

ANNEXE 1 : LES LIMITES DE L'ETUDE

1. INCERTITUDE LIEE AU NIVEAU D'ELEVATION MARIN A L'HORIZON 2120

Le choix de l'horizon 2120 fait suite aux objectifs présentés dans la loi Climat et Résilience. Cependant, les valeurs d'élévation du niveau marin présentées dans les rapports du GIEC sont estimées à l'horizon 2100.

2. INCERTITUDES LIEES AU FACTEUR CLIMATOLOGIQUE

2.1 Nombre et répartition des roses de houles et des roses des vents

L'étude des facteurs météo-marins « houle » et « vent » est basée sur les deux stations de roses de houles et les sept stations de roses de vents existantes (deux à terre et cinq en mer). Avec un nombre de station de mesures plus conséquent et mieux répartis il serait possible d'affiner le découpage.

2.2 Échelle de données météo-marines

Le fait d'avoir peu de données météo-marines (à large emprise donc) oblige à dégrader fortement le découpage initial d'orientation du trait de côte pour pouvoir travailler à l'échelle du dénominateur commun. Si les données météo marines étaient plus nombreuses l'emprise de chaque donnée serait plus fine et le découpage en résultat serait spatialement plus précis.

2.3 Non prise en compte des ouvrages de protection

Les ouvrages de protection (transversal et longitudinal) ne sont pas pris en compte dans cette partie car les services ne disposaient pas de suffisamment de connaissances sur les ouvrages ayant une incidence sur le fonctionnement du littoral (houle, transit).

2.4 Disponibilité des données sur les tempêtes de référence

Seules les données tempêtes allant jusqu'en 2000 étaient disponibles. La période 2000-2020 qui a peut-être compté des tempêtes significatives et intéressantes dans le contexte du changement climatique, n'a donc pas été traitée.

De plus, les trois tempêtes de références (1979, 1990 et 1996), dont une seule à l'Ouest de la Hague, ne sont peut-être pas représentative des tempêtes avec vents de mer en Normandie.

2.5 Redécoupage par photo-interprétation des secteurs littoraux abrités

Le redécoupage selon les secteurs naturellement abrités (baie etc..) a été réalisé par photo-interprétation et non de manière mathématique. Donc la possibilité d'erreur d'interprétation est plus élevée que pour un découpage automatique. Aucun autre moyen que la photo-interprétation n'est connu pour ce type de découpage.

3. INCERTITUDES LIEES A LA DEFINITION DE LA TYPOLOGIE DES COTES NORMANDES

Le travail de découpage des secteurs homogènes des trois départements littoraux normands a été réparti en quatre zones : la Seine-Maritime, le Calvados, la Manche est et la Manche ouest.

L'ensemble du littoral normand présente une diversité de caractéristiques géomorphologiques. Par ailleurs, certaines données ne sont disponibles que sur certaines zones du littoral normand. Afin que ce travail de découpage soit homogène sur l'ensemble du littoral (tant sur la nature des caractéristiques du littoral prises en compte, que sur la précision du découpage), certaines données très précises localement et non homogènes sur l'ensemble du territoire n'ont pas pu être prises en compte.

Le littoral a été découpé en quatre zones, chacune analysée par un opérateur différent. Des biais liés à l'interprétation de la donnée peuvent alors exister.

Ces données ont leurs propres imprécisions, de même que la précision de la localisation des limites des secteurs homogènes sur le SIG est dépendante de l'échelle de travail, et de la qualité des photographies aériennes utilisées.

Enfin, certaines caractéristiques prises en compte dans le découpage des secteurs homogènes peuvent présenter des variations temporelles comme, par exemple, les dépôts de sables ou de galets sur l'estran.

4. INCERTITUDES LIEES A LA NUMERISATION DU TRAIT DE COTE RECENT

4.1 Contraintes rencontrées

Sur l'ensemble des départements, plusieurs contraintes ont été soulevées.

→ Sur certaines portions du linéaire de littoral des 3 départements, plusieurs sites « sensibles » présentaient des orthophotographies floutées (Figure 1) générant des problèmes dans la continuité spatiale.

On peut citer par exemple certains sites militaires (en bordure du port de Cherbourg, ...), mais également des centrales ou installations nucléaires (Paluel, Flamanville, ...). Ces portions n'ont donc pas été digitalisées.

On distingue nettement la portion du littoral floutée et non floutée (1/5000è).

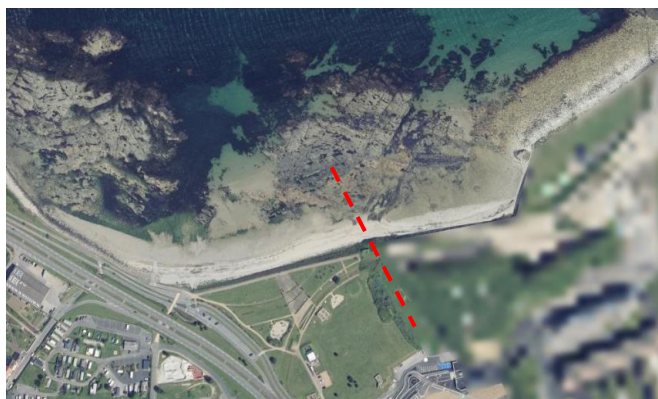


Figure 1 Exemple des abords du port de Cherbourg (au-dessus) et du site de Flamanville (à droite)

Sur certains clichés (récents comme anciens), sur certaines portions du littoral, de nombreuses ombres portées ont été observées. Celles-ci ont été contraignantes pour, non seulement le choix de l'indicateur, mais également pour assurer la continuité de celui-ci.

→ Sur les clichés anciens (1947 pour les départements du Calvados, de la Manche et de la Seine-Maritime), certains d'entre eux pouvaient être flous. Cette particularité ne facilite pas la digitalisation de certains indicateurs, notamment ceux liés à la végétation.

→ Certains clichés anciens présentaient également des décalages par rapport aux clichés récents. Ci-après, un exemple de décalage rencontré dans le Calvados (Figure 2). Les indicateurs sont très pertinents, visibles et continus sur les clichés récents et anciens, mais si on regarde les deux clichés, on se rend compte que la falaise rocheuse a « avancé » ... ce qui traduit donc un mauvais calage.

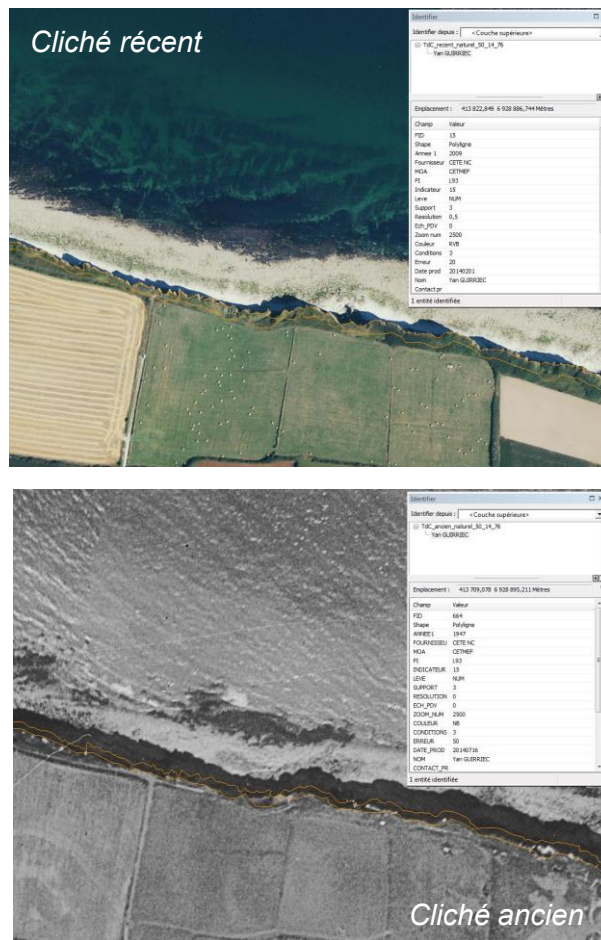


Figure 2 Illustration d'un mauvais calage dans le Calvados

4.2 Limites observées

4.2.1 Continuité spatiale

Concernant les clichés anciens, 1947 était l'année commune aux départements du Calvados, de la Manche et de la Seine-Maritime. Cette date commune a facilité une continuité spatiale. Par contre, concernant les clichés récents, ceux-ci n'étaient pas datés de la même année. Certaines incohérences à la jonction des territoires (décalages, ombres portées, indicateurs identiques non visibles de part et d'autres de la jonction, ...) ont été remarquées.

4.2.2 Interprétation du trait de côte

Le regard d'un opérateur peut être influencé par :

- localement, ses propres appréciations : choix de l'indicateur suivant son ressenti mais également suivant sa facilité à le suivre spatialement.
- son expérience sur le reste de son territoire : l'opérateur « reproduit » inconsciemment des portions littorales qu'il a déjà digitalisées

Donc, une même portion de littoral peut être digitalisée de manière différente par deux opérateurs différents.

Lors de la digitalisation du trait de côte généré dans le cadre de la « SNGITC », des vérifications croisées entre opérateurs intra et inter-laboratoires aient été menées, permettant d'assurer la comparaison de marqueurs identiques et la vérification de la cohérence des évolutions relevées.

4.2.2.1 Échelle de travail

La méthodologie « SNGITC » préconisait une échelle de travail au 1/2 500^e. Dans la pratique, cette échelle de travail a montré ces limites. En effet, de nombreux détails essentiels à une digitalisation pertinente n'étaient pas visibles à cette échelle. Concrètement, pour certaines portions de littoral, descendre à des échelles de travail au 1/1 000^e (parfois 1/800^e), a permis une meilleure pertinence dans le choix des indicateurs. Par ailleurs, des éléments essentiels (des éboulements par exemple, ou la présence d'épis, ...) n'auraient pas été décelés.

4.2.3 Limite supérieure du schorre

La limite supérieure du schorre offre, dans plusieurs secteurs, peu de contraste (clichés récents et anciens). Cet indicateur n'est pas aisé à identifier. On a donc, dans ce cas concret, une erreur non négligeable sur le positionnement de la limite.

4.2.4 Précision du levé

La précision du levé doit également être spécifiée dans le champ "Erreur" de la table attributaire : elle est en effet fonction de la qualité du support et de l'indicateur choisi. En planimétrie, la précision est généralement admise comme de l'ordre de plus ou moins 10 mètres, mais peut varier selon le type d'objet numérisé et la qualité du cliché. Les différentes valeurs d'erreur retenues sont 5, 10, 20 ou 50 mètres. Le tracé d'un environnement dunaire possède par exemple une faible précision au vu de sa modification permanente. Au contraire, le levé d'un ouvrage visible sur une orthophotographie récente entraîne une faible erreur de tracé.

