par des modules solaires photovoltaïques reliés entre eux.

Circulation océanique : Ensemble des mouvements et des déplacements de l'eau à l'échelle planétaire.

Climatologie : Discipline scientifique d'étude du climat et de l'état moyen de l'atmosphère sur de longues périodes dans le temps (répartitions géographiques et saisonnières des températures, des vents, des précipitations, etc.). La climatologie peut aussi s'appliquer au domaine océanique (paramètres de température de l'eau, de salinité, de pH, etc.).

Cordon littoral : Accumulation littoral linéaire, parallèle au trait de côte.

Cordon de galets : Accumulation de galets en haut de plage, liée à la production de silex issu de l'ablation des falaises ou du platier rocheux.

Cordon dunaire : Forme littorale constituée d'une accumulation de sable, parallèle à la côte.

Crétacé : Période géologique s'étendant de -145.5 millions d'années à -65.5 millions d'années.

Dérive littorale : Flux de sédiments sensiblement parallèle au rivage, en proche côtier.

Diachronique (analyse) : Analyse qui envisage les changements dans le temps entre deux dates.

Digue : Ouvrage longitudinal destiné à protéger les basses-terres contre les submersions.

Dune : Forme de relief érigée avec des matériaux meubles, généralement des sables, par un fluide en mouvement (vent, eau).

Ébouilisation : Détachement et accumulation de blocs et cailloux de dimensions variables au pied d'un escarpement rocheux ou d'une corniche, dont l'agencement peut varier.

Écroulement : Mouvement rapide entraînant, au pied d'un versant de pente forte, une masse de matériau issue d'une fragmentation.

Échelle de Beaufort : Permet de mesurer la vitesse moyenne du vent sur une durée de 10 min. Utilisée en milieu maritime. Comporte treize degrés : 0 correspondant à un temps calme et 12 à un ouragan.

Épis : Ouvrage de protection du littoral positionné sur la plage ou l'estran transversalement au trait de côte, captant une partie du transport sédimentaire de la dérive littorale.

Eustatisme : Variation du niveau moyen des mers de l'ordre de quelques millimètres par an, liée à des phénomènes climatiques (fonte des glaces, glaciations), sédimentologiques ou encore de subsidence.

Érosion côtière : Recul du trait de côte causé par une prépondérance des phénomènes d'enlèvement des matériaux (sable, galets...) sur les dépôts.

Estran : Partie du littoral qui se trouve entre les plus hautes et les plus basses mers, correspondant à la zone de balancement des marées.

Estuaire : Embouchure d'un fleuve.

Évènement historique : Évènement exceptionnel (éboulement d'une falaise).

Expansion thermal (des océans) : Augmentation de la densité de l'eau causée par l'élévation de la température des océans.

Faciès : Ensemble de caractère lithologique permettant de décrire une roche, un affleurement.

Facteur anthropique : Facteur analysant l'impact de l'Homme (constructions, action humaine...)

Facteur météo-marin : Facteur analysant les paramètres liés à la météorologie et à la mer (vent, houles, marée, précipitation...)

Falaise : Ensemble de rochers escarpés situés sur le littoral ou en retrait du littoral.

Flèche sableuse : Forme constituée par l'accumulation de matériaux meubles (sables ou galets) entre un point d'ancrage à une extrémité et une pointe libre à l'autre extrémité s'avancant en mer. Souvent située à l'entrée des estuaires.

Forçage orbital : Changement du climat causé par une variation de l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre et de la forme de son orbite.

Forçage radiatif : Variation dans l'énergie transmise entre la Terre et l'atmosphère. Il est mesuré par le changement du flux radiatif à un certain niveau dans l'atmosphère, causé par une perturbation qui peut être une variation de l'incidence du rayonnement solaire, de la composition atmosphérique, des propriétés de la surface terrestre.

Frangé littorale : Espace de transition entre la terre et la mer.

Gabion : Abri pour chasseur.

Gaz à effet de serre : Gaz d'origine naturelle ou anthropique présent dans l'atmosphère, absorbant et réémettant une partie des rayons solaires (rayonnement infrarouge). Phénomènes à l'origine de l'effet de serre.

Géomorphologie : Discipline scientifique dont l'objet est de nommer et de mesurer les formes du relief.

Géoréférencement : Relier un objet et ses données à sa position dans l'espace par rapport à un système de coordonnées.

Glissement : Mouvement entraînant une masse de matériaux meubles vers le bas d'un versant, avec une vitesse faible.