5. CALCUL DES VALEURS D'EVOLUTION

5.1 Dynamique d'évolution

Les valeurs d'évolution sont calculées entre deux dates éloignées d'environ une décennie. Cela a pour conséquence de lisser les effets ponctuels des tempêtes sur l'évolution générale des côtes d'accumulation et la variabilité interannuelle du trait de côte. Les dynamiques d'évolution du trait de côte au sein de la période observée ne sont donc pas étudiées et les potentiels changements récents de dynamique ne peuvent pas être bien restitués.

5.2 Mobilité du trait de côte

La valeur des taux obtenus est représentative de la mobilité sur une portion de 50 m. Dans certains cas, comme celui des falaises, le calcul d'une évolution peut être lié à un éboulement ponctuel qui n'a pas eu lieu sur l'ensemble de la falaise.

5.3 Extrémités des traits de côte

Aux extrémités des traits de côte tracés, il arrive que l'évolution ne puisse pas être mesurée. En effet, dans certains cas, les traits de côte ne se croisent pas et n'intersectent pas avec les limites du casier ; aucun polygone n'est alors généré.

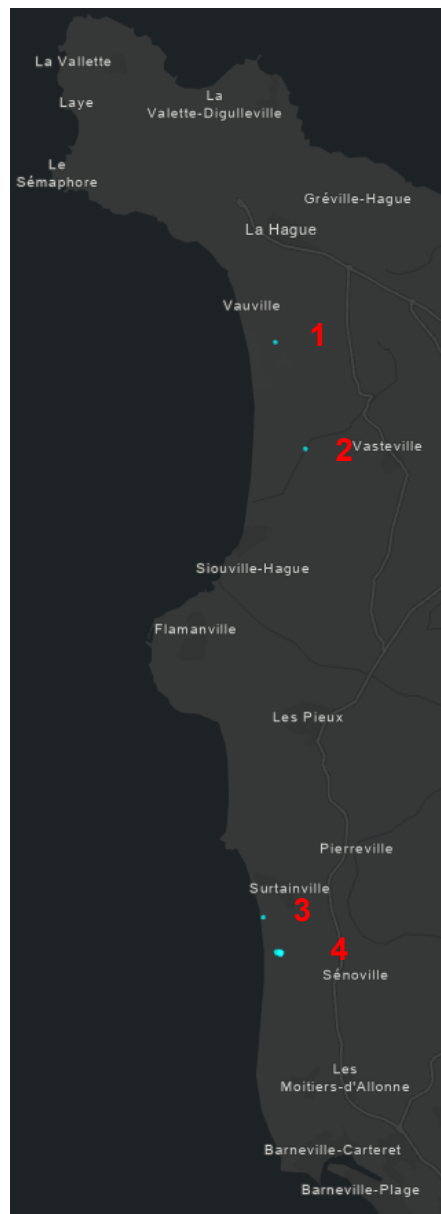
6. METHODE DE PROJECTION DU TRAIT DE COTE

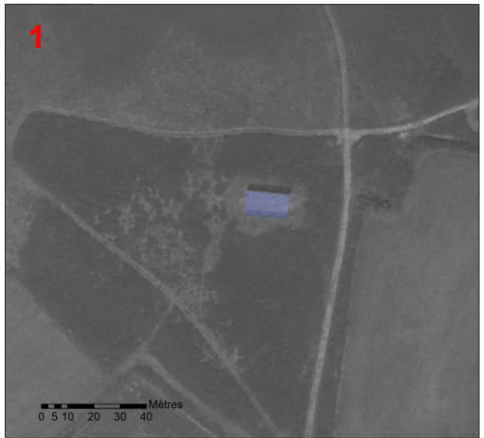
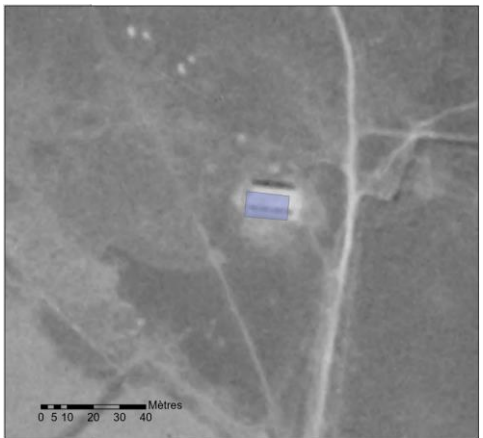

6.1 Incertitudes liées à la qualité et à la géométrie des clichés anciens

Les traits de côte anciens ont été tracés par photo-interprétation. Comme toutes études de photo-interprétation, des limites liées aux incertitude issue du positionnement des traits de côtes sur des clichés anciens sont à prendre en compte¹.

Afin d'illustrer ces incertitudes, la position des orthophotographies de 1947, 1982 et 2019 sont comparées. Pour cela des points particuliers (bâtiments, champs, intersection...) présents sur les trois périodes sont déterminés et leurs positions sont comparées.

¹ Hédou *et al.*, « Élaboration de l'indicateur national de l'érosion côtière ».



1982	1947	2019
		
<p>Evolution moyenne du trait de côte : - 0,5m/an</p>	<p>Décalage : 3m</p>	<p>Le bâtiment a été détruit</p>

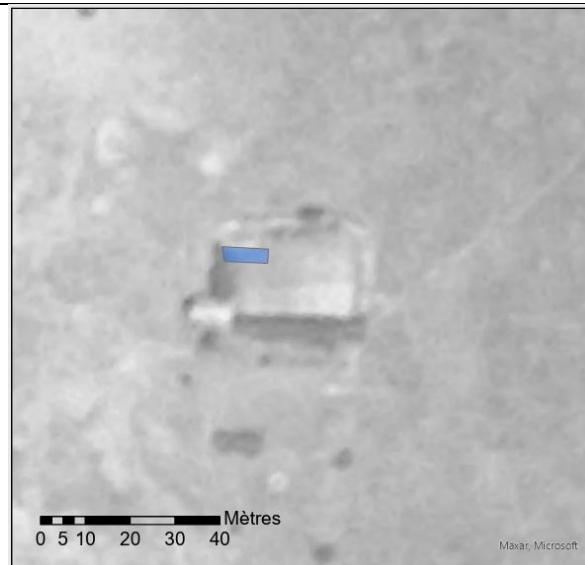


1982



Evolution du trait de côte : -1,52m/an




1947



Décalage : 14m

2019



1982	1947	2019
		
Evolution moyenne du trait de côte : -1,06m/an	Décalage : 30m	

D'après les exemples ci-dessus, deux observations peuvent être réalisées :

- Les orthophotographies de 1947 semblent être décalées par rapport à celles de 1982,
- La distance de décalage varie, pouvant aller de 3 m à 42 m,

6.2 Incertitudes liées au fonctionnement futur du littoral

Le fonctionnement futur du littoral ainsi que les conséquences que le changement climatique aura sur celui-ci restent encore difficiles à prévoir. En effet, comme rédigé dans la synthèse bibliographique, « avec cette variation du niveau marin (décimètres à mètre), la réponse du système côtier reste difficile à évaluer². 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 (Cerema 2019). »

6.3 Incertitudes liées à l'interprétation lors du tracé du trait de côte au niveau des falaises

Comme vu dans la partie Interprétation du trait de côte, le regard d'un opérateur peut être influencé par plusieurs facteurs ce qui a pour conséquences qu'une même portion de littoral peut être digitalisée de manière différente par deux opérateurs différents.

Ce point peut notamment être observé au niveau des côtes rocheuses du Calvados (Figure 3). Sur la figure ci-dessous, il est possible d'observer :

- entre 1947 et 1977 le trait de côte a reculé
- de 1977 à 1992, le trait de côte n'a pas évolué,
- de 1992 à 2001 le trait de côte a de nouveau reculé
- de 2001 à 2010 le trait de côte a avancé

Or les côtes rocheuses ne peuvent pas être en accrétion. La position des traits de côte montre aussi une accrétion de 1992 à 2010 et 2019. Ces « périodes d'accrétion » peuvent seulement être expliquées par une différence entre les opérateurs dans la manière de digitaliser les traits de côte.

C'est en partie à cause de ces erreurs que les trait de côtes intermédiaires ne sont pas pris en compte dans la méthode de projection des côtes à falaises / rocheuses.

² Le Cozannet *et al.*, « Exploring the Relation between Sea Level Rise and Shoreline Erosion Using Sea Level Reconstructions », 3 janvier 2013.



Figure 3 Exemple d'erreurs de digitalisation des traits de côte au niveau des falaises du Calvados

6.4 Modélisation qui ne présage pas du réel fonctionnement de la côte

L'ensemble de ce document a été réalisé avec le plus grand sérieux scientifique en posant systématiquement les hypothèses, les résultats et bien sûr les limites des choix méthodologiques et des données en entrée.

Les résultats des travaux s'appuient sur de la modélisation du trait de côte avec des projections à divers horizons. Il convient ici d'indiquer ou de rappeler que ces modélisations sont à traiter avec précaution car elles ne reflètent pas la réalité de terrain et du fonctionnement de la nature. Les travaux sont rigoureux mais à ce stade de la connaissance, il n'est pas possible d'identifier avec certitude les secteurs qui subiront les plus fortes érosions. Le cas de l'éboulement de la falaise de Dieppe en 2012 est révélateur avec une perte de 40 mètres en une fois non prévue dans les études.

6.5 Absence de modèle numérique de terrain

Les modèles numériques de terrain disponibles à partir des levés LIDAR notamment permettent de définir des cartes de pentes et déduire des lignes de crêtes ou zones de dépression. Disposer de levés LIDAR à grande échelle est un avantage pour permettre de

délimiter le trait de côte en se fixant sur la ligne de crête. Les avantages principaux sont que cette opération n'est pas « perturbée » par la main de l'Homme puisque le calcul de la ligne de crête est automatique et qu'elle n'est pas limitée par les obstacles (bois) qui peuvent cacher la crête.

Il était envisagé de collecter des levés LIDAR sur plusieurs années pour effectuer des déterminations du trait de côte. Malheureusement, il n'existe pas suffisamment de recul pour disposer de plusieurs LIDAR espacés de plusieurs années. Le recours à la photographie est donc actuellement encore indispensable d'autant plus si l'objectif est de comparer avec des traits de côte levés il y a plusieurs années à partir de photo-interprétation.

7. LISSAGE DES ZONES DE PROJECTIONS

7.1 Variation du nombre d'infrastructures impactées

Selon la tolérance du lissage, la forme des polygones est modifiée. Le nombre d'infrastructures intersectées par ces derniers varient alors selon le lissage appliqué. Ces variations impactent le calcul des enjeux qui est ensuite effectué.

7.2 Aspect du trait de côte lissé

Bien que le lissage améliore l'aspect des zones de projections représentant la future position du trait de côte, leur aspect reste éloignés du réel aspect du trait de côte naturel.

8. ANALYSE DE LA SUBMERSION MARINE

8.1 Limites liées au modèle utilisé

Les ZPNM mises en avant par le modèle de la DREAL Normandie représentent uniquement des zones basses. Le débordement des nappes et des rivières ainsi que l'impact des ouvrages ne sont pas pris en compte.

8.2 Limites liées à la création des ZPNM 2120

Aux abords des rivières, des zones isolées sont identifiées comme zones basses potentiellement submersibles (Figure 4). Cependant, ces zones ne seront pas submergées dans la réalité car entourées de zones supérieures au NM100al + 1.2 m.

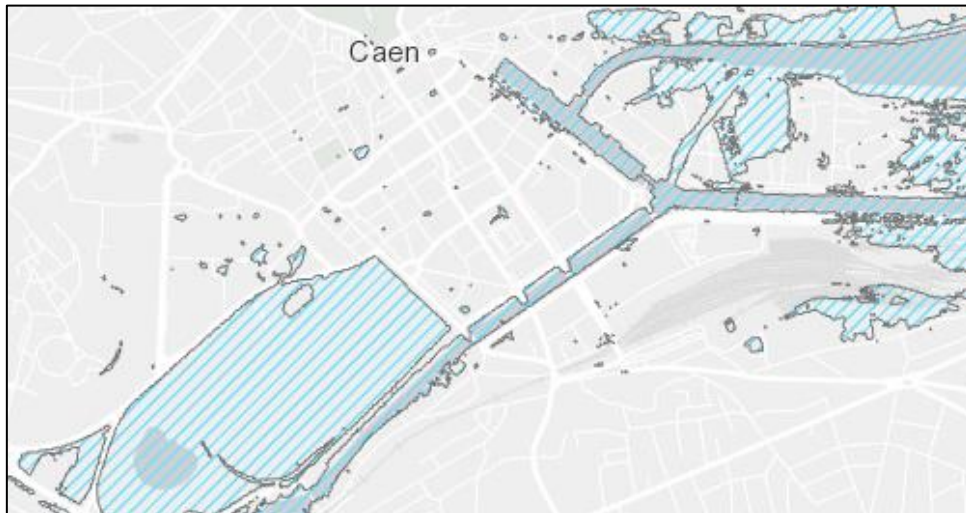


Figure 4 Zones basses isolées aux abords des rivières

9. INCERTITUDES LIEES A LA TYPOLOGIE DUNAIRE

9.1 Niveau marin de référence

Les résultats présentés dans le catalogue des niveaux extrêmes sont fournis au niveau de l'état de l'art des méthodes d'analyse statistique des niveaux extrêmes en milieu marins. Plusieurs sources d'incertitudes peuvent les impacter ³:

- la qualité des données (problèmes instrumentaux...)
- la durée des échantillons de données : l'ajout de plusieurs années de données impactent les résultats ;
- la difficulté des marégraphes à bien reproduire les événements exceptionnels (panne des appareils due aux périodes de très mauvais temps, fonctionnement des marégraphes hors de leur échelle d'étalonnage...);
- la méthodologie d'interpolation spatiale.
- le manque de capteur à l'échelle de la Normandie.

9.2 Zone de prise en compte des aménagements en arrière dune

Pour étudier la présence d'aménagement en arrière-dune, il a été décidé d'analyser, à partir du trait de côte, une zone correspondant à 125% de la largeur de la dune. Ce pourcentage a été déterminé à dire d'expert. L'analyse des zones correspondant à 110 % et 150 % de la largeur de la dune ont montré un nombre globalement similaire de bâtiments concernés :

³ SHOM, « Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique) ».

- 293 bâtiments présents sur 110 % de la largeur de la dune,
- 304 bâtiments présents sur 125 % de la largeur de la dune,
- 331 bâtiments présents sur 150 % de la largeur de la dune.

9.3 Hauteur des dunes

Afin d'estimer la vulnérabilité des dunes, plusieurs paramètres sont étudiés. Certains de ces paramètres tels que la hauteur et la longueur des dunes, sont mesurés à un temps t. Il est estimé que ces valeurs restent fixes dans le temps car il est impossible de prévoir la morphologie des dunes à des horizons futurs.

10. TRAITEMENT DES ENJEUX LIES AUX RISQUES LITTORAUX

10.1 Limites liés au traitement des bâtiments résidentiels

Les données utilisées afin de traiter l'enjeu de type « Résidentiel » proviennent de la BDTopo. Dans cette base de données est renseigné uniquement le caractère résidentiel d'un bâtiment et non le type d'habitation (secondaire, tertiaire...).

Il était aussi possible d'utiliser la BD nationale des bâtiments cependant, les logements n'ont pas été distribués aux différents bâtiments d'une même parcelle. Lors du traitement sur ArcGis Pro, cela se traduit par des multi-polygones situés à l'intersection d'une limite d'érosion : le nombre de logement est alors exagéré.

10.2 Limites liées aux données ponctuelles

Certaines données utilisées telles que les commerces et services ou les gabions sont représentés sous forme de points situés au centre de l'infrastructure. Lors du croisement avec les différentes zones de risques littoraux, il est possible que le point n'intersecte pas avec ces dernières mais que dans la réalité, les limites de l'infrastructure croisent bien les zones de risques.

ANNEXE 2 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE DES VALEURS D'ÉLEVATION DU NIVEAU MARIN

Cette synthèse a été construite sur la base de plusieurs études scientifiques et présente les différents scénarios utilisés dans la prédiction du changement climatique et l'évolution des valeurs d'élévation du niveau marin.

1. CHANGEMENT CLIMATIQUE ET VALEURS D'ÉLEVATION DU NIVEAU MARIN

1.1 Présentation des scénarios du GIEC

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 5), d'aérosols et de gaz chimiquement actifs, l'utilisation et le recouvrement des sols.

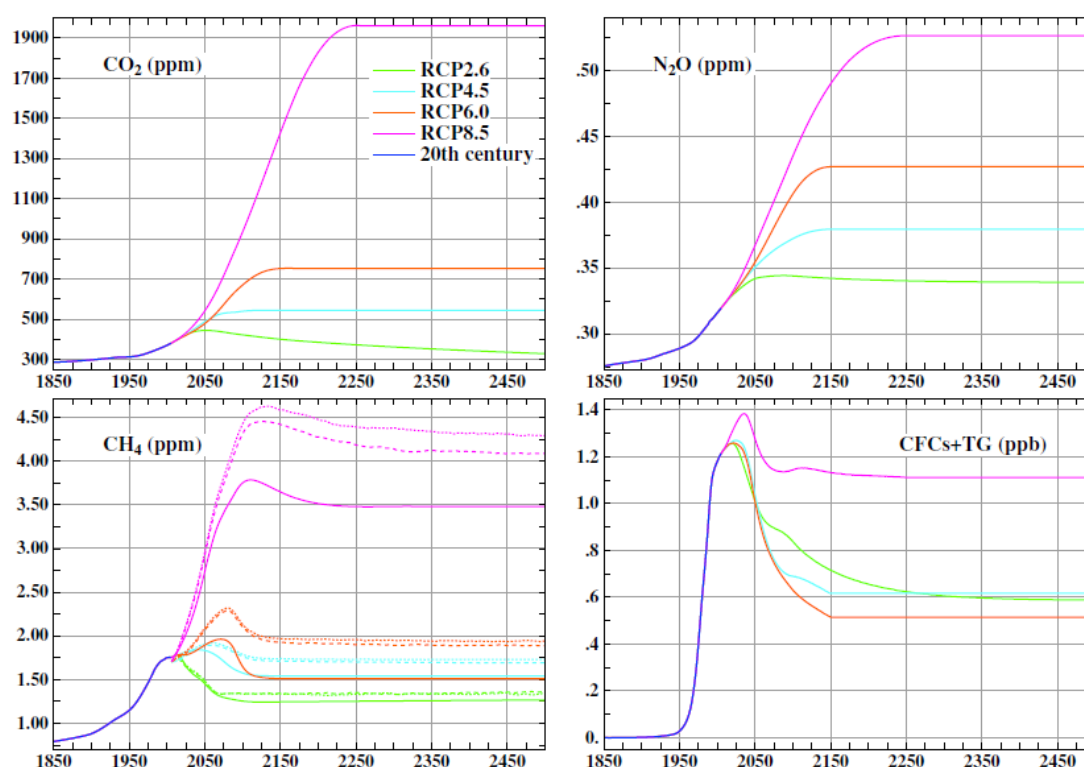


Figure 5 Ratio de gaz à effet de serre dans les scénarios RCP (NAZARENKO et al., 2015)

Ces scénarios appelés « scénarios RCP » pour « Representative Concentration Pathways », expriment la trajectoire de forçage radiatif⁴ (Figure 6)⁵ et représentent chacun des profils d'évolution possibles des concentrations de gaz à effet de serre.

Il en existe quatre, correspondant chacun à un avenir possible 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) (Figure 7)⁶.

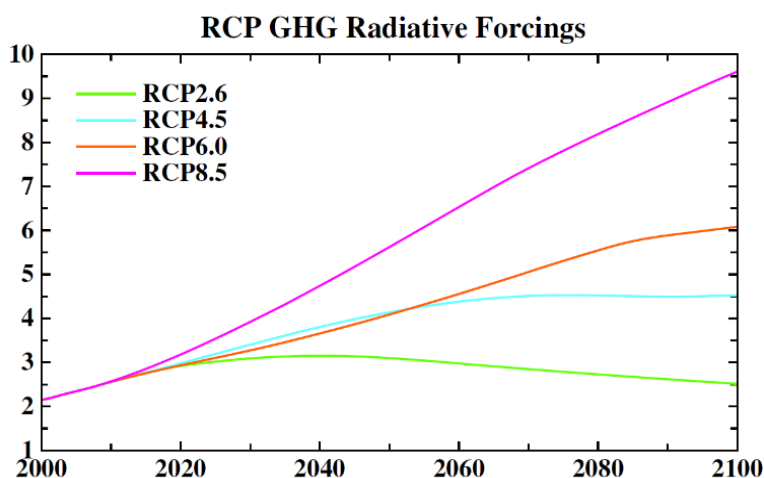


Figure 6 Forçage radiatif des scénarios RCP estimés pour une simulation du climat futur (Nazarenko et al. 2015)

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)

Figure 7 Forçage radiatif total approximatif en 2100 par rapport à 1750 et concentration en CO₂ correspondante⁷

Avant la création des scénarios RCP, d'autres scénarios ont été utilisés par le GIEC en 2001 et 2007 afin de modéliser les changements climatiques. Ces scénarios, appelés scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios), reposaient sur des modèles socio-

⁴ 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... Hansen, Sato, et Ruedy, « Radiative Forcing and Climate Response ».

⁵ IPCC, « Summary for Policymakers ».

⁶ 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 ».

⁷ Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, *Le littoral dans le contexte du changement climatique*, 2015.

économiques basés sur nos sociétés et nos futurs modes de vie Météofrance, « Les scénarios du GIEC ».. Ils sont au nombre de quatre⁸ :

- Le scénario A1 décrit un futur où la croissance économique sera très rapide,
- Le scénario A2 décrit un futur très hétérogène et autosuffisant,
- Le scénario B1 décrit un futur convergent, orienté vers une viabilité économique, sociale, et environnementale,
- Le scénario B2 est orienté vers la protection de l'environnement et l'équité sociale.

Ces scénarios sont divisés en plusieurs groupes selon différents facteurs. Au total les scénarios SRES sont au nombre de 40⁹. Au contraire des scénarios RCP, les scénarios SRES couvrent seulement une période allant jusqu'à 2100¹⁰.

En 2021, pour son sixième rapport¹¹, le GIEC a utilisé cinq nouveaux scénarios d'émissions appelés scénarios SSP pour « Shared Socioeconomic Pathways ». Ces scénarios expriment cinq récits de la réponse humaine face à la crise climatique^{12,13} :

- Le scénario SSP1 décrit un monde avec forte coopération internationale donnant la priorité au développement durable. Les deux premiers scénarios du GIEC (SSP1-1.9 et SSP1-2.6) se basent sur ce scénario.
- Le scénario SSP2 décrit un monde caractérisé par la poursuite de la tendance actuelle. Le scénario médian (SSP2-4.5) du GIEC se base sur ce scénario.
- Le scénario SSP3 décrit un monde fragmenté affecté par la compétition entre les pays, une croissance économique lente, des politiques orientés vers la sécurité de la production industrielle et peu soucieuse de l'environnement. Cela correspond au scénario SSP3-7.0 du GIEC.
- Le scénario SSP4 décrit un monde marqué par de grandes inégalités entre et dans les pays. Le GIEC n'a pas utilisé ce scénario dans son rapport.
- Le scénario SSP5 décrit un monde qui se concentre sur un développement traditionnel et rapide des pays en voie de développement (forte consommation d'énergie et de technologie émettrices de carbone). Cela correspond au dernier scénario du GIEC, le SSP5-8.5.

⁸ GIEC, « Rapport spécial du GIEC : Scénarios d'émissions. Résumé à l'intention des décideurs ».

⁹ GIEC.

¹⁰ Météofrance, « Les scénarios du GIEC ».

¹¹ IPCC, « Climate Change 2021, The Physical Science Basis, Summary for Policymakers ».

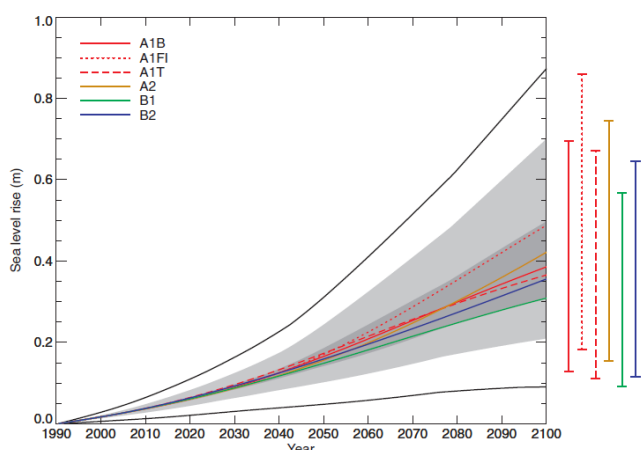
¹² Direction générale de l'énergie et du climat, « Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC ».

¹³ Espargilière, « Nouveau rapport du GIEC : cinq scénarios (plus ou moins apocalyptiques) pour la fin du siècle ».

1.2 Elévation du niveau marin

L'élévation du niveau de la mer n'est pas uniforme et varie selon les régions¹⁴. Ces variations, $\pm 30\%$ de la hausse moyenne du niveau de la mer¹⁵, 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 océanique¹⁶ et la fonte des glaciers¹⁷. 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).



Folland et al., dans le Troisième Rapport d'Évaluation du GIEC, indiquent que le niveau moyen des mers risque d'augmenter de 0.09 à 0.88 m d'ici à 2100 (Figure 8) selon les scénarios SRES. Ces valeurs ont été calculées d'après des modèles de circulation générale océan-atmosphère (AOGM) modélisant les variations d'expansion thermique, de contributions de glaciers et du permafrost et des effets de dépôts sédimentaires¹⁸.

Figure 8 Niveau moyen global d'élévation de la mer de 1990 à 2100 d'après les scénarios SRES. La zone en gris foncé représente la moyenne des résultats des modèles pour l'ensemble des scénarios. La zone en gris clair représente les résultats des modèles pour l'ensemble des scénarios. La zone délimitée par les lignes noires représente l'intervalle des résultats des modèles pour les six scénarios représentés (Folland et al, 2001)

En 2007, dans le Quatrième rapport d'évaluation du GIEC (AR4) les prédictions d'élévation du niveau marin était de 0.6 m en 2100¹⁹, toujours selon les scénarios SRES. Cependant ces projections ne prennent pas en compte les variations de la dynamique des calottes glaciaires²⁰. Selon des observations et des mesures de la vitesse actuelle de glaciers au Groenland et en Antarctique, une estimation prenant en compte l'augmentation de la dynamique des glaciers prédit une élévation du niveau marin de 0.8 à 2 m d'ici 2100²¹. De nombreuses autres études ont mesuré une élévation du niveau marin supérieure à celle prédite par l'AR4, à l'aide d'une approche semi-empirique où la relation entre le niveau marin passé et la température ou le

¹⁴ 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 ».

¹⁵ IPCC, « Summary for Policymakers ».

¹⁶ Le Cozannet *et al.*, « Exploring the Relation between Sea Level Rise and Shoreline Erosion Using Sea Level Reconstructions », 3 janvier 2013.

¹⁷ IPCC, « Summary for Policymakers ».

¹⁸ Folland *et al.*, « 2001: Changes in Seal Level ».

¹⁹ Nicholls *et al.*, « Coastal Systems and Low-Lying Areas », 2007.

²⁰ Cazenave et Nicholls, « Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal zones ».

²¹ Pfeffer, Harper, et O'Neel, « Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise ».

forçage radiatif est déterminé et projeté au 21^{ème} siècle. Ces résultats varient entre une élévation du niveau marin de 0.3 à 1.80 m en 2100 (Figure 10).

Le rapport d'évaluation du GIEC de 2014 (AR5) prévoit une élévation du niveau global des mers de 0.26 à 0.82 m d'ici à 2100²². Les scénarios intermédiaires de stabilisation (RCP4.5 et RCP6.0) prévoient une élévation d'environ 0.5 m d'ici la fin du siècle, et de 0.75 m selon le scénario RCP8.5²³. Pour une projection vers un horizon plus proche, 2050, 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

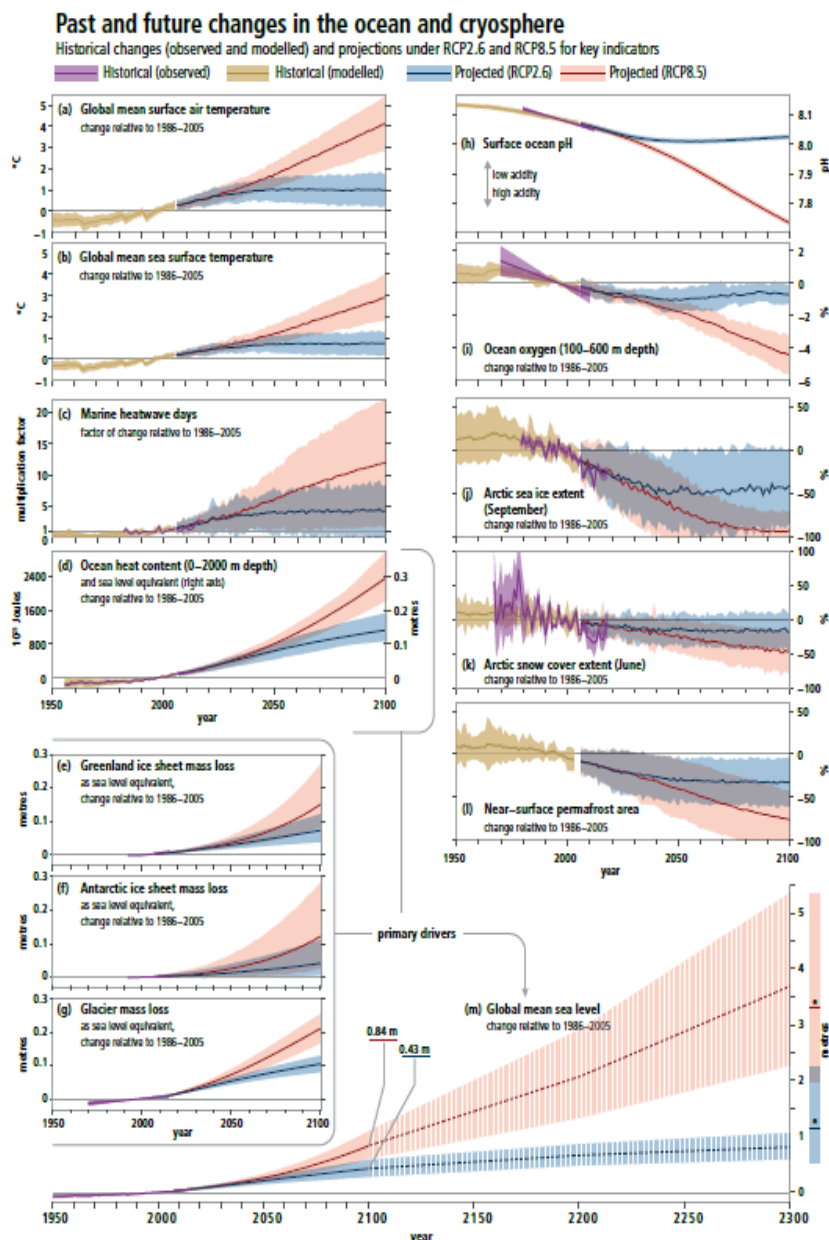


Figure 9 Estimation de l'élévation du niveau de la mer sous faibles (RCP2.6) et fortes (RCP8.5) émissions de gaz à effet de serre (IPCC 2019)

²² 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 ».

²³ Le Cozannet *et al.*, « Exploring the Relation between Sea Level Rise and Shoreline Erosion Using Sea Level Reconstructions », 3 janvier 2013.

0,17-0,31 m sous RCP2.6, 0,19-0,33 m sous RCP4.5, 0,18-0,32 m sous RCP6.0 et 0,22-0,37 m sous RCP8.5²⁴.

Le Rapport Spécial de 2019 du GIEC, indique que l'élévation du niveau marin s'est accélérée due à l'augmentation de la fonte des glaciers du Groenland et de 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 10)²⁵

Le rapport d'évaluation du GIEC de 2021 (AR6), sous les scénarios SSP, estime qu'en 2100 le niveau marin aura augmenté de 0.28 à 0.55 m sous SSP1-1.9, 0,32 à 0.62 m sous SSP 1-2.6, 0.44 à 0.76 m sous SSP2-4.5 et 0.63 à 1.01 m sous SSP5-8.5 (Figure 10)²⁶.

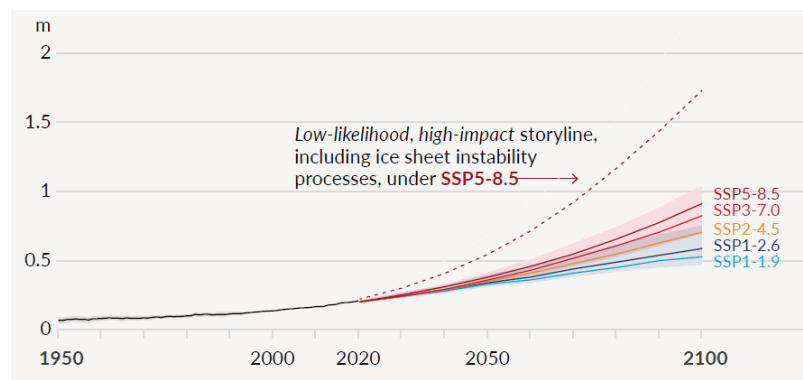


Figure 10 Estimation de l'élévation du niveau marin sous les scénarios SSP²⁷

1.3 Scénario au-delà de 2100

1.3.1 Niveau marin durant la dernière période interglaciaire

Durant la dernière période interglaciaire (LIG pour Last InterGlacial stage) il y a 125 ka, la température moyenne à la surface de la Terre était au moins 2°C supérieure à celle d'aujourd'hui²⁸. Des études prévoient une augmentation de la température de plusieurs degrés dans le futur : avec la concentration en gaz à effet de serre actuelle, la température devrait augmenter de 1.4 à 3.2°C²⁹. Cependant le réchauffement durant la LIG était causé par forçage orbital et non par forçage radiatif causé par une augmentation de gaz à effet de serre prévu dans le futur³⁰. C'est pour cela que cette période est utilisée afin de mieux comprendre la relation entre la réduction du volume des glaciers et l'élévation du niveau de la mer pour le siècle prochain, et non pas comme une analogie du climat futur³¹

²⁴ Planton *et al.*, « Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises. Le climat de la France au XXIème siècle ».

²⁵ IPCC, « Summary for Policymakers ».

²⁶ IPCC, « Climate Change 2021, The Physical Science Basis, Summary for Policymakers ».

²⁷ IPCC.

²⁸ Rohling *et al.*, « High Rates of Sea-Level Rise during the Last Interglacial Period ».

²⁹ Kopp *et al.*, « Probabilistic Assessment of Sea Level during the Last Interglacial Stage ».

³⁰ Rohling *et al.*, « High Rates of Sea-Level Rise during the Last Interglacial Period ».

³¹ Rohling *et al.*

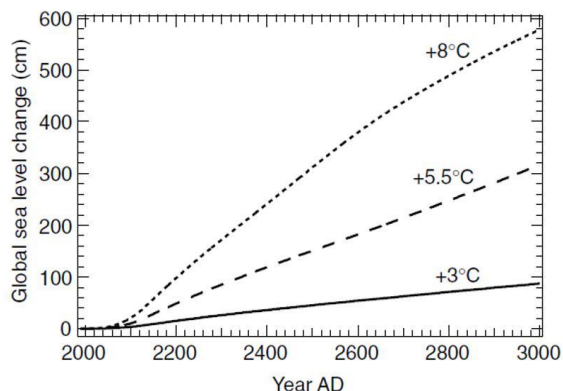
Dutton et Lambeck ont déterminé un niveau global marin de 5.5 à 9 m au-dessus du niveau marin actuel. On parle de niveau global car le niveau marin variait selon la proximité de glaciers et l'ajustement isostatique³². Plus précisément, l'étude de données de coraux, de caractéristiques d'érosion et d'interprétations de faciès ont montré qu'il y avait une probabilité de :

- 95% que le niveau marin durant la LIG ait été 6.6 m supérieur à celui d'aujourd'hui,
- 67% qu'il ait été plus de 8 m supérieur,
- 33% qu'il ait été plus de 9.4 m supérieur.³³

Cette élévation du niveau marin a notamment été causée par la fonte de glaciers. En effet, la limite basse du pic d'élévation du niveau marin lors de la LIG (+ 5.5 m) aurait nécessité la contribution de la fonte d'une partie des glaciers du Groenland et de l'Ouest de l'Antarctique³⁴, une élévation de 6.6 m aurait requis la fonte de la majorité de ces deux derniers glaciers³⁵. Enfin une hausse de 9 m aurait impliqué une contribution annexe du glacier de l'Est de l'Antarctique³⁶

Cependant, il faut aussi prendre en compte que toutes ces valeurs liées à la fonte de glaciers sont fortement liées à la fonte d'un glacier maintenant disparu : le glacier de Laurentide. Ce point permet d'affirmer que cette dernière période interglaciaire n'est pas à étudier comme un point de comparaison pour le futur³⁷.

1.3.1.1 Autres prévisions



Selon Folland et al, le niveau de la mer s'élèvera de 6 m pour une augmentation de la température de 8°C (Figure 12). Cette élévation sera notamment causée par la contribution de la fonte du glacier du Groenland³⁸. De plus selon le Cinquième Rapport d'Evaluation du GIEC, si le réchauffement moyen de la planète atteint un certain seuil, il est très probable que cela conduise à la fonte totale de ce glacier d'ici un millénaire. Cela entraînera une hausse du niveau de la mer pouvant atteindre 7 m³⁹.

Figure 11 Réponse du glacier du Groenland à 3 scénarios climatiques différents, exprimée en changement équivalent de l'élévation globale du niveau de la mer (Folland et al. 2001)

³² Dutton et Lambeck, « Ice Volume and Sea Level During the Last Interglacial ».

³³ Kopp *et al.*, « Probabilistic Assessment of Sea Level during the Last Interglacial Stage ».

³⁴ Dutton et Lambeck, « Ice Volume and Sea Level During the Last Interglacial ».

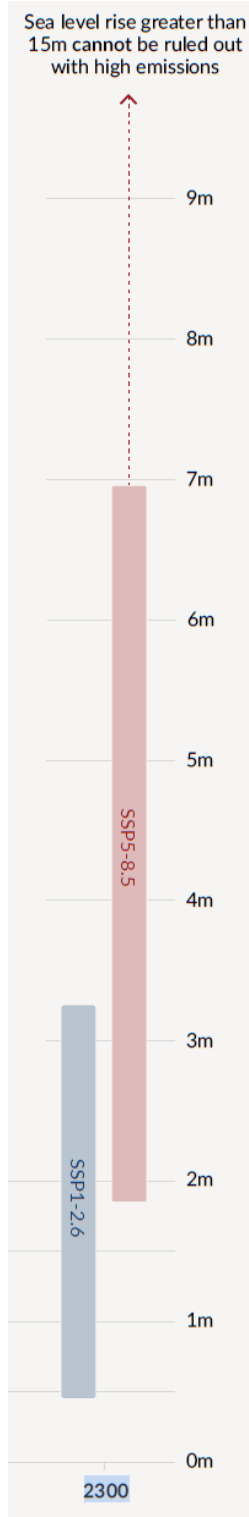
³⁵ Kopp *et al.*, « Probabilistic Assessment of Sea Level during the Last Interglacial Stage ».

³⁶ Dutton et Lambeck, « Ice Volume and Sea Level During the Last Interglacial ».

³⁷ Rohling *et al.*, « High Rates of Sea-Level Rise during the Last Interglacial Period ».

³⁸ Folland *et al.*, « 2001: Changes in Seal Level ».

³⁹ 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 ».

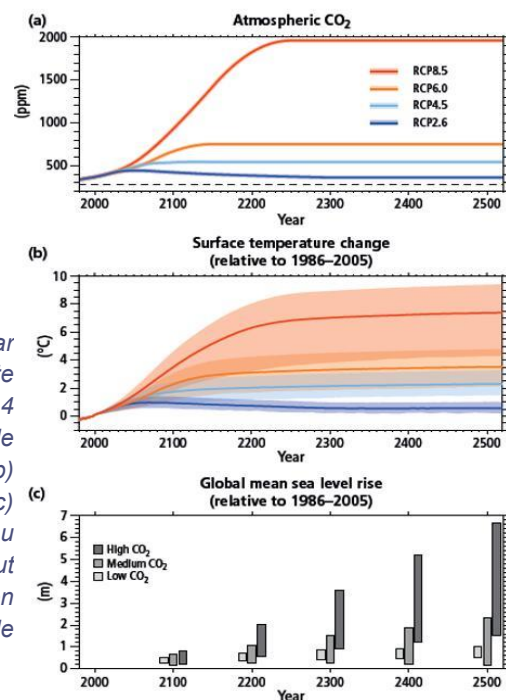


Cependant de plus récentes études ont déterminé que sous RCP8.5, le niveau de la mer augmenterait de plusieurs centimètres par an conduisant à une élévation de plusieurs mètres d'ici 2300. En effet des modèles indiquent une élévation allant de 2.3 à 5.4 m d'élévation d'ici 2300 sous RCP8.5 (Figure 10)⁴⁰. Une élévation de 5 à 6 m serait donc possible bien avant le prochain millénaire (Figure 14,c). Néanmoins les prévisions étudiées par Folland *et al.* d'une forte élévation sous une augmentation de température de 8°C restent valides selon ces modèles (Figure , b et c).

Les dernières estimations présentées dans le sixième rapport d'évaluation du GIEC à l'horizon 2300 sont mesurées seulement sous le premier scénario SSP1-2.6 et le dernier scénario SSP5-8.5. Une élévation de 0.5 à 3 m est attendue sous le SSP1-2.6 et de 2 à 7 m sous le SSP5-8.5 (Figure 13)⁴¹.

Figure 13 Estimation de l'élévation du niveau marin en 2300 sous les scénarios SSP1-2.6 et SSP5-8

Figure 14 Résultats obtenus par "Earth System Models of Intermediate Complexity" (EMICs) pour les 4 scénarios RCP. (a) Dioxyde de carbone dans l'atmosphère, (b) Température moyenne de surface, (c) Projections des variations du niveau marin selon 3 scénarios : haut (RCP8.5 et RCP6.0), moyen (RCP4.5), faible (RCP2.6) taux de CO₂ (IPCC 2014)



⁴⁰ IPCC, « Summary for Policymakers ».

⁴¹ IPCC, « Climate Change 2021, The Physical Science Basis, Summary for Policymakers ».

ANNEXE 3 : PRESENTATION DES DIFFERENTES METHODES DE PROJECTION DU TRAIT DE COTE ETUDIEES

Quatre méthodologies différentes ont été étudiées afin de permettre au comité de suivi de sélectionner une méthode adaptée à la côte normande. Ces quatre méthodes varient en fonction du choix des périodes de référence, de la méthode de calcul et naturellement du type de côte.

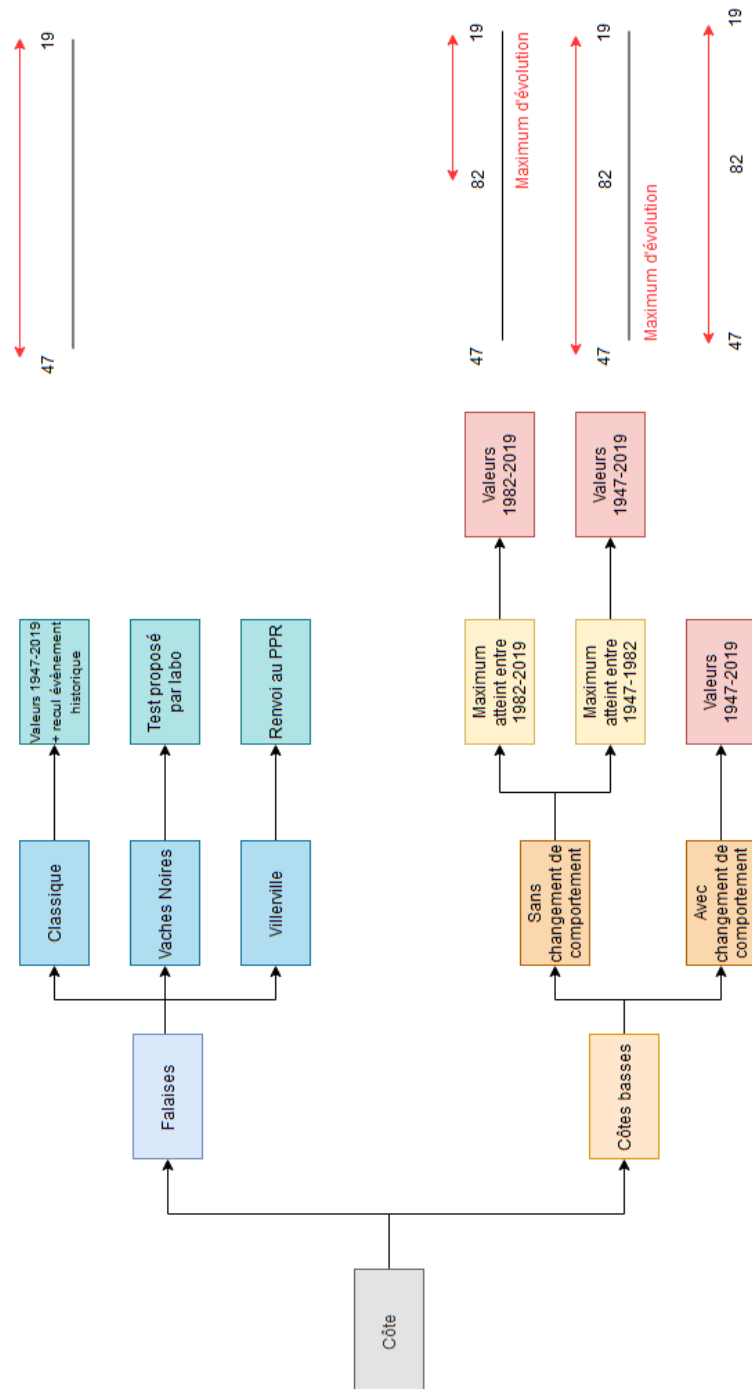


Figure 12 Diagramme représentant la première proposition de méthodologie de projection du trait de côte

La deuxième proposition concerne uniquement les côtes basses. Elle reprend la même méthodologie que la proposition précédente en y ajoutant la projection des maximums d'évolution sur l'ensemble des périodes disponibles à savoir 1947, 1977, 1982, 1992, 2001, 2010 et 2019 dans le cas des portions de côte ne présentant pas un changement de comportement, et la projection de la moyenne d'évolution sur les portions de côte présentant un changement de comportement. Cette méthodologie permet de créer un espace de divagation dans le lequel le trait de côte futur pourrait varier.

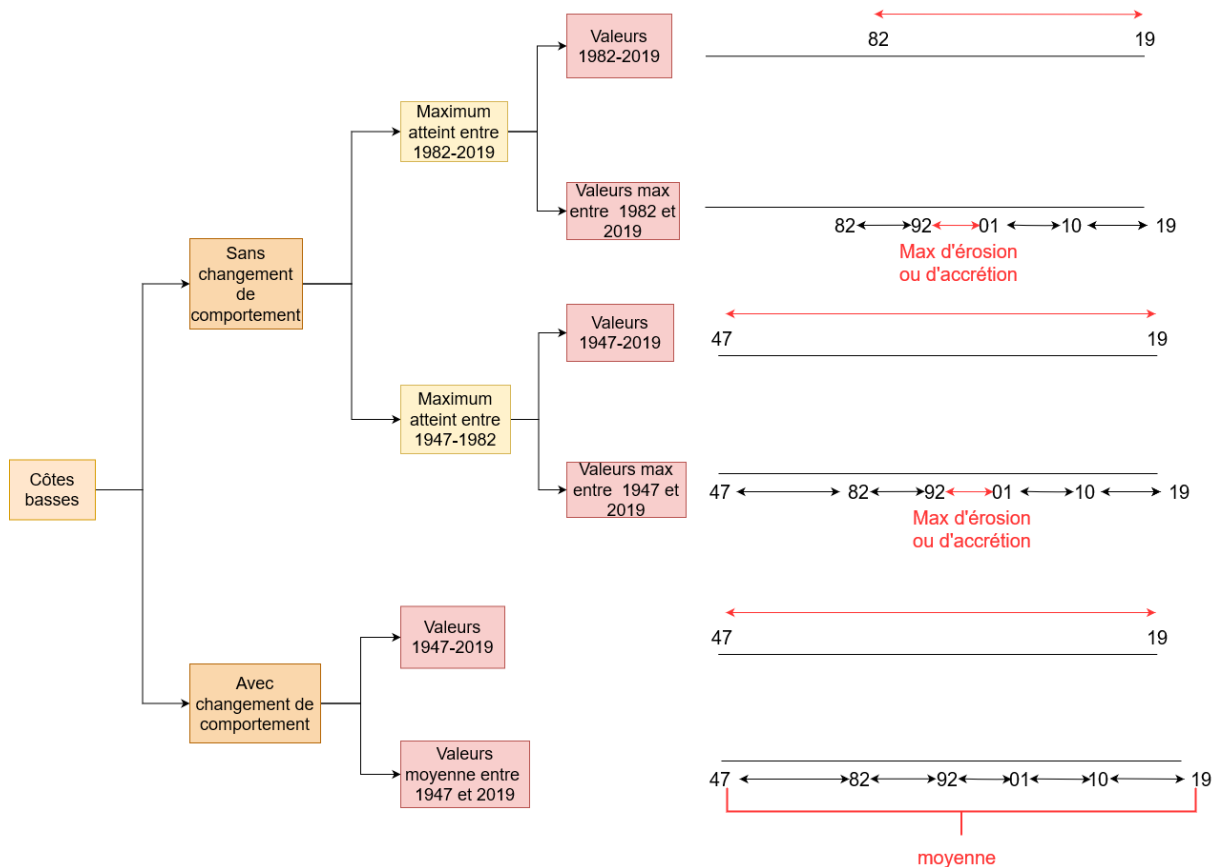


Figure 13 Diagramme représentant la deuxième proposition de méthodologie de projection du trait de côte

La troisième proposition reprend la proposition précédente seulement, l'analyse selon les périodes 1947, 1982 et 2019 est abandonnée au profit de l'analyse sur l'ensemble des périodes disponibles. La proposition d'un espace de divagation est gardée, il est cependant maintenant délimité par une moyenne d'évolution et une valeur d'évolution maximale. Dans le cas des portions de côtes impactées par des ouvrages, l'espace de divagation est délimitée par la moyenne d'évolution du trait de côte avant la construction de l'ouvrage et après.

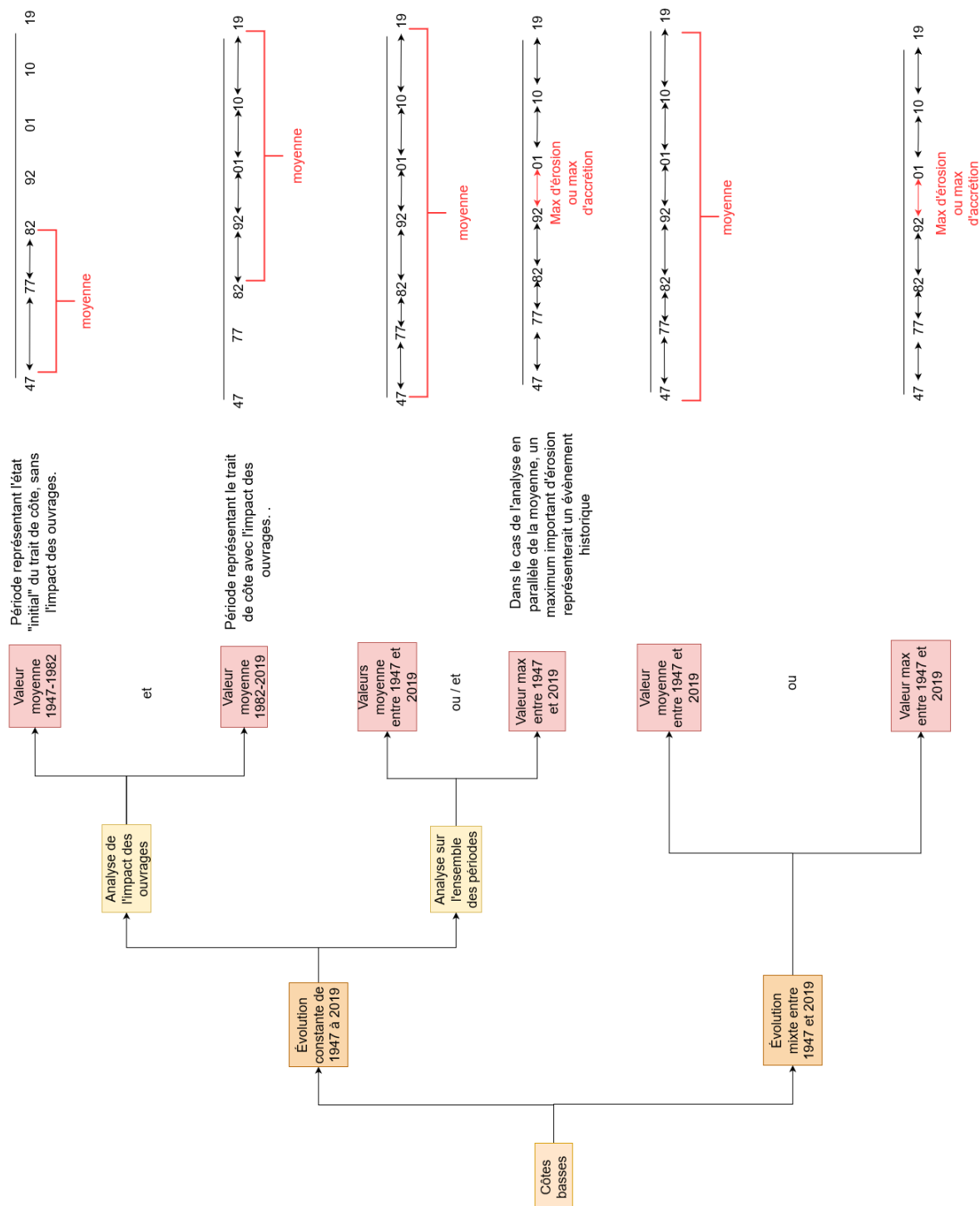
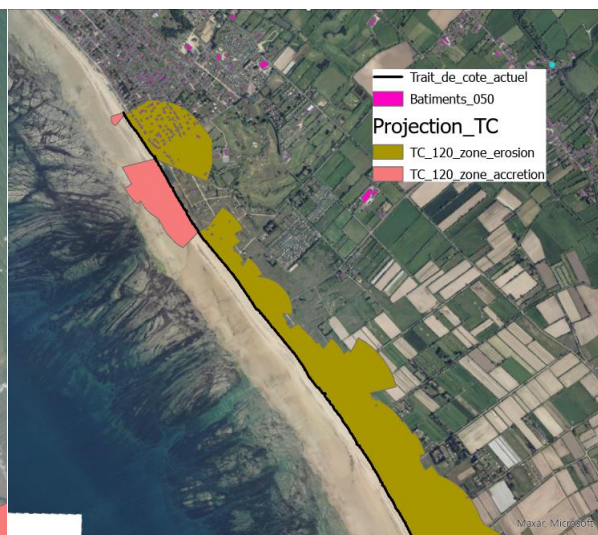
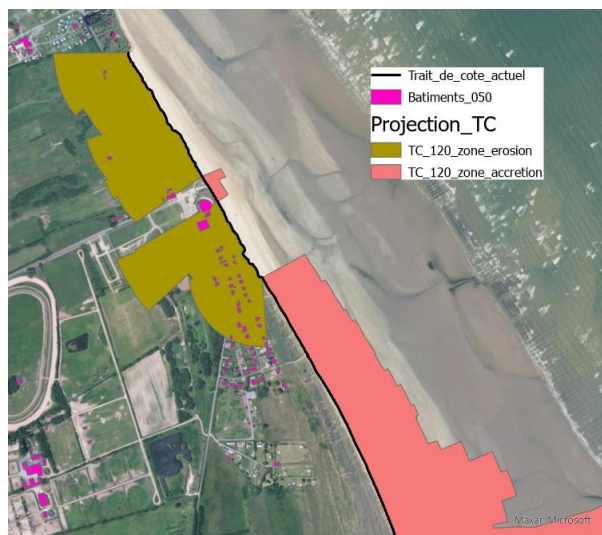
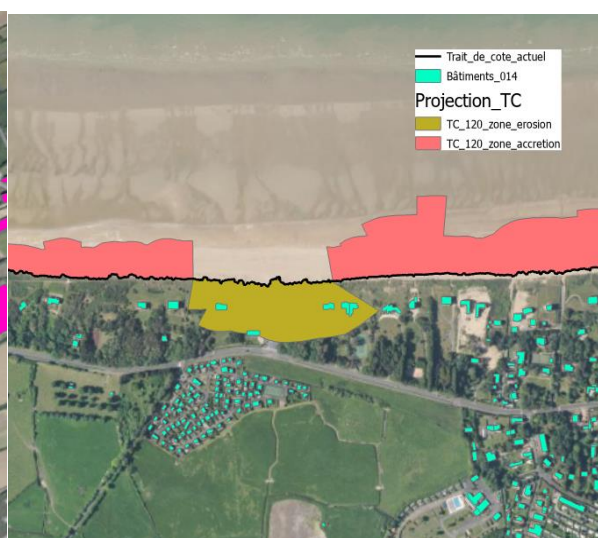
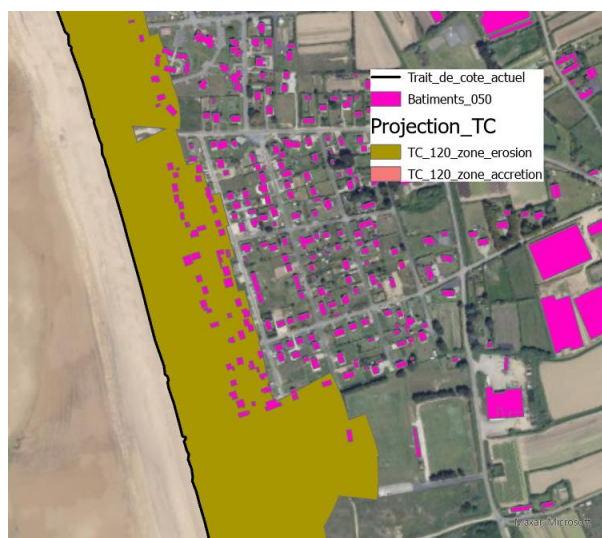


Figure 14 Diagramme représentant la troisième proposition de méthodologie de projection du trait de côte

ANNEXE 4 : HYPOTHESES DE LISSAGE DES ZONES DE PROJECTION DU TRAIT DE COTE

		Calvados	Manche
Projections brutes	Zone érosion moyenne	8	160
	Espace de divagation	473	3768

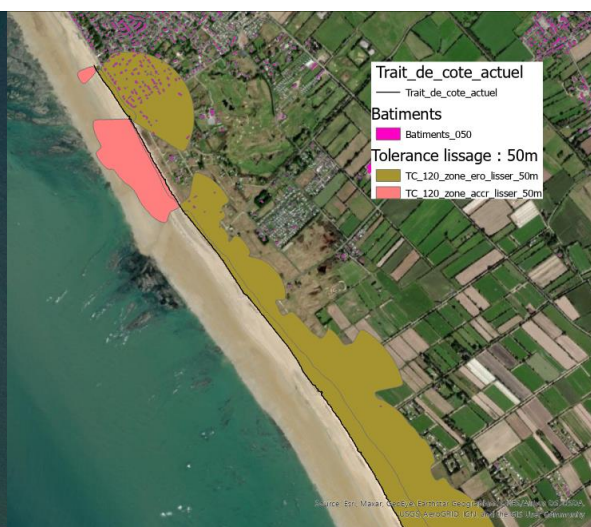
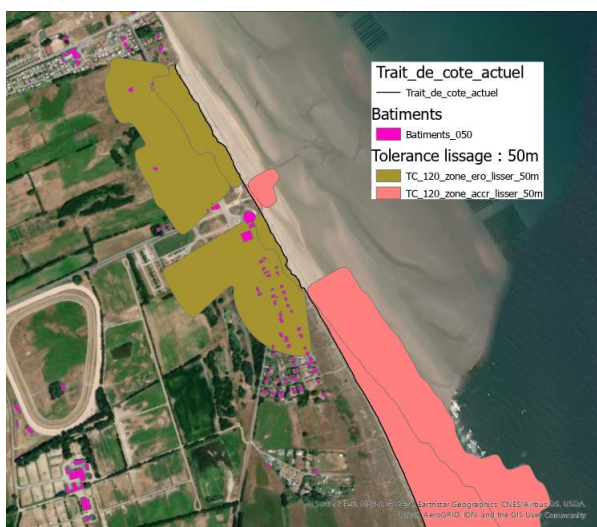
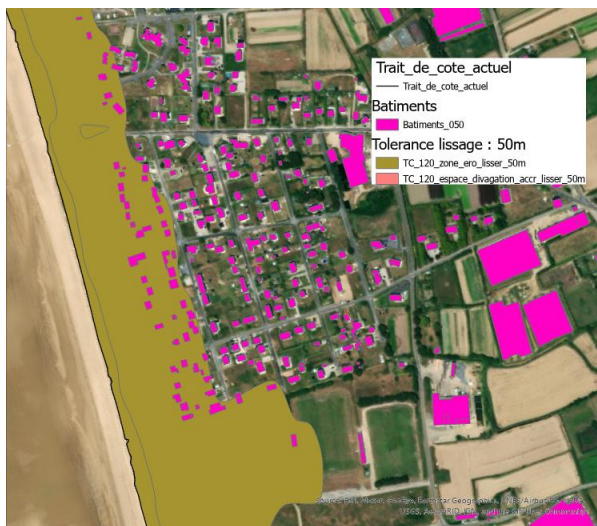


		Calvados	Manche
Tolérance de 25 m	Zone érosion moyenne	9 (+1)	173 (+13)
	Espace de divagation	476 (+3)	3790 (+22)



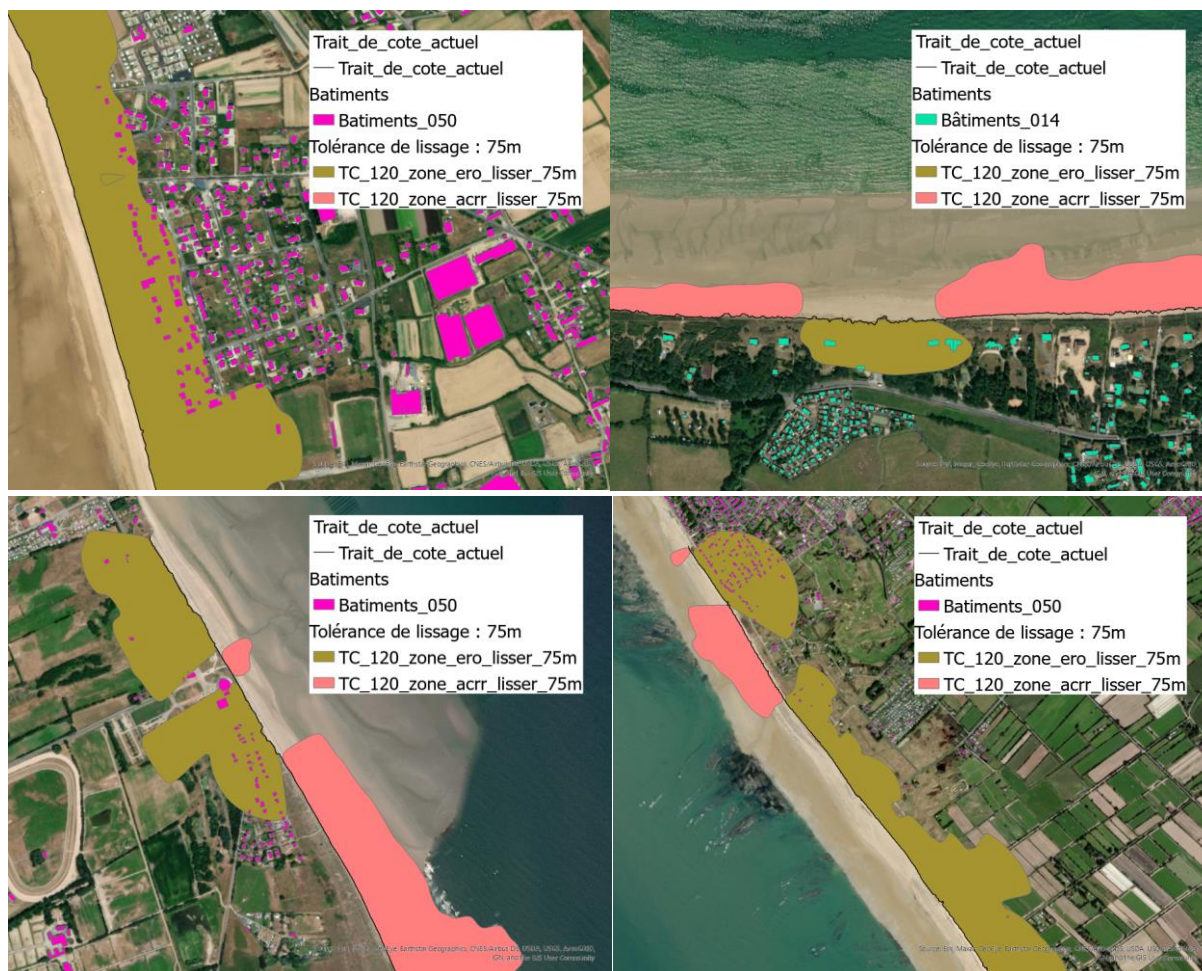
Le lissage de tolérance 25 m arrondit très légèrement les zones mais elles restent tout de même assez anguleuses.
Le nombre de bâtiments impactés augmente. C'est la tolérance de lissage présentant le plus de bâtiments impactés.

		Calvados	Manche
Tolérance de 50 m	Zone érosion moyenne	9 (+1)	176 (+16)
	Espace de divagation	474 (+1)	3785 (+17)



Le lissage de tolérance 50 m permet d'obtenir des zones légèrement arrondies, plus représentative de la réelle forme du trait de côte. A la jonction d'un changement de comportement, les zones érosion / accrétion sont légèrement éloignées. Le nombre de bâtiments impactés augmente.

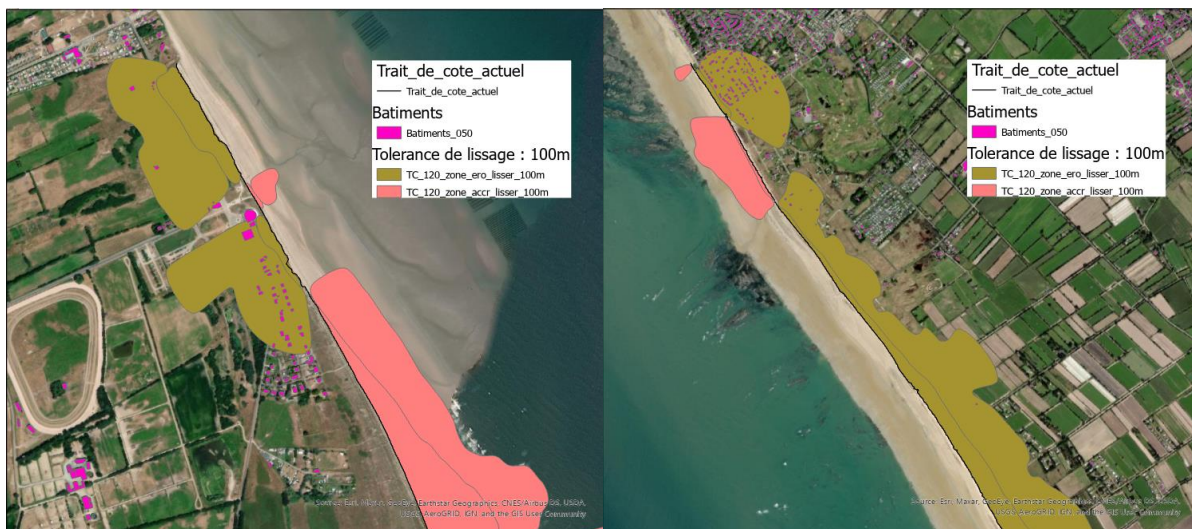
		Calvados	Manche
Tolérance de 75 m	Zone érosion moyenne	7 (-1)	170 (+10)
	Espace de divagation	476 (+3)	3775 (+7)



Le lissage de tolérance 75 m permet d'obtenir des zones légèrement plus arrondies, plus représentatives de la réelle forme du trait de côte. A la jonction d'un changement de comportement, les zones érosion / accrétion sont légèrement éloignées.

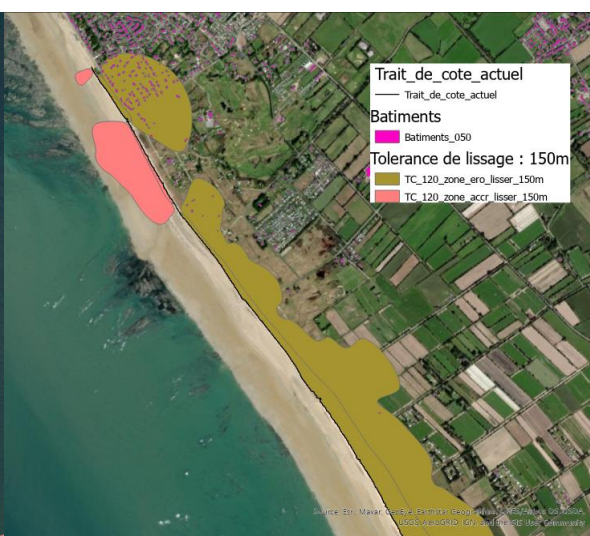
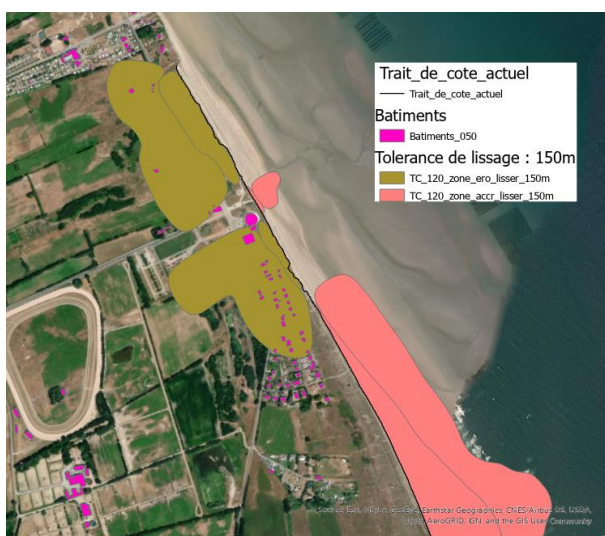
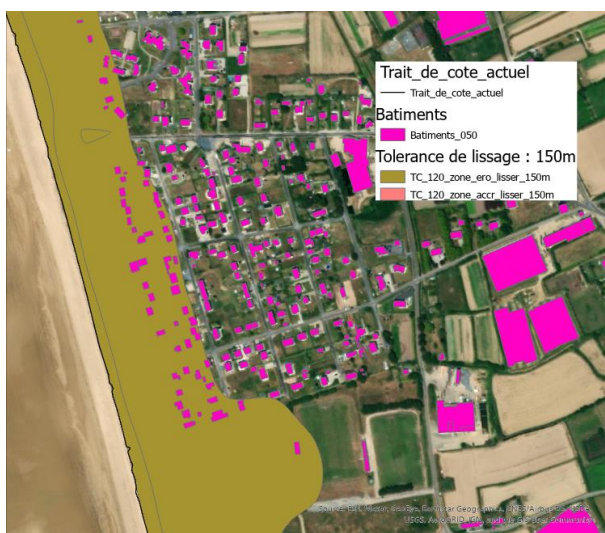
Le nombre de bâtiments impactés augmente dans la majorité des cas. Par rapport au lissage précédent. Le nombre de bâtiments impactés se rapproche de la valeur sans lissage.

		Calvados	Manche
Tolérance de 100 m	Zone érosion moyenne	8 (=)	163 (+3)
	Espace de divagation	472 (-1)	3752 (-16)



Le lissage de tolérance 100 m produit des zones arrondies A la jonction d'un changement de comportement, les zones érosion / accrétion s'éloignent encore. Le nombre de bâtiments impactés est quasiment égal au nombre sans lissage, excepté dans la Manche, dans les espaces de divagation du trait de côte.

		Calvados	Manche
Tolérance de 150 m	Zone érosion moyenne	8 (=)	160 (=)
	Espace de divagation	468 (-5)	3725 (-43)



Le lissage de tolérance 150 m produit des zones très arrondies. De plus à la jonction d'un changement de comportement (érosion/accrétion), les zones sont encore plus éloignées. Les zones d'évolutions représentent de moins en moins la réalité.

Le nombre de bâtiments impactés est quasiment égal au nombre sans lissage, excepté dans la Manche, dans les espaces de divagation du trait de côte.

		Calvados	Manche
Tolérance de 200 m	Zone érosion moyenne	7 (-1)	152 (-8)
	Espace de divagation	465 (-8)	3694 (-74)



Le lissage de tolérance 200 m produit des zones très arrondies. A la jonction d'un changement de comportement (érosion/accrétion) les zones sont très éloignées. Ce lissage ne représente plus du tout la forme réelle du trait de côte. Le nombre de bâtiments impacté est faiblement inférieur au nombre sans lissage, excepté dans la Manche dans les espaces de divagation du trait de côte.

ANNEXE 5 : TABLEAUX DETAILLES DES ENJEUX IMPACTES PAR L'EVOLUTION DU TRAIT DE COTE

	Réseau routier	Chemin ou sentier ou route empierrée (en km)	Calvados	4	1	0	7	8	3	0	7	28	5	0	8	
			Manche	32	9	1		83	25	3		201	52	5		
			Seine-Maritime			1	13			6	17			19	27	
		Route revêtue (en km)	Calvados	4	0		4	8	2	0	4	27	4	1	6	
			Manche	25	5	1		72	16	1		246	39	2		
			Seine-Maritime			3	14			9	17			20	28	
		RD, RN (en km)	Calvados	1	0		1	3	1	0	1	11	1	0	2	
			Manche	7	1	0		24	4	0		90	10	1		
			Seine-Maritime			1	3			1	3			3	5	
	Réseaux ferrés	Voie ferrée (en km)	Calvados													
			Manche									5				
			Seine-Maritime													
	Réseau de transport aérien	Piste d'aérodrome	Calvados													
			Manche					3				4				
			Seine-Maritime													
	Services de logistiques et de stockage															
	Réseau d'utilité publique : transport et distribution d'électricité, de gaz, de pétrole	Poste de transformation														
	Réseau d'utilité publique : eau et traitement de l'eau	Stockage d'eau	Calvados										1			
			Manche									5				
			Seine-Maritime													
		STEU	Calvados										1			
			Manche	1				4				9	1			
			Seine-Maritime				1			1	3			4	5	
		Point de rejet de STEU	Calvados													
Manche							2				5					
Seine-Maritime						1			1	1			1	1		
Site de production d'eau potable	Calvados															
	Manche									4	1					
	Seine-Maritime															
Réseau de collecte des eaux en lien avec la STEP																
Réseau d'utilité publique : déchets, traitement et recyclage	Déchèterie	Manche										1				
		Calvados														
	Décharge ancienne	Manche	1	1			2	2			3	1				
		Seine-Maritime				13			13	13			13	13		