Houle : Oscillations régulières de la surface de la mer, observées en un point éloigné du champ de vent qui les a engendrées, dont la période se situe autour de dix secondes.

Infiltration : Introduction d'eau de surface dans le sol.

Jet de rive : Masse d'eau projetée sur un rivage vers le haut de l'estran par l'action de déferlement des vagues.

Jetée : Ouvrage qui s'avance en mer pour protéger un port.

Jurassique : Période géologique s'étendant de -201,3 millions d'années à -145 millions d'années.

Laisse de haute mer : Point atteint par le plus haut flot sur l'estran.

Côte macrotidale : Zone côtière subissant des amplitudes de marée importantes.

Marais maritime : Marais créé en zone littorale dans une aire submersible à marée haute de vive-eau.

Marégraphe : Instrument de mesure du niveau marin.

Maraîchage : Culture de légumes.

Mode d'occupation du sol (MOS) : Inventaire numérique de l'occupation du sol, construit à partir de photographie aérienne.

Morphodynamique : Discipline consacrée à l'étude des formes (du littoral) et à leur évolution sous l'action des facteurs hydrodynamiques et éoliens.

Côte microtidale : Zone côtière subissant de faibles amplitudes de marée.

Niveau marin de référence : Niveau marin centennal augmenté de 20 cm afin de prendre en compte les effets du changement climatique.

Ortholittoral : Orthophotographie du littoral

Orthophotographie : Image photographique dont on a corrigé les déformations dues au relief du terrain, à l'inclinaison de l'axe de prise de vues et à la distorsion de l'objectif. Les orthophotographies disposent d'un système de coordonnées géographiques.

Orthorectification : L'orthorectification est une correction géométrique des images qui a pour but de les présenter comme si elles avaient été acquises depuis la verticale.

Ouvrage : Construction permettant de protéger le littoral de l'érosion et de la submersion marine. Il peut être transversal (épis) ou linéaire (digue).

Ouvrage linéaire (ou longitudinal): Ouvrage parallèle au trait de côte

Ouvrage transversal : Ouvrage perpendiculaire au trait de côte.

Parc piscicole : Production de poissons en bassin artificiel ou en cage.

Pépinière : Terrain consacré à la culture de jeunes arbres destinés à être replantés.

Photointerprétation : Analyse d'images aériennes.

Plage : Espace découvert en bord de mer, plus ou moins plat. Accumulation littorale due à la mer, de granulométrie hétérogène et variable.

Platier : Estran rocheux affleurant à marée basse.

Prairies permanentes : Terrain consacré à la production d'herbe, peu ou pas travaillé, qui sert de pâturage ou à la récolte des fourrages.

Rose (de houle, de vent) : Représentation des fréquences des directions de provenance du vent ou de la houle, en un site de mesure donné et pendant une période d'observation déterminée.

Ruissellement : Écoulement instantané et temporaire, diffus ou concentré, des eaux sur un versant à la suite d'une averse.

Schorre : Partie supérieure d'un marais maritime, submergé exclusivement par pleine mer de vive-eau et constitué de vasière colonisée par une végétation exigeant une forte concentration en sel.

Sémaphore : Poste de signalisation établi sur une côte pour communiquer avec les navires.

Silex : Roche sédimentaire siliceuse d'origine physico-chimique. Se trouve sous forme de nodules dans les falaises calcaires.

STEU : Station de traitement des eaux usées.

STEP : Station d'épuration des eaux usées.

Site classé SEVESO : Site produisant ou stockant des substances pouvant être dangereuses pour l'Homme et l'environnement.

Slikke : Partie inférieure d'un marais maritime, inondée à marée haute et constituée de vasières nues découvertes à marée basse.

Submersion marine : Envahissement des espaces côtiers par la mer à la suite d'un fort coefficient de marée, d'une tempête, d'un tsunami ou du réchauffement climatique.

Surface pastorale : Terre agricole pouvant avoir moins de 50 % d'herbe fournissant une alimentation pour les troupeaux.

Sylviculture : Exploitation des arbres forestiers.

Système dunaire : Ensemble de dunes.

Topographie : Étude et mesure du relief du terrain. Le relief peut être naturel (dune, falaise) ou artificiel (bâtiment, route).

Trait de côte : Ligne de contact théorique entre la terre et la mer.

Transit sédimentaire : Transport naturel des sédiments par l'eau.

Verger : Terrain consacré à la culture d'arbres fruitiers.

10. LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| <i>Figure 1 : Ratio de gaz à effet de serre dans les scénarios RCP (NAZARENKO et al., 2015).</i> | 12 |
| <i>Figure 2 : Forçage radiatif des scénarios RCP estimés pour une simulation du climat futur (Nazarenko et al. 2015).</i> | 12 |
| <i>Figure 3 : Estimation de l'élévation du niveau de la mer sous faibles (RCP2.6) et fortes (RCP8.5) émissions de gaz à effet de serre (IPCC 2019).</i> | 14 |
| <i>Figure 4 : Localisation de l'ensemble des types géomorphologiques de côtes sur la façade normande ;</i> | 16 |
| <i>Figure 5 : Localisation des côtes à falaises (en rose) et des côtes rocheuses (en rouges).</i> | 17 |
| <i>Figure 6 : Illustration d'une côte à falaises crayeuses (dessin Muriel Sauvé, Cerema).</i> | 17 |
| <i>Figure 7 : Illustration d'une valleeuse ou basse vallée (dessin Muriel Sauvé, Cerema).</i> | 18 |
| <i>Figure 8 : Illustration des différentes formes de falaises crayeuses (dessin Muriel Sauvé, Cerema).</i> | 18 |
| <i>Figure 9 : Illustration d'une côte rocheuse (dessin Muriel Sauvé, Cerema).</i> | 19 |
| <i>Figure 10 : Illustration détaillée d'une côte rocheuse (dessin Muriel Sauvé, Cerema).</i> | 19 |
| <i>Figure 11 : Localisation des côtes basses.</i> | 20 |
| <i>Figure 12 : Illustration d'une côte sableuse (dessin Muriel Sauvé, Cerema).</i> | 20 |
| <i>Figure 13 : Illustration d'une côte sableuse à système dunaire complexe (dessin Muriel Sauvé, Cerema).</i> | 21 |
| <i>Figure 14 : Illustration détaillée d'un système dunaire complexe (dessin Muriel Sauvé, Cerema).</i> | 21 |
| <i>Figure 15 : Localisation des havres (en bleu foncé) et des estuaires (en turquoise).</i> | 22 |
| <i>Figure 16 : Illustration d'un havre (dessin Muriel Sauvé, Cerema).</i> | 22 |
| <i>Figure 17 : Illustration détaillée d'un havre (dessin Muriel Sauvé, Cerema).</i> | 23 |
| <i>Figure 18 : Localisation des côtes artificialisées en Normandie.</i> | 23 |
| <i>Figure 19 : Modèle du découpage des côtes selon les huit points cardinaux.</i> | 25 |
| <i>Figure 20 : Découpage des côtes selon les huit classes d'orientation.</i> | 25 |
| <i>Figure 21 : Localisation des sémaphores et des roses des vents en mer sur la façade normande.</i> | 27 |
| <i>Figure 22 : Mesure des vents au large du Tréport (modèle Arpège – 1999-2013).</i> | 28 |
| <i>Figure 23 : Mesure des vents à Dieppe (1973-2013).</i> | 28 |
| <i>Figure 24 : Mesure des vents au large d'Etretat (modèle Arpège – 1999-2013).</i> | 29 |
| <i>Figure 25 : Mesure des vents au Cap de la Hève (1973-2013).</i> | 29 |
| <i>Figure 26 : Mesure des vents au large de Ouistreham (modèle Arpège – 1999-2013).</i> | 30 |
| <i>Figure 27 : Mesure des vents au Cap de la Hague (1973-2013).</i> | 30 |
| <i>Figure 28 : Mesure des vents au large de la Pointe de la Hague (modèle Arpège – 1999-2013).</i> | 31 |
| <i>Figure 29 : Mesure des vents au large de Bréhat (modèle Arpège – 1999-2013).</i> | 31 |
| <i>Figure 30 : Découpage de la côte normande selon l'exposition aux vents dominants.</i> | 32 |
| <i>Figure 31 : Rose des houles au large du Havre.</i> | 32 |
| <i>Figure 32 : Rose des houles au large de Cherbourg.</i> | 32 |
| <i>Figure 33 : Exposition des côtes normandes selon les houles dominantes de nord-ouest.</i> | 33 |
| <i>Figure 34 : Hauteur et direction des vagues durant la tempête de référence du 25 janvier 1990 pour les côtes de la pointe du Hourdel au cap de la Hague.</i> | 34 |
| <i>Figure 35 : Hauteur et direction des vagues durant la tempête de référence du 20 février 1996 pour les côtes de la pointe du Hourdel au cap de la Hague.</i> | 34 |

| | |
|---|----|
| Figure 36 : Hauteur et direction des vagues durant la tempête de référence du 15 décembre 1979 pour le cap de la Hague à la limite régionale Normandie / Bretagne. | 35 |
| Figure 37 : Découpage des côtes normandes selon l'exposition aux tempêtes de référence. | 36 |
| Figure 38 : Diagrammes ombrothermiques et principaux caractères climatiques sur la période 2001-2010 pour les stations de La Hague, Cherbourg-Gonneville, Caen-Carpiquet et Deauville St-Gatien (réalisation O.Cantat, Univ. Caen Normandie, d'après données Météo-France –Synthèse des connaissances des côtes françaises (F4). | 36 |
| Figure 39 : Diagrammes ombrothermiques sur la période 2001-2010 à la pointe de la Hève et à Dieppe (extrait de la carte de climatologie atmosphérique –Synthèse des connaissances des côtes françaises – F4)..... | 37 |
| Figure 40 : Synthèse du découpage des côtes normandes selon les facteurs météo-marins. | 37 |
| Figure 41 Carte géologique de la Normandie..... | 38 |
| Figure 42 : Répartition de la typologie RS5X sur le département de la Seine-Maritime (échelle 1/100 000)..... | 49 |
| Figure 43 : Typologie U_3B dans le Calvados, à l'est de la baie des Veys. | 49 |
| Figure 44 : Typologie RA0X sur la côte nord-est de la Manche. | 49 |
| Figure 45 Illustration des territoires digitalisés et dates des orthophotographies utilisées lors de la SNGITC..... | 52 |
| Figure 46 Marqueurs par contexte géomorphologique..... | 55 |
| Figure 47 : Pertinence des marqueurs de trait de côte en fonction du contexte..... | 56 |
| Figure 48 : Erosion du "haut de falaise" de 2012 à 2019 à Quiberville (76)..... | 56 |
| Figure 49 : Érosion du pied de dune de 2010 à 2019 à Siouville (50). | 57 |
| Figure 50 : Accrétion de la limite côté mer de la végétation dunaire de 2010 à 2019 à Lestres (50)..... | 58 |
| Figure 51 : Érosion de la limite de la végétation hors dune de 2010 à 2019 à Urville (50). | 59 |
| Figure 52 : Marqueurs du trait de côte "naturel". | 60 |
| Figure 53 : Terminologie des éléments permettant de calculer la surface gagnée et/ou perdue entre deux traits de côte de millésimes différents. | 62 |
| Figure 54 : Formule de la méthode des « surfaces perdues ou gagnées » appliquée pour calculer la vitesse moyenne d'évolution entre deux traits de côte en m/an. | 62 |
| Figure 55 : Surface totale en érosion et surface totale en accrétion par casier (exemple entre 1977 et 1982). | 63 |
| Figure 56 : Surface totale du casier (au centre) et vitesse d'évolution en m/an du casier (à droite)..... | 63 |
| Figure 57 : Logigramme représentant la méthodologie finale de projection du trait de côte..... | 66 |
| Figure 58 : Exemple de représentation de l'évolution du trait de côte d'ici 2120 selon l'évolution entre 1947 et 2019. | 67 |
| Figure 59 : Exemple de secteur en érosion constante..... | 70 |
| Figure 60 : Exemple de secteur à évolution variée..... | 71 |
| Figure 61 : Position du trait de côte en 2120 selon la moyenne d'évolution 1947-2019 (en bleu), selon le maximum d'évolution 1947-2019 (en rouge) et position du trait de côte une fois reculé en arrière du marais (en vert). | 72 |
| Figure 62 : Découpage des zones de projection au droit des casiers pour supprimer les superpositions de secteurs en accrétion avec des secteurs en érosion. | 74 |
| Figure 63 : Modélisation des zones submergées à 1 m d'élévation du niveau marin réalisée par le BRGM. | 76 |
| Figure 64 : Schéma explicatif de la méthodologie appliquée par le BRGM. | 77 |
| Figure 65 : Modélisation des zones submergées à différents niveaux d'élévation du niveau marin réalisée par la DREAL Normandie. | 77 |
| Figure 66 Cartes des estimations des niveaux marins centennaux en Normandie..... | 79 |
| Figure 67 Exemple des ZPNM 2050, 2120 et 2300 entre Blonville-sur-Mer et Villers-sur-Mer..... | 80 |

| | |
|---|-----|
| Figure 68 : Catégorisation des dunes selon la méthodologie de l'ONF..... | 83 |
| Figure 69 : Exemple de profil topographique généré..... | 83 |
| Figure 70 : Méthode de détermination de la hauteur d'une dune..... | 84 |
| Figure 71 : Méthode de détermination de la largeur d'une dune..... | 84 |
| Figure 72 : Exemple de dune formée de plusieurs crêtes..... | 85 |
| Figure 73 : Catégories de robustesse des dunes d'après la méthodologie de l'ONF..... | 85 |
| Figure 74 : Modèle de construction des polygones représentant les dunes de hauteur supérieure ou égale au NM100al + 1.2 m..... | 86 |
| Figure 75 : Exemple des polygones représentant des dunes de hauteur supérieure ou égale au NM100al, NM100al + 1.2 m et NM100al + 3 m..... | 87 |
| Figure 76 : Catégories de végétation dunaire..... | 89 |
| Figure 77 : Exemple d'aménagement en arrière-dune à dans le département de la Manche..... | 89 |
| Figure 78 : Exemple de correction de la modélisation de submersion marine..... | 92 |
| Figure 79 : Généalogie des couches d'enjeux créées..... | 106 |
| Figure 80 : Tableau croisé dynamique présentant la surface des surfaces pastorales / prairies permanentes impactée par le recul du trait de côte..... | 108 |

11. LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau 1 : Forçage radiatif total approximatif en 2100 par rapport à 1750 et concentration en CO2 correspondante Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, Le littoral dans le contexte du changement climatique, 2015..... | 13 |
| Tableau 2 : Typologie des côtes normandes et codification associée..... | 42 |
| Tableau 3 : Supports utilisés lors de la digitalisation selon les départements..... | 52 |
| Tableau 4 : Vitesses moyennes d'évolution des côtes normandes par cas d'étude de projection du trait de côte..... | 72 |
| Tableau 5 : Comparaison des deux méthodologies de modélisation de la submersion marine..... | 78 |
| Tableau 6 : Pondération des critères de classification dunaire..... | 90 |
| Tableau 7 : Résultats obtenus après pondération..... | 91 |
| Tableau 8 Principaux facteurs climatiques et leurs effets sur les systèmes côtiers (: Augmentation, ? : Incertain, R: Variation régionale) (Robert J Nicholls et al. 2007) (traduction Cerema)..... | 94 |
| Tableau 9 Source des données utilisées par type d'enjeux..... | 104 |
| Tableau 10 Typologie d'enjeux..... | 108 |
| Tableau 11 Enjeux liés à la production primaire impactés par l'évolution du trait de côte par département..... | 110 |
| Tableau 12 Enjeux liés à de la production primaire impactés par l'évolution du trait de côte..... | 111 |
| Tableau 13 Enjeux liés à la production secondaire impactés par l'évolution du trait de côte par département..... | 113 |
| Tableau 14 Enjeux liés à la production secondaire impactés par l'évolution du trait de côte..... | 113 |
| Tableau 15 Type d'enjeux liés aux réseaux de transport logistique et infrastructures impactés par l'évolution du trait de côte par département..... | 115 |
| Tableau 16 Enjeux liés aux réseaux de transport logistique et infrastructures impactés par l'évolution du trait de côte..... | 115 |
| Tableau 17 Type d'enjeux liés aux enjeux secondaires impactés par la submersion marine..... | 116 |
| Tableau 18 Enjeux liés à la production primaire impactés par la submersion marine..... | 117 |

| | |
|--|------------|
| <i>Tableau 19 Type d'enjeux liés à la production secondaire, tertiaire et résidentiel impacté par la submersion marine.....</i> | <i>117</i> |
| <i>Tableau 20 Enjeux liés à la production secondaire, tertiaire et résidentiel impacté par la submersion marine.....</i> | <i>118</i> |
| <i>Tableau 21 Type d'enjeux liés aux réseaux de transport logistique et infrastructures impactés par la submersion marine.....</i> | <i>119</i> |

12. LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Les limites de l'étude

Annexe 2 : Synthèse bibliographique des valeurs d'élévation du niveau marin

Annexe 3 : Présentation des différentes méthodes de projection du trait de côte étudiées

Annexe 4 : Hypothèses de lissage des zones de projection du trait de côte

Annexe 5 : Tableaux détaillés des enjeux impactés par l'évolution du trait de côte



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN