

COLLECTION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

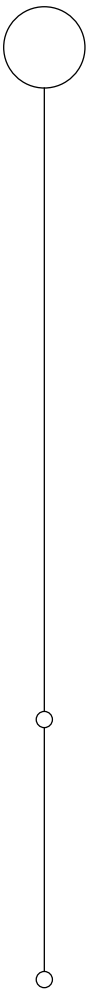
Recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES
Liberté
Égalité
Fraternité

Cerema
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Recommandations
pour l'élaboration
de la carte locale d'exposition
au recul du trait de côte



Auteurs
Document rédigé par le BRGM et le Cerema, sous le pilotage de la DGALN et de la DGPR.

Remerciements
La direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN) ainsi que la direction générale de la Prévention des Risques (DGPR) remercient le BRGM et le Cerema pour le travail de rédaction mené afin d'aboutir aux recommandations contenues dans ce document d'appui à l'élaboration des cartes locales d'exposition au recul du trait de côte.

Elles tiennent également à remercier chaleureusement le comité de pilotage pour ses avis et ses relectures (DREAL Bretagne, DREAL Nouvelle-Aquitaine, DDTM de la Manche, DDTM du Morbihan, Université Caen Normandie et Nantes Université) qui a accompagné l'élaboration du document.

Crédits iconographiques
Les photographies figurant dans cet ouvrage appartiennent respectivement au BRGM, au Cerema, ainsi qu'à Laieta30 (CC-BY-SA-4.0), UBO-Litto'Risques, la Réserve naturelle nationale de la Belle Henriette (CC BY-SA 4.0), Bruneau Landreau (Terra), Géoportail, Laurent Mignaux (Terra), Church et al. *2013, IPCC, 2019, Carson* et al. *2015, Larson* et al. *2004, Ranasinghe* et al. *2012.*

Couverture
Impact du recul du trait de côte sur un littoral français. Observatoire de la Côte Aquitaine / Com' by AVM

Édition
Cet ouvrage est une co-édition du BRGM et du Cerema. Sa conception a été assurée par Amanda Hoffbourg et Pierre Vassal (responsable du Service de la Communication, de la Médiation scientifique et des Éditions du BRGM).

Réalisation
www.enola-creation.fr

Comment citer cet ouvrage
Collectif (BRGM/Cerema). *Recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte.* Co-édition BRGM et Cerema, août 2022, 95 p. ISBN : 978-2-7159-2791-9 et 978-2-37180-566-8

ISBN : 978-2-7159-2791-9
BRGM éditions, août 2022
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 Orléans Cedex 2, France

ISBN : 978 -2-37180-566-8
Éditions du Cerema, août 2022
Cité des mobilités
25 avenue François Mitterrand, CS92803
69674 Bron Cedex, France

Préface

Porteurs d'une grande richesse naturelle et paysagère, les littoraux français sont très attractifs et connaissent une démographie croissante. Ils concentrent ainsi, de plus en plus d'enjeux environnementaux, sociaux et économiques dans un contexte évolutif marqué par des influences continentales, marines, atmosphériques et humaines, auxquelles s'ajoutent désormais les effets du changement climatique et notamment l'élévation du niveau moyen de la mer ainsi que l'augmentation de la fréquence et de l'amplitude des phénomènes naturels.

La connaissance et la prise en compte de l'évolution du trait de côte dans les politiques d'aménagement du littoral sont essentielles pour les collectivités afin d'anticiper l'adaptation de leur territoire à un phénomène de recul qui va s'intensifier. En effet, près de 20 % du trait de côte naturel est en recul.

Dans ce contexte, la loi Grenelle 1 du 3 août 2009 a consacré le principe d'une gestion intégrée de la mer et du littoral. "Vivre avec la mer plutôt que contre elle", tel est le changement de paradigme concrétisé par la première stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (SNGITC) adoptée par le gouvernement en 2012, actualisée en 2017, et qui est en cours de refonte.

En février 2020, le quatrième Conseil de défense écologique a entériné le renforcement du soutien de l'État en faveur de la recomposition spatiale et de la valorisation des écosystèmes par le développement de solutions fondées sur la nature ainsi que la mise en place de nouvelles mesures pour faire face à l'érosion du trait de côte.

Les dispositions relatives au trait de côte de la loi n°2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets, dite loi « Climat et résilience » tiennent compte du constat suivant : le recul du trait de côte est un phénomène naturel irréversible à l'échelle de temps humaine et qui relève d'une dynamique progressive et anticipable pour les échéances de l'aménagement du territoire et de la planification urbaine.

Ainsi, la mise en œuvre de cette politique d'anticipation et d'adaptation rend nécessaire l'élaboration d'une cartographie locale d'évolution du trait de côte et son intégration dans les documents d'urbanisme. Il revient aux communes de se déterminer sur l'opportunité de s'engager dans la démarche d'anticipation et de connaissance du phénomène de recul du trait de côte et des enjeux exposés sur leurs territoires afin de définir les actions adaptées et pertinentes à mener localement. Les hypothèses sur le recul du trait de côte retenues par les maires dans le cadre de leur document d'urbanisme seront étroitement liées aux choix opérés à l'échelle intercommunale en matière de mesures de protection ou de mesures de recomposition du territoire.

Le présent document rassemble les recommandations de l'État pour l'élaboration de cette cartographie des zones impactées à moyen et long terme dans les documents de planification territoriale des communes. Le ministère de la transition écologique s'est donc appuyé sur l'expertise technique et scientifique du BRGM et du Cerema pour mettre à la disposition des collectivités concernées ce document de recommandations pour l'élaboration des cartographies locales prévues par la loi.

L'identification des zones exposées au recul du trait de côte dans les documents d'urbanisme permet la mobilisation des outils fonciers et financiers offerts par la loi précitée. L'État soutient les communes, identifiées par décret pour leur particulière vulnérabilité, en finançant jusqu'à 80 % ces cartes locales d'exposition au recul du trait de côte.

Stéphanie DUPUY-LYON
Directrice générale
Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature

Cédric BOURILLET
Directeur Général
Direction Générale de la Prévention des Risques

Avertissement

La démarche de cartographie de deux zones d'exposition au recul du trait de côte (à l'horizon de 30 ans et à un horizon compris entre 30 et 100 ans) dans les documents d'urbanisme appelle les collectivités à bâtir un projet de territoire de long terme. Il s'agit pour cela d'avoir conscience des incertitudes inhérentes à tout exercice de prospective en matière environnementale et climatique.

En ce sens, les recommandations suivantes ont pour but de donner aux collectivités des repères méthodologiques concernant les principales questions à se poser et les tâches à réaliser successivement afin d'aboutir à une cartographie des zones exposées au recul du trait de côte.

Les recommandations de cet ouvrage n'ont pas de valeur prescriptive et peuvent être adaptées aux conditions locales quand la situation le justifie. Elles doivent être considérées comme évolutives. En effet, au terme d'une phase de bilan des premières démarches de cartographie engagées/réalisées, l'État proposera d'identifier, avec les collectivités, les recommandations susceptibles d'évoluer. Le ministère et ses établissements publics partenaires veilleront à tirer le meilleur parti des retours d'expériences des collectivités et des bureaux d'études. Ils veilleront également à prendre en compte l'amélioration des connaissances sur les phénomènes littoraux.

Des recommandations supplémentaires sont apportées, à la fin de ce document, dans une partie plus technique, sous forme de fiches, pour les collectivités qui souhaitent approfondir les connaissances sur des sujets traités dans les parties 1 à 4 où lorsque l'environnement est trop complexe pour être étudié avec les techniques courantes. Des démarches expertes sont alors recommandées pour tenir compte des spécificités des territoires.

Par ailleurs, l'utilisation des termes "liste des communes concernées par le recul du trait de côte" ou "liste des communes" renvoie à la liste des communes établie conformément à l'article L.321-15 du code de l'environnement.

Celui-ci prévoit que les communes, dont l'action en matière d'urbanisme et la politique d'aménagement doivent être adaptées aux phénomènes hydrosédimentaires entraînant l'érosion du littoral, sont identifiées dans une liste fixée par décret.

Cette liste est élaborée en tenant compte de la particulière vulnérabilité de leur territoire au recul du trait de côte, déterminée en fonction de l'état des connaissances scientifiques et de la connaissance des biens et activités exposés à ce phénomène.

Les communes ainsi identifiées sont soumises aux articles L.121-22-1 à 12 du code de l'urbanisme créés par cette même loi et traitant de l'exposition au recul du trait de côte et l'adaptation des documents d'urbanisme.

Sommaire

❶ Éléments introductifs 7
1.1 Le phénomène du recul du trait de côte 7
1.2 Une cartographie à réaliser par les collectivités 8
1.3 Organisation générale de la démarche d'étude 13

❷ Connaissance de la mobilité du littoral 16
2.1 La connaissance du fonctionnement du littoral 16
2.2 Recueil d'informations 19
2.3 La position passée du trait de côte 22
2.4 Les tendances d'évolution du trait de côte 23
2.5 Les phénomènes de reculs majeurs évènementiels du trait de côte 25
2.6 Les ouvrages et aménagements littoraux 30
2.7 Prise en compte des incertitudes 31

❸ Influence du changement climatique 33
3.1 L'élévation du niveau de la mer 33
3.2 Connaissances mobilisables sur l'élévation du niveau de la mer 35
3.3 Relations entre élévation du niveau de la mer et recul du trait de côte 35
3.4 Évolution et impacts des autres processus météo-marins 39

❹ Méthodologie pour la cartographie de la projection du trait de côte 40
4.1 Principes méthodologiques 40
4.2 Horizons temporels et échelles spatiales 41
4.3 Scénarios de projection du trait de côte 41
4.4 Projection du trait de côte - Approche « classique » 43
4.5 Projection pour évolutions non-linéaires – Approche « experte » 48
4.6 Confrontation des projections à la réalité du terrain 49
4.7 Cartographie et choix des scénarios 52
4.8 La représentation cartographique 52

❺ Usages et limites de la cartographie 54

❻ Modalités pratiques 55
6.1 La production des cartographies 55
6.2 Communiquer sa cartographie 56
6.3 Mise à jour de la cartographie 57

Pour aller plus loin, développement des approches méthodologiques 58
Fiche technique pour la partie "Éléments introductifs" 58
Fiches techniques pour la partie "Connaissance de la mobilité du littoral" 61
Fiches techniques pour la partie "Influence du changement climatique" 73
Fiche technique pour la partie "Méthodologie pour la cartographie de la projection du trait de côte" 90

Glossaire 91

1 Éléments introductifs

1.1 Le phénomène du recul du trait de côte

L'**érosion côtière** est une perte de matériaux sur une portion du littoral sous l'effet des phénomènes hydro-sédimentaires marins, combinée parfois à des actions continentales, ou accélérée par l'Homme. Celle-ci peut entraîner le déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine continental, c'est le **recul du trait de côte**.

Le recul du trait de côte n'est pas la seule conséquence de l'érosion côtière. En effet, l'érosion côtière peut aussi se manifester par un abaissement de l'estran* ou de la plage, et cela, même sans recul du trait de côte, notamment lorsque la position de ce dernier est figée par un ouvrage littoral.

Les pertes de volume liées à l'érosion côtière sont considérables et affectent l'ensemble du système littoral (dont les petits-fonds, l'estran, les cordons dunaires). L'estimation des volumes perdus est souvent complexe à mener et il est courant d'étudier, par défaut, le déplacement d'une simple ligne représentant le trait de côte pour appréhender l'évolution du littoral. En ce sens, le recul du trait de côte est l'un des indicateurs de l'érosion côtière.

Par ailleurs, la montée du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique est susceptible d'accélérer les phénomènes d'érosion et de favoriser un recul du trait de côte par un envahissement progressif par la mer des zones basses du littoral.

Les définitions du trait de côte ?

La définition générale du trait de côte est la **limite séparant la terre et la mer**. Dans le détail, **il existe plusieurs définitions selon les usages**. Il peut s'agir de la limite théorique atteinte par la plus haute mer astronomique (PHMA), mais elle n'est pas observable directement sur le terrain et ne fournit pas d'information sur l'évolution du littoral.

Pour accéder simplement à cette dernière information, on étudie la position successive dans le temps de **marqueurs de position du trait de côte** bien visibles sur le littoral. Différents marqueurs peuvent être observés autour de l'altitude des plus hautes mers : il s'agit souvent de la limite de végétation, du haut des falaises, du pied de dune ou encore du front de la mangrove.

Le recul du trait de côte affecte l'ensemble des milieux littoraux et n'épargne aucune région française, outre-mer compris. L'évolution passée du trait de côte sur au moins 50 ans, montre que près de 900 km de côte sont observées en recul et que ce recul concerne majoritairement les côtes basses sableuses (680 km) sur l'emprise étudiée (hors secteurs portuaires et estuaires).

La conséquence du recul du trait de côte est la disparition, souvent définitive (à l'échelle humaine), des terrains et des enjeux situés à proximité au bord de mer.

Une étude du Cerema (2019) sur l'évaluation prospective des enjeux affectés par le recul du trait de côte tente de fournir les premiers ordres de grandeurs des enjeux potentiellement impactés en France. Selon plusieurs scénarios, le nombre de logements (maison et appartement) possiblement atteints par le recul du littoral en 2100 serait compris entre environ 5 000 et 50 000 en métropole et dans les DROM, pour une valeur immobilière estimée entre 0,8 et 8 milliards d'euros (estimation à enjeux et à valeurs constants). Bien d'autres enjeux sont aussi menacés comme les activités économiques ou les infrastructures de transport.

**Les termes en bleu à leur première apparition dans le document sont définis au glossaire.*



***Figure 1 : Bâtiment détruit en raison du recul d'une falaise**. Cerema*

Pour aller plus loin, la fiche n°1.1 détaille les origines anciennes du phénomène d'érosion, en lien avec les caractéristiques géologiques et géomorphologiques du littoral.

1.2 Une cartographie à réaliser par les collectivités

a. Contexte réglementaire pour l'élaboration de la carte locale

La loi dite « Climat et résilience[1] », adoptée le 22 août 2021, introduit l'établissement d'une **carte locale d'exposition au recul du trait de côte** sur le territoire des communes devant ou souhaitant adapter leur stratégie locale d'aménagement au recul du trait de côte[2]. La production de cette carte locale est obligatoire pour les communes listées « dont le territoire n'est pas couvert, à la date d'entrée en vigueur de la liste, par un plan de prévention des risques littoraux (PPRL) prescrit ou approuvé comportant des dispositions relatives au recul du trait de côte ».

1 – Loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets.
2 – Communes incluses dans la liste établie en application de l'article L. 321-15 du Code de l'environnement.

Cette cartographie – et l'intégration de ces zonages dans les documents d'urbanisme – est en revanche facultative pour les communes couvertes par ce type de PPRL, qu'il soit prescrit ou approuvé. Les communes choisissant de ne pas réaliser ni d'intégrer cette cartographie dans leur document d'urbanisme ne pourront pas bénéficier des nouveaux outils qu'offre la loi Climat et Résilience pour adapter leur aménagement littoral au changement climatique et au recul du trait de côte. Les dispositions relatives à l'érosion contenues dans le PPRL continueront de s'appliquer.

L'autorité compétente en matière de document local d'urbanisme (commune ou EPCI) est chargée d'établir la carte locale (art. L121-22-1 du Code de l'urbanisme).

Dans les communes où s'applique la carte locale d'exposition au recul du trait de côte, le document graphique du document local d'urbanisme doit **délimiter sur le territoire de ces communes la zone exposée au recul du trait de côte à l'horizon 30 ans et celle exposée au recul du trait de côte à un horizon compris entre 30 et 100 ans** (art. L. 121-22-2 du Code de l'urbanisme).

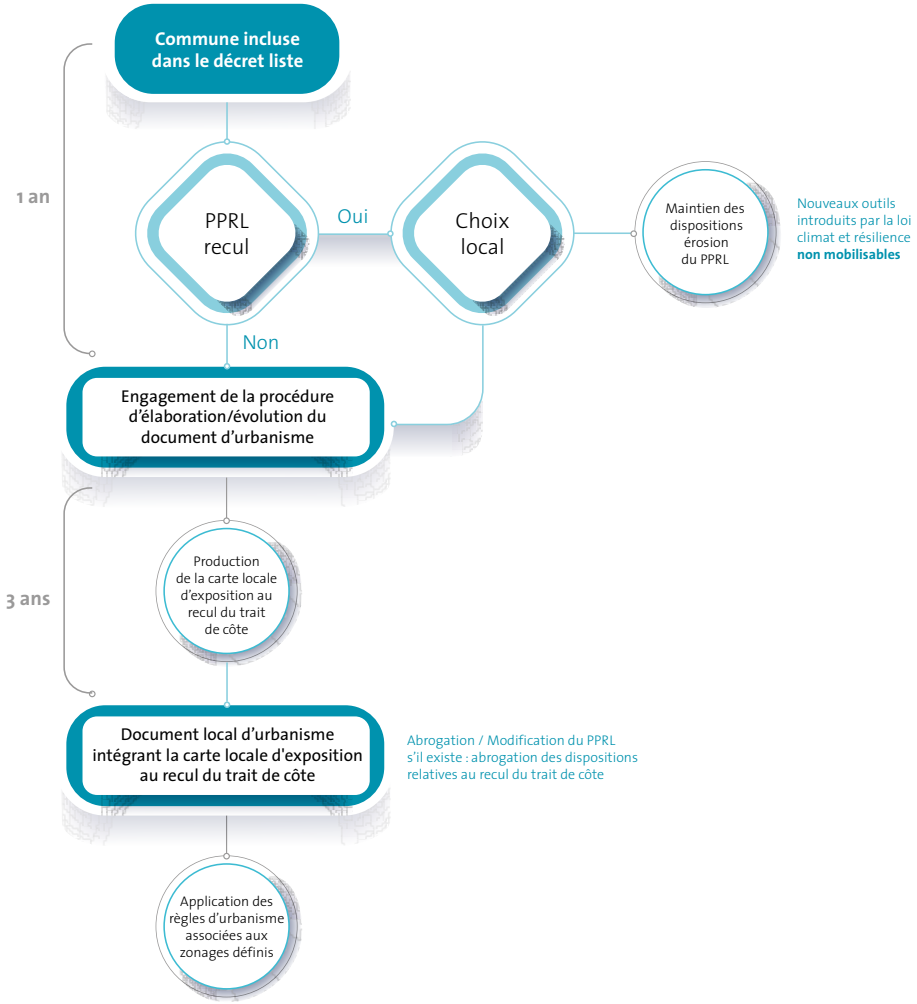


Figure 2 : Cadre général.

Les éléments techniques ayant prévalu à la délimitation de ces deux zones doivent être **justifiés**. Le rapport de présentation du plan local d'urbanisme (ou du document en tenant lieu) comprend ainsi **une synthèse des études techniques** prises en compte. Une **synthèse des actions de lutte contre l'érosion côtière** et des **actions issues des stratégies locales** de gestion intégrée du trait de côte mises en œuvre par les collectivités territorialement compétentes est également à fournir si ces actions ont été prises en compte pour procéder à cette délimitation (art. L. 121-22-2 du Code de l'urbanisme).

Les autorités compétentes en matière de document local d'urbanisme doivent **engager la procédure d'évolution dudit document d'urbanisme** (ou lancer une procédure d'élaboration d'un document d'urbanisme) au plus tard un an après la publication du décret "liste des communes".

Le document local d'urbanisme intégrant la carte locale d'exposition au recul du trait de côte doit **entrer en vigueur à l'expiration d'un délai de trois ans** à compter de l'engagement de la procédure d'évolution ou d'élaboration, sauf lorsque le territoire est couvert par un PPRL (approuvé à cette échéance) comportant des dispositions relatives au recul du trait de côte (art. L. 121-22-3 du Code de l'urbanisme).

La carte locale délimitant respectivement les zones exposées au recul du trait de côte à l'horizon de 30 ans et à un horizon 100 ans **est intégrée au document d'urbanisme, et versée à ce titre en format dématérialisé sur le portail national de l'urbanisme**. À défaut d'intégration de la carte locale dans le document d'urbanisme dans les délais prévus, des cartes de préfiguration sont approuvées et versées elles aussi sur le portail national de l'urbanisme (art. L133-1 du Code de l'urbanisme).

b. Articulation avec les stratégies locales

Les collectivités qui disposent d'une Stratégie locale de gestion intégrée du trait de côte (SLGITC- art. L. 321-16 du Code de l'environnement) sur leur territoire peuvent s'appuyer dessus pour l'élaboration de la carte locale. Ces stratégies mettent en œuvre les principes de la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (SNGITC) et s'articulent en cohérence avec les Stratégies locales de gestion du risque inondation (SLGRI). Un document unique SLGITC-SLGRI peut être produit le cas échéant. Elles doivent aussi être compatibles avec les objectifs et règles générales du Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET) ou du Schéma d'aménagement régional (SAR) s'ils existent.

Les SLGITC doivent aussi tenir compte de la **contribution des écosystèmes côtiers** à la gestion du trait de côte (art. L. 321-17 du Code de l'environnement) et elles comportent des dispositions relatives à **l'information du public** sur le recul du trait de côte.

À l'initiative des communes vulnérables identifiées et préalablement à la mise en œuvre d'une carte locale, une **convention peut être établie entre l'État et les collectivités** concernées afin de définir la liste des moyens techniques et financiers mobilisés par chacune des parties pour accompagner les actions de gestion du trait de côte, notamment l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte (art. L. 321-16 du Code de l'environnement).

c. Les conséquences de la carte locale d'exposition

Des **mesures visant à réduire la vulnérabilité des territoires sont associées à chaque zone délimitée** dans la carte locale d'exposition au recul du trait de côte, qu'elle soit préfigurée ou approuvée et intégrée aux documents d'urbanisme des communes concernées.

Dans les espaces urbanisés de la zone exposée au recul du trait de côte à **l'horizon de 30 ans, seuls sont autorisés**, sous réserve de ne pas augmenter la capacité d'habitation des constructions, les **travaux de réfection et d'adaptation** des constructions existantes, les **extensions** des constructions existantes et les **nouvelles constructions nécessaires à des services publics ou à des activités économiques exigeant la proximité immédiate de l'eau**, à condition que les nouvelles constructions et les extensions présentent un caractère démontable (art. L. 121-22-4.-I du Code de l'urbanisme).

Dans la zone exposée à un **horizon 100 ans**, de nouvelles constructions sont possibles, mais elles devront être **démolies lorsque la sécurité des personnes ne peut plus être assurée** au-delà d'une durée de trois ans en raison du recul du trait de côte. Les **coûts de démolition et de remise en état** des terrains, assurés par le propriétaire, devront être préalablement versés à la Caisse des dépôts et consignations avant que le permis de construire puisse être délivré (art. L. 121-22-5.-I du Code de l'urbanisme).

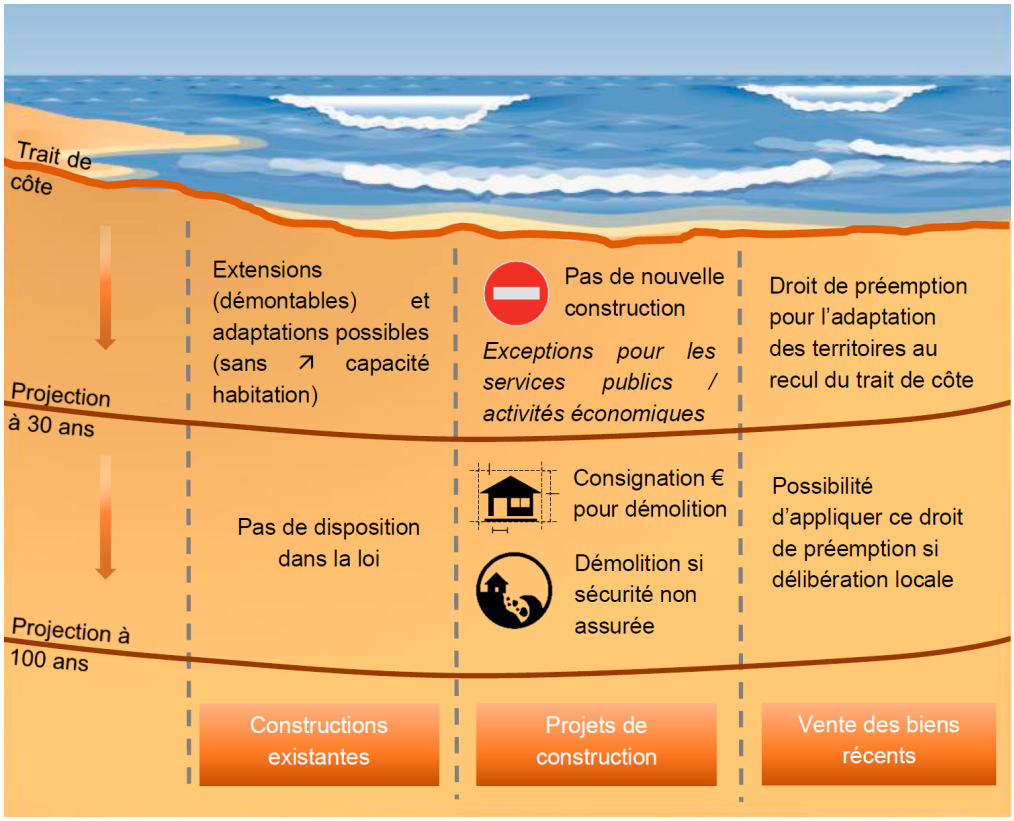


Figure 3 : Schéma conséquences de la carte locale d'exposition sur les biens. *Cerema, fond de plan d'après Laieta30, Wikimedia Commons*

Pour faciliter de futures recompositions du territoire, un « **droit de préemption** pour l'adaptation des territoires au recul du trait de côte » est institué au bénéfice de la commune, ou de l'établissement public de coopération intercommunale (EPCI) (s'il est compétent en matière d'urbanisme). Ce droit de préemption s'applique dans l'intégralité de la zone exposée au recul du trait de côte **à l'horizon 30 ans**. La commune ou l'EPCI compétent peut également instaurer ce droit de préemption, par délibération, sur tout ou partie de la zone définie sur la cartographie 30-100 ans (art. L. 219-1 du Code de l'urbanisme). **Un nouveau régime de contrat de bail réel immobilier de longue durée** permettra l'utilisation des terrains situés dans les zones exposées au recul du trait de côte (art. L. 321-18 à L. 321-33 du Code de l'environnement).

Le dispositif sur **« l'information acquéreur locataire »** (IAL) sur l'état des risques précisera également l'exposition des biens au recul du trait de côte lorsqu'ils sont situés dans les communes identifiées dans une liste fixée par décret et ayant établi une carte locale d'exposition au recul du trait de côte intégrée à leur document d'urbanisme (ou ayant adopté une carte de préfiguration d'exposition de leur territoire au trait de côte). Le moyen d'accès à cet état des risques doit figurer sur les annonces immobilières (tous supports) et doit être remis dès la première visite du bien (vente ou location) (art. L. 125-5 du Code de l'environnement).

d. Une carte locale stratégique

L'estimation des reculs du trait de côte à venir dans les prochaines décennies repose en partie sur les connaissances historiques et actuelles du fonctionnement du littoral. La complexité du littoral, où de nombreux facteurs agissent et interagissent entre eux, rend ces connaissances imparfaites, auxquelles se rajoutent les difficultés à prévoir les conséquences du changement climatique sur le régime des tempêtes, la hausse des niveaux marins ou les courants marins.

Les projections de la position du trait de côte à produire pour les prochaines décennies dans les cartes locales d'exposition comportent donc inévitablement une part d'incertitude, d'autant plus que les échéances étudiées sont éloignées dans le temps.

Les décideurs locaux sont appelés à intégrer cette problématique dans leur choix d'aménagements du territoire. D'une manière générale, les intervalles de confiance qui pèsent sur chacune des hypothèses prises dans l'ensemble de la démarche doivent être qualifiées et quantifiées si possible. Les choix posés pour la réalisation de la cartographie locale s'exercent dans le cadre de l'exercice de leur compétence en matière d'urbanisme.

Ainsi, pour l'élaboration de la cartographie locale, la commune pourra s'appuyer sur les données et choix validés dans la stratégie locale de gestion du recul du trait de côte existante. Par ailleurs, l'existence d'une stratégie locale de gestion du recul du trait de côte ouvre la possibilité aux collectivités d'associer les moyens et les financements de l'État via un conventionnement. En l'absence de stratégie locale, la commune pourra l'élaborer à partir des résultats de la cartographie locale construite sur les bases de ce document de recommandation.

1.3 Organisation générale de la démarche d'étude

Les règles régissant l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte obéissent aux dispositions des articles L. 121-22-2 et L. 121-22-6 du Code de l'urbanisme. **Ils précisent les deux horizons temporels** (30 ans et 100 ans) à respecter **et la nécessité de synthétiser des études techniques et les actions** de lutte contre l'érosion et issues des SLGITC prises en compte.

Afin d'accompagner les collectivités qui auront à mettre en œuvre une carte locale d'exposition au recul du trait de côte sur leur territoire, la Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN) et la Direction générale de la prévention des risques (DGPR), deux administrations centrales du ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT), ont confié au BRGM et au Cerema, deux établissements publics, la rédaction **de recommandations** pour cartographier les évolutions futures de la position du trait de côte dans le cadre des nouvelles dispositions apportées par la loi « Climat et résilience ».

Les recommandations de ce document s'inspirent de l'expérience acquise lors de l'élaboration des PPRL intégrant des dispositions relatives au recul du trait de côte mis en œuvre par les services déconcentrés de l'État à partir du *Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux* (DGPR, 2014) et des études de connaissance de l'évolution du trait de côte. Elles intègrent des éléments sur la prise en compte du rôle du dérèglement climatique (et plus particulièrement l'élévation du niveau de la mer) sur le phénomène de recul du trait de côte dans l'état des connaissances scientifiques actuelles.

La portée de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte en termes d'aménagement, d'urbanisation et d'information préventive dans les secteurs cartographiés **implique la réalisation d'études techniques** justifiant le zonage. Selon le linéaire côtier, sa complexité et l'expérience de leurs services techniques, les collectivités pourront réaliser tout ou partie des études ou faire le choix de les confier à des bureaux d'études (des conseils sont fournis à la fin de ce document pour la commande et le suivi de telles prestations). Pour faciliter le suivi des études et les échanges entre la collectivité et un éventuel prestataire, certaines collectivités pourront s'entourer d'une assistance à maîtrise d'ouvrage.

Ces études techniques seront grandement facilitées si les territoires à cartographier ont déjà fait l'objet d'études sur la mobilité du littoral et/ou de suivis réguliers du trait de côte. Il est ainsi dans l'intérêt des collectivités de **recueillir les études existantes,** et cela préalablement à la commande d'une éventuelle prestation d'étude. Le début de la partie 2 de ce document présente différentes sources d'informations que les collectivités pourront utilement consulter.

Parmi les éléments à recueillir, les **positions passées du trait de côte** sont indispensables à la démarche (partie 2.3). En effet, elles permettent d'**accéder aux tendances passées de l'évolution du trait de côte**, qui seront reconduites pour projeter une position future du trait de côte. Les positions passées du trait de côte, produites par des structures d'observation ou des opérateurs techniques, sont déjà disponibles sur de nombreux littoraux et seront à privilégier. Parfois, elles sont peu nombreuses : les collectivités sont alors invitées à en produire sur leur territoire. Le calcul des tendances d'évolution pourra aussi être réexploité s'il a déjà été produit dans des études existantes. Dans le cas contraire, il sera à produire (partie 2.4).

Les tendances d'évolution ne sont pas suffisantes pour élaborer la carte locale, car le trait de côte peut subir des **reculs dits évènementiels** lors de tempêtes majeures ou de mouvements de terrain

(partie 2.5). Le recueil initial des données et des études peut là aussi s'avérer très utile en fournissant des valeurs de recul constatées lors de ces évènements morphogènes et parfois même des périodes de retour de ces évènements.

La bonne connaissance des **ouvrages et aménagements littoraux** est enfin indispensable à la démarche puisqu'ils modifient l'évolution du trait de côte. Les collectivités sont invitées à les recenser, et si possible à rechercher leur date de construction, leur mode de gestion et leur finalité.

Il est désormais reconnu que le **changement climatique** va affecter durablement le littoral. L'élévation du niveau de la mer est l'une des conséquences qui pourrait accroître à l'avenir le phénomène de recul du trait de côte tel que l'on connaît aujourd'hui, ainsi que l'envahissement par la mer des zones basses du littoral. À partir des dernières publications du GIEC (les connaissances évoluent très rapidement dans ce domaine) et des outils présentés dans la partie 3.2, les collectivités ou leurs éventuels prestataires en charge de la réalisation de la cartographie locale sont invités à consulter et à recueillir les scénarios d'élévation régionaux et les études disponibles à ces échelles. Des approches existent pour prendre en compte l'élévation du niveau de la mer dans l'estimation de la position future du trait de côte et des incertitudes associées.

Le bon sens, le pragmatisme et la réalité du terrain doivent guider les collectivités pour ajuster le niveau d'attente des études à synthétiser ou à produire. Le niveau d'étude peut ainsi être adapté selon les enjeux situés à proximité du trait de côte : il est logique d'accorder plus de moyens aux secteurs sensibles qu'aux secteurs dépourvus d'enjeux humains (ou non urbanisables).

Des recommandations techniques supplémentaires sont apportées à la fin de ce document, sous forme de fiches, pour les collectivités qui souhaitent approfondir les connaissances sur des sujets traités dans les parties 1 à 4 ou lorsque l'environnement est trop complexe pour être étudié avec les techniques courantes. Des **démarches expertes** sont alors recommandées pour tenir compte des spécificités des territoires.

Les éléments de connaissance, présentés dans les parties 2 et 3, constituent les différentes « briques » qui sont à assembler pour construire des projections de la position future du trait de côte. Afin de limiter le nombre de combinaisons à étudier, il est proposé de **construire des scénarios** en choisissant et en justifiant des valeurs pour chaque paramètre (par exemple le choix du niveau d'élévation du niveau de la mer ou encore les ouvrages à maintenir).

Ce document recommande d'étudier **un scénario dit « médian »** avec des paramètres usuels et **un scénario dit « sécuritaire »** visant à détecter d'éventuels effets de seuils avec des hypothèses et des approches maximisant le recul du trait de côte. La collectivité veillera à expliquer et à justifier le scénario de projection retenu pour chaque horizon temporel.

Les choix ainsi opérés sur les paramètres permettent de calculer des distances de recul du trait de côte aux deux horizons temporels et de les représenter sur des cartes. Il convient alors d'examiner attentivement les secteurs qui pourraient disparaitre afin de s'assurer que les calculs sont cohérents avec la **réalité du terrain**. En effet, au cours du déroulement du scénario de projection, le recul du trait de côte pourrait être stoppé par un point dur (par exemple une falaise morte) ou être accentué en rencontrant une zone basse en arrière littoral (dans ce cas la mer pourrait envahir progressivement la zone basse en transformant l'environnement en une lagune).

La confrontation avec la réalité du terrain peut ainsi nécessiter l'adaptation des scénarios de projection envisagés : il s'agit ici d'une **démarche itérative**.

À l'issue de ces études, le décideur public disposera de plusieurs positions du trait de côte qui représenteront les scénarios de projection. En concertation avec l'équipe technique et scientifique qui a produit les études, **le décideur public choisira le scénario à retenir**, et de fait la position future du trait de côte associée, à intégrer à la carte locale d'exposition au recul du trait de côte. Ce choix aura des conséquences en matière d'aménagement dans le cadre de l'exercice de leur compétence en matière d'urbanisme.

Cet exercice est susceptible de mettre en évidence des points de fragilité du territoire au regard de l'évolution possible du trait de côte. Des **actions de suivi ou de gestion du trait de côte** pourront être inscrites dans les stratégies locales de gestion intégrée du trait de côte (SLGITC) afin d'en assurer la pérennité. Ces actions pourront être prises en compte lors de la mise à jour des cartes locales prévue dans la loi.

Le logigramme suivant résume cette démarche d'étude en indiquant les principales étapes à réaliser par les collectivités et en les replaçant dans le plan de ce document.

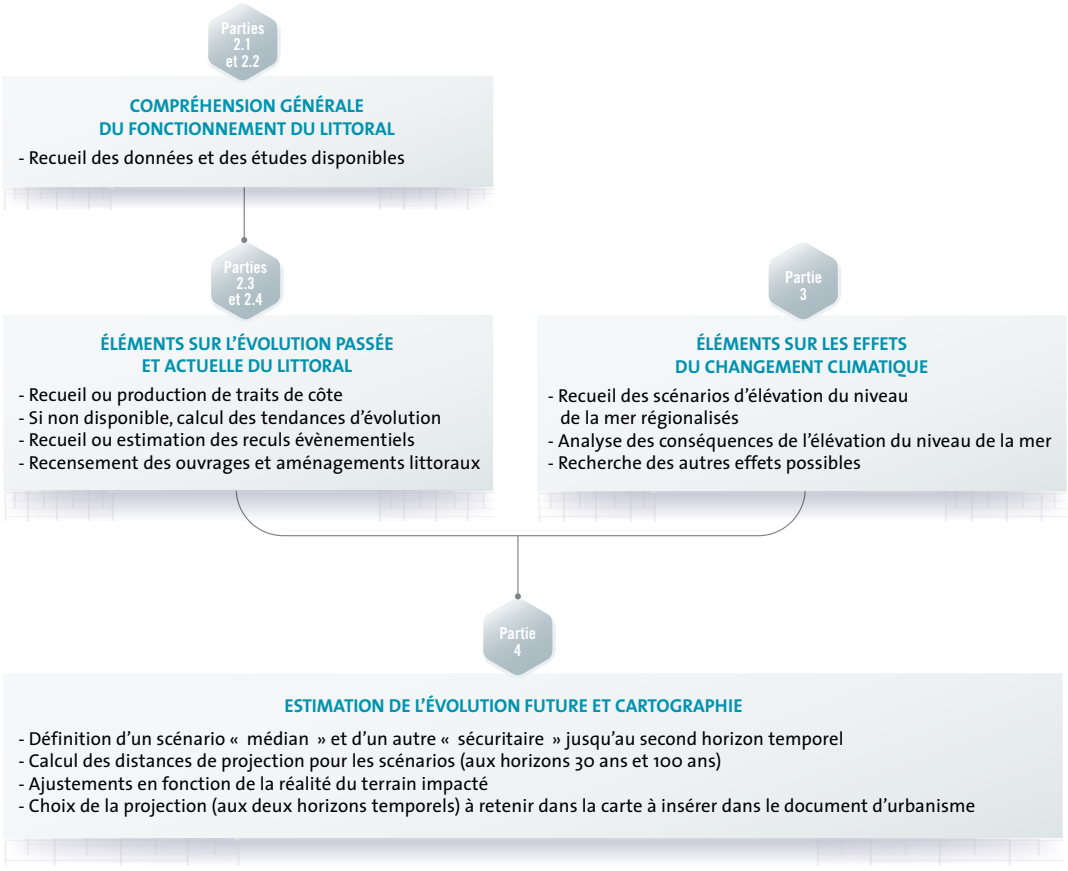


Figure 4 : Logigramme résumant l'organisation générale de la démarche d'étude.

❷ Connaissance de la mobilité du littoral

La connaissance du fonctionnement général du littoral est un prérequis pour comprendre la mobilité du trait de côte. De nombreuses études et données sont disponibles et peuvent être exploitées pour estimer les tendances d'évolutions passées du trait de côte et les reculs évènementiels. Le recueil des informations sur les ouvrages et les aménagements littoraux est également essentiel à la démarche. Toutes ces connaissances seront utiles pour être en mesure de projeter la position du trait de côte dans les prochaines décennies (partie 4 du document).

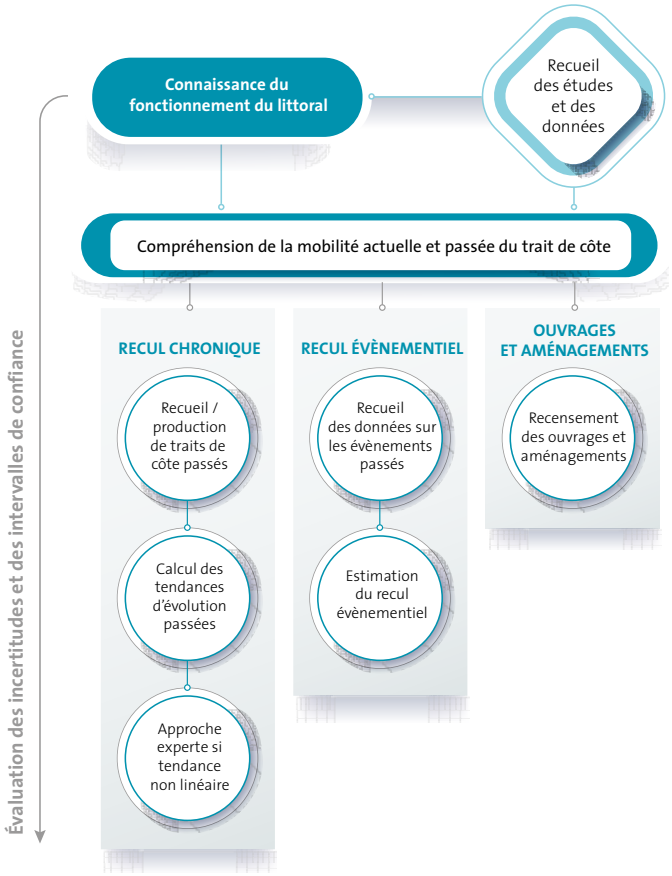


Figure 5 : Logigramme de la partie 2 du document.

2.1 La connaissance du fonctionnement du littoral

a. Le système littoral

L'environnement littoral, situé à l'interface du domaine continental et marin est un système complexe, où interagissent des processus multiples, certains parfois encore mal compris.

L'évolution physique de cette interface diffère selon les types de côte et les phénomènes dynamiques

en action (Figure 6). Cette évolution concerne l'ensemble de l'environnement littoral : depuis l'avant-côte (en domaine marin) jusqu'à la zone rétro-littorale constamment émergée (en domaine continental). Au sein de ce système d'interface, l'évolution du trait de côte résulte de l'action de nombreux phénomènes naturels, qui agissent à des niveaux d'intensité et des temporalités différentes, et peut, de plus, être influencée par les effets des actions anthropiques qui transforment ou influencent la dynamique du milieu littoral et par l'activité du vivant (apports biodétritiques et rôle de la végétation notamment).

Ces caractéristiques expliquent pourquoi il est parfois difficile d'interpréter les évolutions du trait de côte constatées sur le terrain.

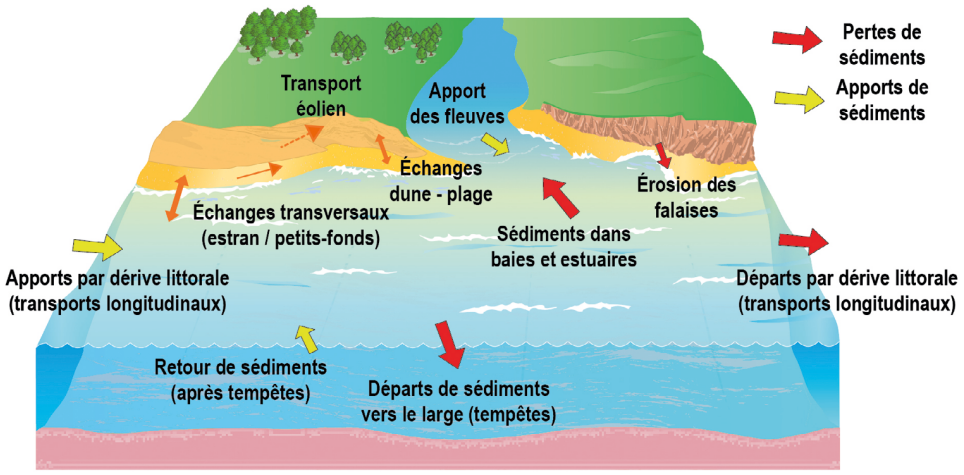


Figure 6 : Schématisation des transits sédimentaires sur le système littoral. *BRGM, fond adapté de Cazenave et Le Cozannet, 2014*

b. Les échelles d'analyse du fonctionnement du littoral

À l'échelle des territoires, cette complexité du système littoral s'observe dans la diversité des paysages et des types de côte qui peuvent se rencontrer. Des littoraux de nature et d'orientation différentes sont amenés à évoluer de façon différente dans le temps. La mobilité du trait de côte est donc très dépendante de la diversité des côtes étudiées.

Pour comprendre le fonctionnement actuel du littoral, il est vivement recommandé de définir les **cellules et sous-cellules hydro-sédimentaires littorales** (voir encadré ci-après). Leur définition permettra notamment d'intégrer le rôle de la géomorphologie, des forçages hydrodynamiques (houles, courants, etc.) et la dynamique sédimentaire du milieu.

La cellule hydro-sédimentaire

Une cellule hydro-sédimentaire est une portion du littoral ayant **un fonctionnement sédimentaire relativement autonome par rapport aux portions voisines**.

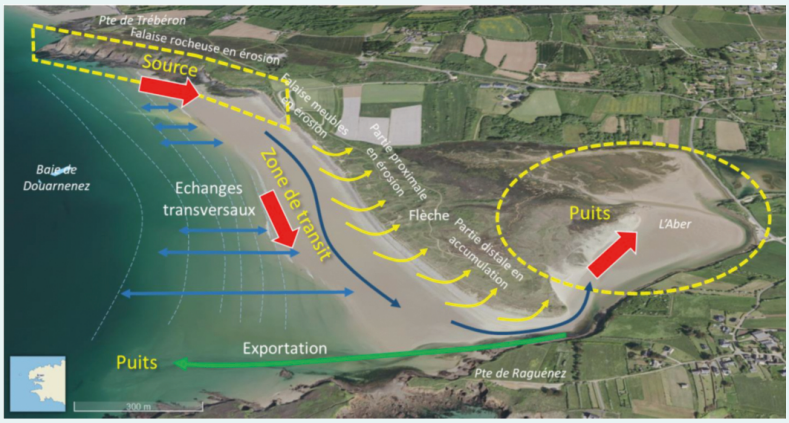


Figure 7 : Exemple de l'interprétation du fonctionnement d'une cellule hydro-sédimentaire - plage de l'Aber. *UBO-Litto'Risques*

Ses limites géographiques peuvent être fixes (pointes rocheuses, jetées, digues, etc.) ou mobiles (dunes, limite d'action des houles, point d'inversion de la dérive littorale, embouchure des cours d'eau, etc.). Leur connaissance est importante, car une modification, même ponctuelle, affectant les transits sédimentaires est susceptible d'avoir des conséquences sur l'ensemble de la cellule.

Ces cellules s'inscrivent généralement dans un ensemble plus large, nommé **unité hydro-sédimentaire**, indépendant sur le plan du transport sédimentaire (découpage selon des limites infranchissables, comme des caps rocheux ou des ouvrages portuaires).

Cet emboîtement d'échelle est également possible en subdivisant la cellule en **sous-cellules hydro-sédimentaires**, afin de caractériser des dynamiques différentielles intervenant localement et agissant sur des segments homogènes du trait de côte.



Figure 8 : Emboîtement d'échelle du découpage hydro-sédimentaire du littoral.
En A, unité hydro-sédimentaire de la baie de Douarnenez, comportant plusieurs cellules (partie de nord de l'unité en B). La cellule de la plage de l'Aber (C) est l'une d'entre-elles. Celle-ci peut être subdivisée en 2 sous-cellules (D) afin de mieux expliquer son fonctionnent interne. *UBO-Litto'Risques*

2.2 Recueil d'informations

L'étude du fonctionnement du littoral nécessite de recueillir une quantité importante de données et de connaissances. Le littoral étant un espace très étudié, en particulier dans les secteurs soumis à des phénomènes de submersion marine et de recul du trait de côte, il est vivement recommandé de prévoir une phase de recueil des informations existantes.

Dans de nombreuses situations, ce recueil apportera des informations sur les secteurs déjà constatés en recul, les principaux transits sédimentaires, les effets des tempêtes majeures et sur les ouvrages présents sur le littoral.

Les sources de données sont diverses et disponibles à des échelles très variées : données nationales, recensement des ouvrages littoraux, publications scientifiques, collection d'anciennes photographies du littoral, PPRL, données de suivi de sites instrumentés, études locales, etc.

a. Données nationales

De nombreuses ressources sont disponibles à l'échelle nationale sur les portails internet de *Géolittoral, Data.Shom, Géorisques, InfoTerre, IGN*. Les liens internet utiles sont fournis dans la partie "Pour aller plus loin" de ce document.

Une donnée nationale concerne spécifiquement la mobilité du trait de côte. L'indicateur national de l'érosion côtière qui apporte des données homogènes sur le littoral français (métropole et cinq DROM) sur l'évolution passée du trait de côte. Cet indicateur présente la mobilité passée du trait de côte sur au moins 50 ans à partir de l'analyse de photographies aériennes anciennes et récentes. La position des traits de côte relevés et les évolutions observées selon des profils espacés tous les 200 m le long du littoral sont consultables et téléchargeables (en données libres de droits) sur le portail *Géolittoral*.

Ces données sont complétées par la cartographie nationale des ouvrages et aménagements littoraux, qui recense près de 16 000 ouvrages, accessibles via *Géolittoral*.

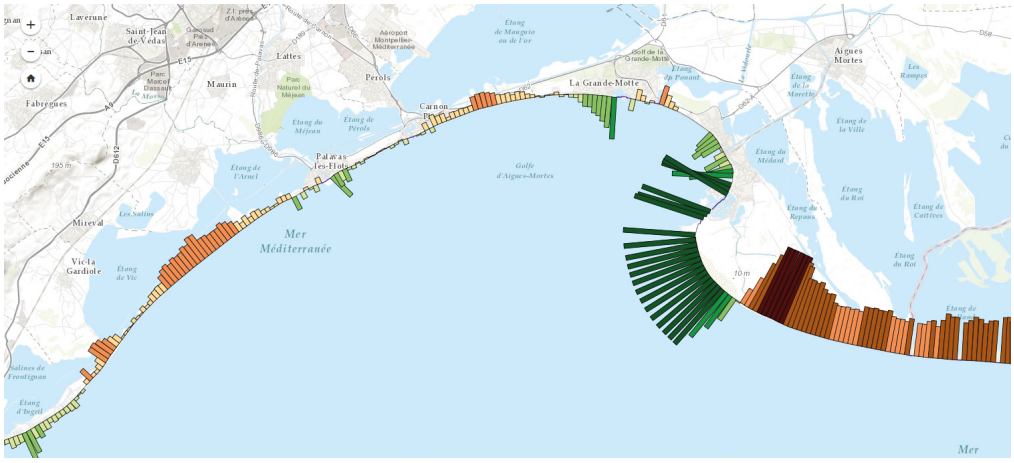


Figure 9 : Exemple de représentation de l'indicateur national de l'érosion côtière. Cerema

b. Acquisitions et suivis réguliers du littoral

Des données et de la connaissance sur le trait de côte (et plus largement sur la bande côtière), souvent plus précises ou à jour que les données nationales, sont également collectées, interprétées et diffusées localement ou en région par des **structures d'observation du trait de côte**. Ces différents types de structures, souvent appelées « observatoires » ou organisées en « réseaux de suivi » :

- acquièrent de façon régulière des données relatives au trait de côte ou à la frange côtière, avec une fréquence variable (échelle évènementielle, saisonnière, annuelle, pluriannuelle, etc.), et sur une zone plus ou moins étendue ;
- se placent dans une démarche d'observation à long terme visant l'acquisition de données de référence fiables, homogènes et régulières sur l'évolution du littoral au sens large ;
- s'intègrent dans une démarche de capitalisation de ces informations et de leur mise à disposition ainsi que de mutualisation et de fédération des actions de suivi auprès des acteurs du territoire et éventuellement du public.

À une échelle nationale, la plupart d'entre elles sont fédérées au sein du Réseau National des Observatoires du Trait de Côte (RNOTC) qui vise à assurer une meilleure connexion entre les différentes structures, et à favoriser le partage et la diffusion des données et des savoirs traitant de l'évolution du littoral sur le long terme et l'adaptation des territoires littoraux aux changements globaux. **Un échange avec ces structures est vivement recommandé**. Les secteurs situés ainsi sur un territoire d'un observatoire du trait de côte doivent considérer les données issues de ce réseau comme essentielles pour la réalisation des cartes locales d'exposition au recul du trait de côte.

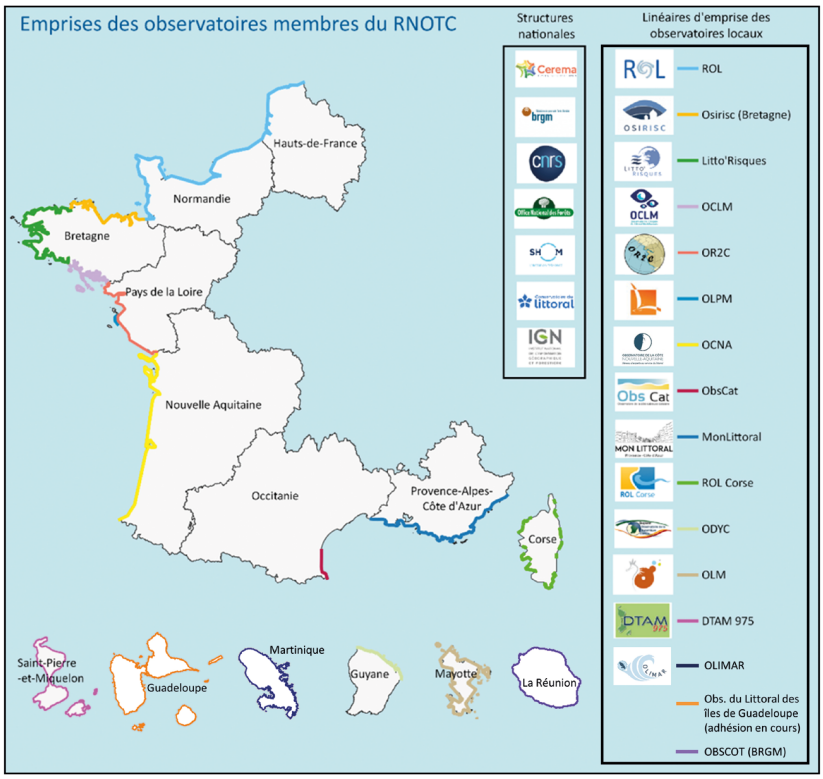


Figure 10 : Emprises des observatoires du trait de côte du RNOTC en avril 2022. BRGM et Cerema

Les secteurs non dotés d'une structure d'observation peuvent s'engager avantageusement dans une telle démarche comme une approche prospective pour préparer les futures révisions des cartes.
Aux côtés des observatoires, des « systèmes d'information géographique », ou « systèmes d'information sur le littoral », sont souvent déployés et mis en place pour donner accès à des documents d'analyse et de synthèse, à des diagnostics et des indicateurs sur l'évolution du littoral (cartes, diagrammes, tableaux), accessibles au plus grand nombre.

Les établissements de recherche et d'enseignement supérieur organisent eux aussi, le plus souvent en complémentarité avec les structures d'observation, des observations très fines du littoral sur des sites pilotes ou ateliers. Citons notamment le Service national d'Observation DYNALIT (labellisé CNRS INSU) qui fédère 30 sites ateliers situés sur différents types de côtes.

Structuration et outils des observatoires

Les techniques de mesure et d'observation mise en œuvre pour suivre l'évolution du trait de côte et du littoral ont pour objet :
- d'évaluer les stocks sédimentaires et leurs dynamiques en lien avec l'évolution géomorphologique du littoral ;
- de caractériser le processus d'érosion des différents types de côte ;
- d'anticiper et déterminer l'impact des tempêtes sur le littoral notamment pour les reculs maximaux (Lmax) ;
- d'appréhender l'impact de l'érosion côtière et de l'Homme sur l'environnement pour une meilleure gestion des écosystèmes côtiers.

Quatre grands types de suivi du littoral peuvent être distingués :
- les suivis géomorphologiques, à la surface du système littoral ;
- les suivis géophysiques, qui traitent du sous-sol du système ;
- les suivis des conditions météo-marines ;
- les autres suivis incluant la biodiversité et les activités anthropiques notamment.

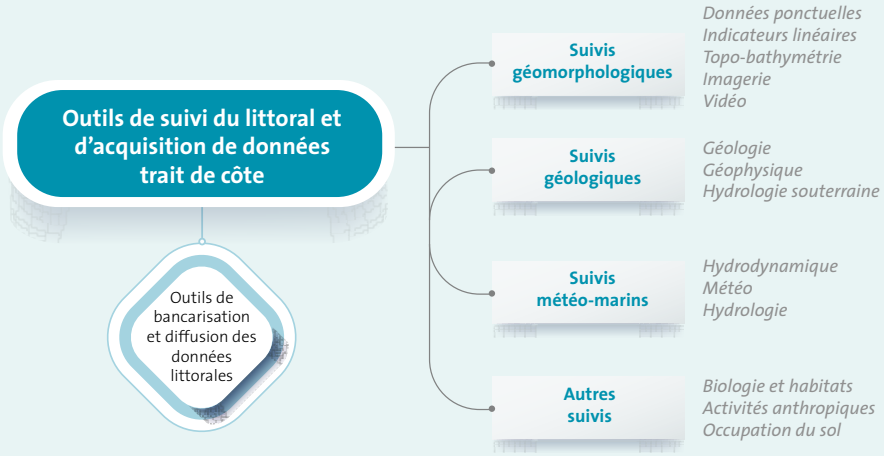


Figure 11 : Les différents types de suivi du littoral. *BRGM*

L'ensemble de ces différentes données produites par ces suivis permet d'observer le système littoral dans sa globalité et de mieux comprendre les processus qui font évoluer le trait de côte. Parallèlement aux outils de suivi du littoral et du trait de côte, il est également important de considérer les outils de bancarisation et de diffusion des données pour permettre un accès simplifié aux informations et la préservation des données d'observation dans le temps.

c. Études locales

De très nombreuses études locales sont également produites à l'initiative des services déconcentrés de l'État, des collectivités ou des établissements publics. Les rapports d'études ou leur synthèse sont généralement consultables en ligne sur leur site internet ou portail de diffusion de données et de porter à connaissance.

La collection de 17 fascicules locaux *Dynamiques et évolution du littoral – synthèse des connaissances des côtes françaises* (Cerema) apporte une vision globale des connaissances disponibles sur le littoral. Elle est accompagnée d'un atlas cartographique. L'ensemble est disponible sur *Géolittoral*.

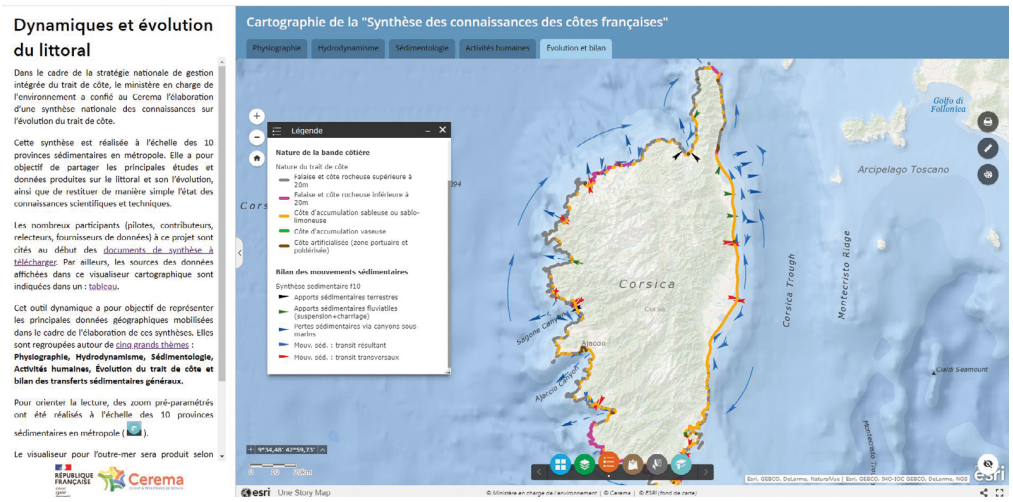


***Figure 12 : Visualiseur des données mobilisées dans le projet* Dynamiques et évolution du littoral – synthèse des connaissances des côtes françaises.** *Cerema*

Toutes ces **informations peuvent être retranscrites sous la forme de cartographies**. Elles sont aussi bien utiles pour la suite des études que pour la sensibilisation des acteurs locaux aux dynamiques littorales.

2.3 La position passée du trait de côte

L'étude des dynamiques d'évolution du trait de côte repose généralement sur **l'interprétation de la position de marqueurs du trait de côte** sur des photographies aériennes anciennes et récentes du littoral. La comparaison à des dates bien distinctes de ces marqueurs permettra de calculer une tendance d'évolution du trait de côte.

Pour aller plus loin, la fiche n° 2.1, à la fin de ce document, présente d'autres moyens de relevés de ces marqueurs (D-GPS sur le terrain par exemple) pour le relevé de marqueurs récents, mais seules les photographies aériennes, qui sont exploitables depuis le début du XX^{e} siècle, permettent d'observer la mobilité du trait de côte sur des temps longs.

Les **marqueurs** de position du trait de côte utilisés dans le cadre de ces études sont majoritairement la limite de végétation pour les côtes sableuses et le sommet des falaises ou la limite de végétation pour les côtes à falaises rocheuses. Sur les côtes à très faible marnage, comme pour la façade méditerranéenne, la limite du jet de rive est couramment utilisée sur les côtes basses.

D'autres marqueurs de position sont également possibles selon les environnements rencontrés : pied de falaise, pied de falaise dunaire, front de mangroves, rupture de pente, etc.
Dans le reste de ce document, l'expression « marqueur ou indicateur de position du trait de côte » est remplacée par simplification par « trait de côte » (le tracé du trait de côte étant composé de plusieurs marqueurs de position du trait de côte).

Concrètement, les collectivités auront très certainement accès (*via* l'indicateur national, des études régionales ou/et locales ou l'observatoire local) à des **relevés existants de position du trait de côte**. La prise de contact avec l'observatoire régional ou/et local du trait de côte et la consultation du chapitre n°6 (Évolution du trait de côte et bilan des transferts sédimentaires généraux) des fascicules locaux du projet *Dynamiques et évolution du littoral – synthèse des connaissances des côtes françaises* (Cerema) sont vivement conseillées. Il est dans l'intérêt de la collectivité de reprendre les études et les observations locales existantes du littoral, sur la base des marqueurs du trait de côte préalablement identifiés et suivis.

Il est conseillé d'**obtenir si possible plus de cinq traits de côte depuis les années 1950** (voire 1920). Le trait de côte le plus récent doit être relevé avec soin, car il servira de référence pour la projection des positions futures du trait de côte. Si ce trait de côte provient d'une digitalisation réalisée immédiatement après une tempête, il est préférable de ne pas le retenir comme référence.

Pour aller plus loin, la fiche n° 2.2, présente à la fin de ce document, apporte des recommandations si des traits de côte supplémentaires doivent être relevés en cours d'étude.

2.4 Les tendances d'évolution du trait de côte

a. Approche courante (analyse diachronique)

Le relevé de la position passée du trait de côte à plusieurs dates permet d'observer son évolution au cours du temps (y compris son absence de mobilité, le cas échéant). Plus le nombre de traits de côte est élevé et espacé dans le temps, meilleure est la connaissance de sa mobilité.

En comparant la position d'au moins deux traits de côte datés, il est possible de calculer un **taux moyen annuel de recul du trait de côte**, dénommé dans la suite de ce document par l'abréviation **Tx**. Il est exprimé en mètre par an. Il s'agit d'une tendance d'évolution qui sera positive en cas d'avancée du trait de côte et négative lorsqu'il recule sur la période observée.

Ce Tx est valable uniquement sur la période d'observation sur laquelle il est calculé. L'évolution n'étant jamais strictement linéaire, cette tendance sera, en effet, différente, et peut même s'inverser, selon la période d'observation. **Toute valeur d'un Tx n'a ainsi de sens que lorsque la période d'observation est précisée**.

Le calcul du Tx est généralement réalisé selon des **profils** régulièrement espacés et disposés à la perpendiculaire de la ligne de rivage pour les côtes basses. L'espacement des profils est généralement compris entre 25 et 100 mètres. La position des profils peut être ponctuellement décalée afin de mesurer des évolutions représentatives.

Pour aller plus loin, la fiche n°2.3 de ce document apporte des compléments pratiques pour le calcul du Tx.

Ce type d'étude permet de détecter les **secteurs évoluant de façon non-linéaire et complexe** (phases marquées d'avancée et de recul, parfois cycliques) et où il n'est pas possible de distinguer une tendance générale d'évolution, comme ceux situés au niveau de certains estuaires. Il s'agira alors de mener une démarche à dire d'expert (partie 2.4. b).

Des **logiciels** comme MobiTC, développé par le Cerema, ou encore DSAS *(Digital Shoreline Analysis System)* qui est une extension d'un logiciel de SIG, permettent **d'automatiser le calcul** du Tx et des intervalles de confiance associés.

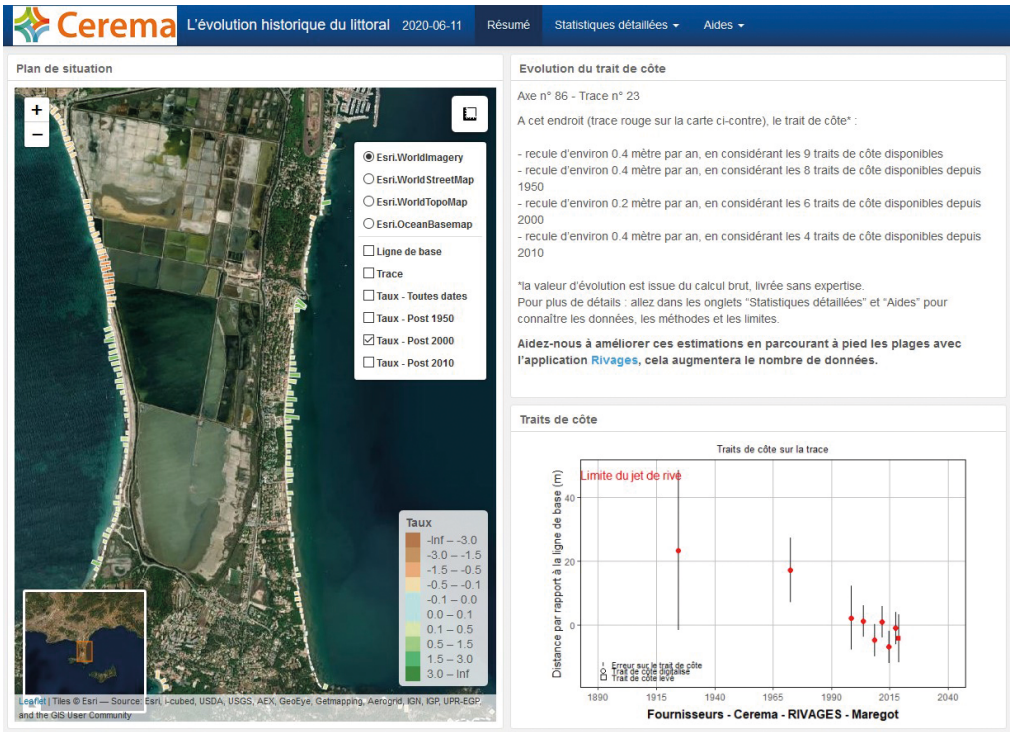


Figure 13 : Interface du logiciel MobiTC pour le résumé des résultats par profils. Cerema

b. Approche experte (analyses complémentaires)

Parfois, les analyses réalisées sur les positions des traits de côte avec l'approche courante, décrite ci-avant, ne permettent pas de distinguer des tendances d'évolution claires. Une approche basée sur des données complémentaires, avec notamment le recours au dire d'expert s'impose afin de comprendre le fonctionnement passé du littoral et en déduire des éléments qui seront utiles aux projections de la position du trait de côte.

Dans le cas des évolutions complexes du trait de côte, il est conseillé de se référer à la fiche n°2.4 et à la fiche n°2.5 qui sont présentes à la fin de ce document.

2.5 Les phénomènes de reculs majeurs évènementiels du trait de côte

Les évènements énergétiques majeurs peuvent être à l'origine d'importantes modifications du littoral et induire des impacts significatifs durables sur l'évolution du trait de côte.

Par exemple :
- de fortes houles de tempête et la surcote associée peuvent éroder un littoral sableux et affecter un cordon dunaire, jusqu'à sa rupture ;
- une crue peut modifier la configuration d'un estuaire, des bancs et la morphologie du littoral adjacent ;
- un effondrement rocheux massif peut modifier durablement la stabilité locale d'une falaise.

Les liens entre les évènements majeurs et les évolutions morphologiques du littoral sont connus historiquement, mais la compréhension des phénomènes et la quantification des effets sur le trait de côte restent encore peu documentés. Ils constituent des enjeux de connaissances prioritaires pour l'élaboration de projection de recul du trait de côte. Ainsi, toute donnée locale nouvelle est importante et toute mesure d'impact d'un évènement majeur est précieuse.

Pour les travaux de projection du trait de côte, il est donc recommandé de prendre en considération les effets directs des évènements majeurs sur le littoral, mais également les effets indirects, en lien avec les modifications possibles du fonctionnement du système. Le champ de connaissances associées concerne le contexte précédant l'évènement, la quantification des forçages, puis la connaissance des phases de reconstruction et de résilience.

a. Connaissance des phénomènes induisant de reculs majeurs du trait de côte

Plusieurs paramètres et éléments sont utilisables pour connaître et caractériser les évènements exceptionnels affectant le trait de côte et le système littoral :
- l'intensité du recul du trait de côte (ponctuel ou global) et la période de retour associée à ce recul ;
- les impacts sur le fonctionnement du littoral au sens large et notamment les évolutions majeures de la géomorphologie ;

- les forçages qui ont provoqué le phénomène et leur période de retour ;
- les capacités de reconstruction du milieu après l'évènement.

Quantification de l'impact des évènements majeurs

La quantification des effets morphologiques des différents évènements énergétiques actuels sur la morphologie littorale et le recul du trait de côte permet de caractériser l'intensité du phénomène. La typologie des évènements de recul du trait de côte est dépendante du territoire, mais il convient de bien distinguer les forts reculs affectant une zone d'emprise spatiale limitée et les effets affectant l'ensemble du territoire. Ces données sont ensuite utilisées pour distinguer les phénomènes énergétiques « réguliers » ou « communs » et les évènements majeurs, rares et très impactants, qui peuvent transformer profondément le fonctionnement de l'environnement.

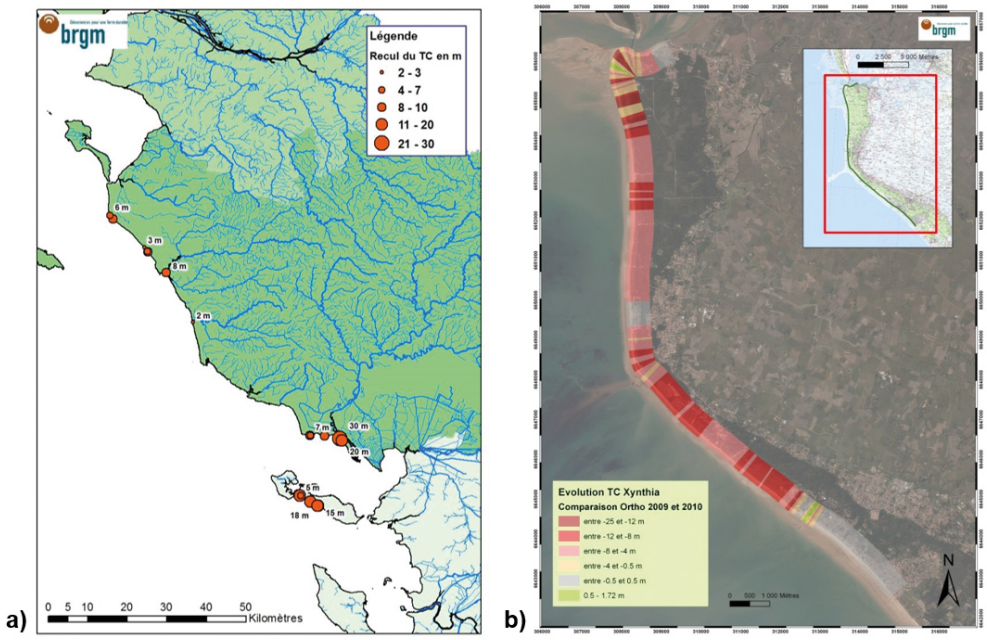


Figure 14 : Quantification des reculs du trait de côte sous l'effet de la tempête Xynthia*. a) Carte de localisation des points d'observation où la valeur du recul du trait de côte a été évaluée. b) Comparaison des reculs du trait de côte (pied de dune) calculés à partir des jeux de photos aériennes de juillet 2009 et avril 2010). BRGM, Desmazes* et al. *2013*[3]

Il est recommandé de mettre en place cette approche quantitative en complément d'une recherche historique et documentaire des évènements majeurs ayant affectés le territoire étudié pour justifier les hypothèses chiffrées sur l'impact sur le recul du trait de côte des plus forts évènements historiques.

3 – **Desmazes F., Muller H., Garcin M., Belon R. et Baudouin V.** avec la collaboration de **Nicolae Lerma A. (2013)** – *Méthodologie de détermination du recul maximal des dunes pour les évènements extrêmes* BRGM/RP-63157-FR, 134 p., 97 fig., 14 tabl.

Nota : Si le secteur d'étude est situé au sein d'un observatoire, les travaux de cet observatoire du littoral seront essentiels dans la présente démarche, d'autant plus s'il existe, associé à cet observatoire, un réseau de suivi des tempêtes et de leurs effets sur le littoral. La multiplication des observations et des mesures des impacts de ces phénomènes sur le trait de côte à l'échelle des territoires est un élément nécessaire pour estimer les périodes de retour de ces évènements majeurs par l'intermédiaire d'études statistiques.

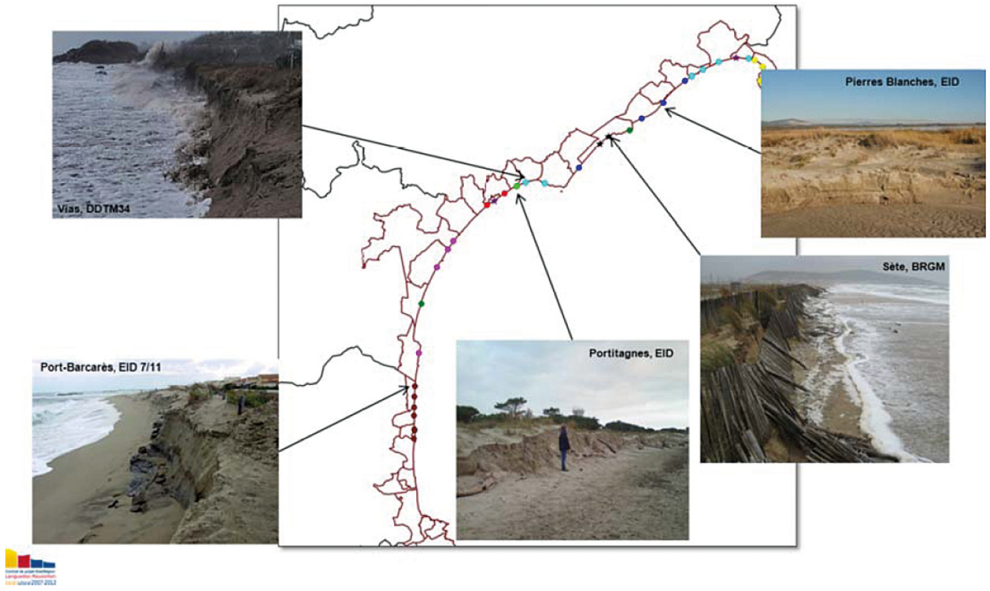


***Figure 15 : Érosion observée par le réseau Tempête Occitanie le 24/10/2011**. BRGM, Desmazes* et al. *2013*

Pour les phénomènes majeurs, dont les impacts dépassent largement les effets régulièrement constatés, les observations et les mesures post-évènement sont souvent mises en œuvre. La connaissance de ces évènements doit s'inscrire dans des actions d'acquisition qui peuvent inclure la mise en place de levés Lidar topo-bathymétrique, photogrammétrique et ortho-photographique du littoral.

Connaissance des forçages

Parallèlement au suivi des impacts sur le trait de côte, les évènements majeurs (tempête, cyclone, etc.) sont également décrits par les forçages qui les guident : houles, niveau d'eau, vent, pluie, débits fluviaux notamment. Il convient de mettre en œuvre les analyses statistiques adaptées pour quantifier les périodes de retour des forçages en tenant compte des dépendances entre les phénomènes (ex. méthodes multivariées pour les valeurs extrêmes). Elle est complémentaire et particulièrement instructive car, les données de forçage sont généralement mieux connues que les impacts sur le trait de côte et plus propices aux études statistiques. Il conviendra cependant de ne pas confondre la période de retour du recul majeur de celle des forçages associés. En effet, un évènement de forçage de même période de retour ne fournira pas obligatoirement le même recul du trait de côte.

À l'échelle locale, la présence de capteurs hydrodynamiques et météorologiques, s'ils sont présents, permet d'acquérir des données précieuses pour ces besoins. À l'échelle régionale ou par façade,

des données de modélisation rétrospectives peuvent fournir des informations pertinentes pour l'estimation des forçages des évènements extrêmes, à condition d'être calibrées par des mesures *in situ*.

La connaissance fine des conditions extrêmes passées et futures est un élément déterminant pour documenter les observations d'impacts sur le trait de côte et justifier de les majorer, selon les besoins de projection sécuritaire et de cartographie locale.

Pour aller plus loin : prise en compte des séquences d'évolutions morphologiques, voir la fiche n°2.6.

Bilan et recommandations sur les connaissances des phénomènes de reculs majeurs

Cette partie traite des besoins de connaissances utiles à la prise en compte des phénomènes de reculs exceptionnels du trait de côte, des conséquences qu'ils peuvent engendrer, des évènements énergétiques extrêmes et des séquences évolutives qui peuvent être à l'origine de ces phénomènes majeurs. Les recommandations qui peuvent être formulées à ce sujet sont :

- connaître les évènements historiques ayant affectés le territoire au moyen de recherches documentaires ;
- en lien avec le travail d'un observatoire du trait de côte ou dans le cadre de suivi régulier, bâtir ou consulter une base de données quantifiant les effets des évènements actuels ;
- établir les relations entre forçages, périodes de retour et impacts morphologiques;
- pour aller plus loin : Connaître les contextes d'évolutions locales : séquence d'évolution avant l'évènement, seuils d'évolution morphologiques, temps de résilience éventuel (cf. fiche n° 2.6).

b. Approches mobilisables pour la prise en compte des reculs majeurs évènementiels dans les projections du trait de côte

La partie précédente traite des connaissances utiles pour comprendre l'effet des évènements énergétiques et les phénomènes de reculs exceptionnels qu'ils peuvent engendrer. Dans un contexte de changement climatique, impliquant un possible renforcement des phénomènes extrêmes et une montée du niveau marin, nous recommandons d'étudier avec soins les phénomènes d'érosion provoqués par les évènements énergétiques, afin de mieux anticiper les évolutions à moyen et long terme. Les recommandations formulées dans cette partie sont larges et s'appliquent aux différents types de côte, notamment certaines côtes rocheuses où les reculs évènementiels ne sont pas toujours reliés à des évènements météo-océaniques extrêmes.

Approche "Lmax"

Cette approche est détaillée dans le guide PPRL (DGPR, 2014). Elle intervient lorsque la projection du trait de côte à la période voulue est établie. Elle consiste à cartographier un recul supplémentaire lié à un évènement d'ampleur exceptionnel. Si la projection de recul du trait de côte est fiable et certaine, cette approche s'inscrit dans la formulation d'un scénario de projection sécuritaire, car elle considère qu'un évènement d'ampleur exceptionnel peut se produire à la fin de la période de recul étudié. Si la projection de recul du trait de côte apparaît moins fiable et de qualité incertaine, cette approche présente l'avantage de limiter les risques de sous-évaluation de la zone d'aléa.

Le guide PPRL mentionne que cette approche est particulièrement utile dans les zones où les évolutions observées à moyen ou long terme semblent faibles, tout en étant sujet à des évènements extrêmes.

La valeur de recul maximal ponctuel lié à un phénomène exceptionnel est nommée "Lmax" dans le guide PPRL (DGPR, 2014). La recherche de cette valeur Lmax et son traitement cartographique garantissent la prise en compte des phénomènes les plus dangereux. Pour les nouvelles cartographies locales, il est donc fortement recommandé de prendre en compte ce paramètre.

Cette valeur s'applique à un territoire homogène ou un segment de côte homogène pour lequel le plus fort recul ponctuel déterminé est cartographié pour l'ensemble de la zone homogène associée. Il convient néanmoins de rappeler que le recul évènementiel maximal n'affecte pas nécessairement le même indicateur de trait de côte que celui utilisé pour établir les tendances évolutives. Ce point devra être traité au cas par cas lors de la réalisation des projections et des cartographies.

Recommandations pour l'estimation de la valeur Lmax

Les recherches documentaires sur les évènements extrêmes anciens ne fournissent généralement pas de valeur mesurée du recul du trait de côte selon un protocole établi et fiable. En l'absence de valeur historique mesurée pour les phénomènes passés, il est recommandé d'associer le dire d'expert à des intervalles d'incertitudes chiffrés. Il est également recommandé de procéder, dans la mesure du possible, à des analyses complémentaires pour estimer des valeurs de reculs possibles.

Pour les secteurs sédimentaires, des pistes d'études complémentaires sont proposées dans le guide PPRL : modélisation physique, formule empirique, modélisation numérique. Il faut noter que si certaines formules empiriques très simples permettent de fournir des ordres d'idée de reculs évènementiels, il est recommandé de mettre en œuvre les acquisitions de données qui permettront de développer des modèles d'évolutions locales. Le choix final d'une valeur Lmax par zone homogène peut donc être réalisé à dire d'expert, à condition de disposer d'informations historiques, d'estimations de recul, de données et d'évaluations complémentaires (formules empiriques, modèle numérique de type X-Beach, Desmazes *et al.* 2014 et 2015[4]).

Évolution envisageable de l'approche Lmax

La mise en place d'observatoires du littoral et le suivi régulier de l'évolution du domaine côtier permettent d'améliorer la connaissance des phénomènes de recul majeur du trait de côte et l'impact des évènements énergétiques.

Dans le cas de littoraux où ces impacts sont bien renseignés, largement connus et que des périodes de retour des évènements ont été établies, il est envisageable, pour aller plus loin et améliorer l'estimation des marges de sécurité, de choisir une valeur "Lmax" correspondant aux périodes de retour étudiées (30 ans et 100 ans).

Pour le premier horizon temporel, il est envisageable de choisir une valeur Lmax correspondant à un recul ponctuel maximal pour une période de retour de 30 ans minimum. Pour l'horizon temporel à 100 ans, entre une valeur basée sur les observations et une autre basée sur la période de retour centennale évaluée par analyse statistique des extrêmes, il est recommandé de choisir la plus forte valeur de recul.

4– **Desmazes, F., Muller, H., Nicolae Lerma, A.**, 2014. *Méthodologie de détermination du recul maximal des dunes pour les évènements extrêmes*. Phase 2/A. BRGM/RP-64184-FR.
Desmazes, F., Muller, H., Nicolae Lerma, A., Bulteau, T., avec la collaboration de **Balouin, Y.**, 2015. *Méthodologie de détermination et d'estimation du recul maximal des dunes lors d'évènements extrêmes Phase 2 – Année 2*. Rapport final. BRGM/RP-65439-FR.

■ Approche paroxysmale : rupture ou modification du système

Cette approche consiste à envisager une évolution particulière du littoral sous l'effet d'un ou plusieurs évènements de recul majeurs menant à une modification partielle ou complète du milieu. Dans le cadre des projections pour les évolutions non-linéaires du trait de côte (cf. partie 4.5), il pourra être utile d'étudier cette approche paroxysmale des évènements extrêmes sur le milieu littoral et leurs conséquences.

Ce travail est réalisé régulièrement dans le cadre des PPRL « Submersion marine », lors de l'étude de rupture des ouvrages et des cordons sédimentaires littoraux, mais il doit pouvoir être mis en œuvre pour tous les types de milieux littoraux. Pour les secteurs sujets aux interventions humaines de gestion, cette approche paroxysmale implique de ne considérer aucune action de remédiation anthropique post-tempête ou post-évènement.

En fonction des modifications du littoral envisagées après le phénomène extrême, le fonctionnement du système est amené à se modifier. Dans cette approche, il convient de réaliser une projection du trait de côte post-évènement et d'estimer si les taux de reculs considérés préalablement doivent être modifiés. Ces évolutions temporelles dans la construction d'une projection du trait de côte vont impacter l'estimation finale de la zone de recul à l'échéance considérée. Ainsi, à la différence de l'approche Lmax, les projections finales pourront être dépendantes de la (ou des) date(s) choisie(s) pour appliquer l'effet de l'évènement majeur et ces conséquences paroxysmales.

Pour aller plus loin, la fiche n° 2.6 donne des précisions sur la prise en compte des évènements majeurs dans une approche à long terme (approche experte).

2.6 Les ouvrages et aménagements littoraux

Face à l'érosion des côtes, les choix relatifs à la construction et le maintien en l'état au fil du temps d'ouvrages de protection côtiers sont un enjeu important pour les collectivités. Ces ouvrages sont nombreux en France : la « cartographie nationale des ouvrages et aménagements littoraux » recense par exemple en cumulé 360 km de perrés, près de 500 km de digues côtières, 240 km de murs, ou encore un peu plus d'un millier d'épis.



Figure 16 : Perré en enrochement. *Cerema*

S'ils constituent une réponse pour maintenir en place des enjeux, ces ouvrages sont également un facteur d'aggravation de l'érosion en décalant généralement les zones en recul vers l'aval (dans le sens de la dérive littorale) ou en abaissant le niveau de l'estran. Outre leur coût de construction, ils nécessitent un suivi attentif et des travaux réguliers d'entretien, voire de réparation après les tempêtes. Certains d'entre eux font enfin peser de fortes responsabilités aux propriétaires/gestionnaires en termes de sécurité publique.

Trois types d'aménagement peuvent être recensés :

- les ouvrages longitudinaux (situés le long du rivage), comme les murs, les perrés ou les digues, qui se substituent au trait de côte « naturel ». Ils fixent la position du trait de côte depuis leur construction, mais génèrent généralement une érosion sur l'estran (baisse de niveau altimétrique parfois jusqu'à la disparition du sable) et un recul accru à proximité de l'ouvrage (effet de bord). Sans évolution, il n'est pas possible de calculer un Tx au droit des ouvrages longitudinaux. La relative protection apportée par ces ouvrages n'est pourtant que temporaire : Ils peuvent connaître une défaillance lors d'un évènement majeur, être sous-dimensionnés notamment en raison de l'élévation du niveau marin ou être déconstruits s'ils deviennent inutiles ou trop coûteux à entretenir ;
- les ouvrages transversaux (perpendiculaire au trait de côte) qui influencent les transits sédimentaires longeant les côtes. Ils piègent les sédiments en amont de leur construction. Mais en appauvrissant le transit sédimentaire, ils créent des reculs du trait de côte plus vers l'aval. Certains d'entre eux, comme les épis, peuvent disparaître ensablés. Il est important de connaître la date de construction de ces ouvrages afin d'étudier leur influence sur la mobilité du trait de côte ;
- des aménagements plus légers tels que l'installation de ganivelles, le rechargement des plages ou le reprofilage des cordons dunaires qui accompagnent les processus d'évolution du littoral et influencent également la mobilité du trait de côte à partir de leur mise en place.

Tous ces ouvrages et aménagements littoraux sont **susceptibles d'influencer la mobilité du trait de côte** et ils sont donc **à recenser lors de l'étude**. Leur prise en compte est développée en partie 4.4. d.

Il convient de rappeler que la fixation du trait de côte par des ouvrages n'est pas la seule solution et que de nombreux gestionnaires mettent en place des mesures d'accompagnement de la mobilité du trait de côte basées généralement sur des méthodes dites douces ou des solutions fondées sur la nature.

2.7 Prise en compte des incertitudes

Pour décrire de manière cohérente les incertitudes affectant les différents processus à l'origine de la mobilité du trait de côte, il est recommandé de définir un cadre de gestion des incertitudes qui sera appliqué pour l'étude. La prise en compte rigoureuse et objective de cette problématique est un moyen de crédibiliser les résultats d'une étude et définir les besoins en données complémentaires. La connaissance des marges d'erreur sur les données, sur les approches et les modèles employés sera utile pour la définition des scénarios de projection (cf. partie 4).

La réalisation d'un diagnostic préalable de sensibilité et l'étude du socle de connaissance disponible permet de choisir un cadre méthodologique approprié pour la prise en compte des erreurs et incertitudes.

Les approches classiques, qui restent très sécuritaires, consistent à sommer et à propager les incertitudes liées aux sources d'informations utilisées et d'indiquer l'intervalle de confiance associé.

Lorsque les données disponibles sont en nombre suffisant, il est recommandé d'estimer les incertitudes par une approche probabiliste. Ce cadre présente l'intérêt de nuancer l'approche basée sur les intervalles en pondérant la vraisemblance des valeurs au sein de l'intervalle. Cette démarche permet de limiter les marges d'erreur. Cette approche exige cependant plus d'informations et de données que l'approche basée sur les intervalles pour établir les lois de probabilités qui décrivent les incertitudes. Il s'agit donc de prendre en compte de façon plus « fidèle » les marges d'erreur et incertitudes sur les données et les choix de calculs pour les scénarios retenus.

Pour des territoires complexes présentant une diversité de type de côtes, de données et d'enjeux, il est recommandé des approches différenciées et segmentées.

Tout au long des différentes phases de l'étude, l'analyse des incertitudes devra être menée de manière cohérente, notamment en sélectionnant des intervalles de confiance comparables pour chacun des processus considérés, de manière transparente, toute réduction des incertitudes justifiée par l'expertise.

La fiche n° 2.7 présente les approches mobilisables pour la gestion et la quantification des incertitudes.

3 Influence du changement climatique

3.1 L'élévation du niveau de la mer

Le changement climatique influence et modifie le fonctionnement du littoral tel que décrit dans la partie précédente. L'une des conséquences du changement climatique, l'élévation du niveau de la mer, affecte directement et durablement le phénomène du recul du trait de côte.

La figure suivante décrit les principes des réflexions et études décrites dans cette partie afin de prendre en compte les effets du changement climatique dans la cartographie.

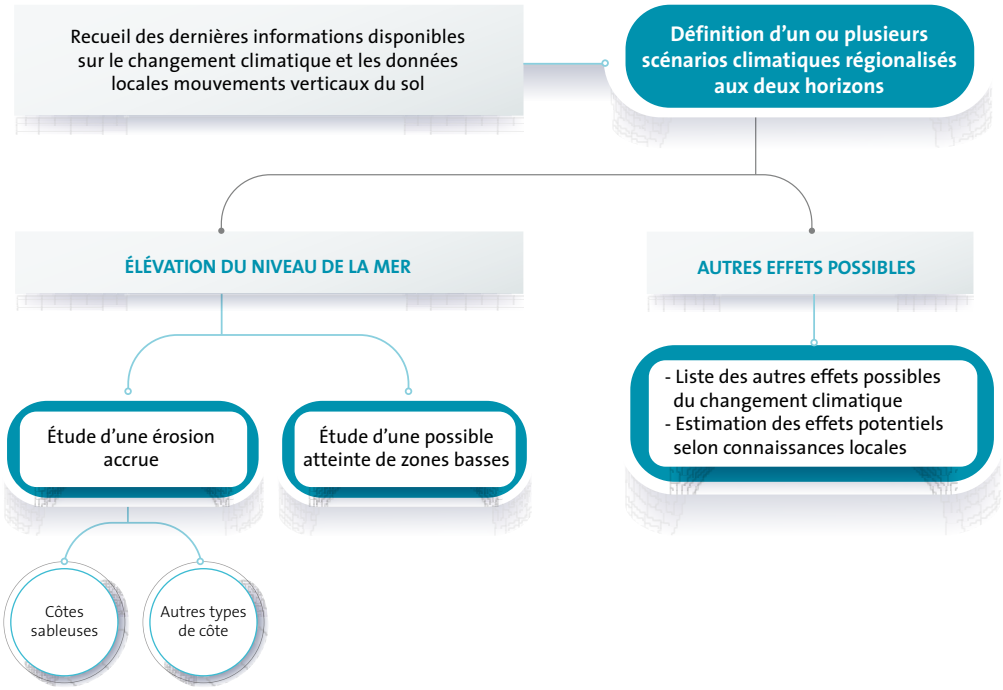


Figure 17 : Principe des réflexions et études décrites dans la partie 3 du document.

Le changement climatique, induit par les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines, vient modifier les dynamiques des phénomènes d'érosion et submersion marine notamment du fait de **la montée du niveau marin**.

Relativement stable depuis 6 000 ans (Fiche n°1.1), le niveau de la mer s'élève à nouveau, essentiellement en raison de la dilatation thermique des océans et de la fonte des glaces (IPCC, 2019). Si l'ampleur de ce phénomène dépend des émissions à effet de serre et des processus physiques à l'œuvre dans l'océan et la cryosphère (portions de la surface des mers ou terres émergées où l'eau est présente à l'état solide), **il est désormais admis qu'il se poursuivra pendant plusieurs siècles** en raison de l'inertie thermique des océans (due à l'absorption de chaleur par les océans) et des pertes de masses des calottes glaciaires Arctiques et Antarctiques. En complément, les échanges d'eau entre les océans, les continents et le sous-sol induisent des variations du niveau marin.

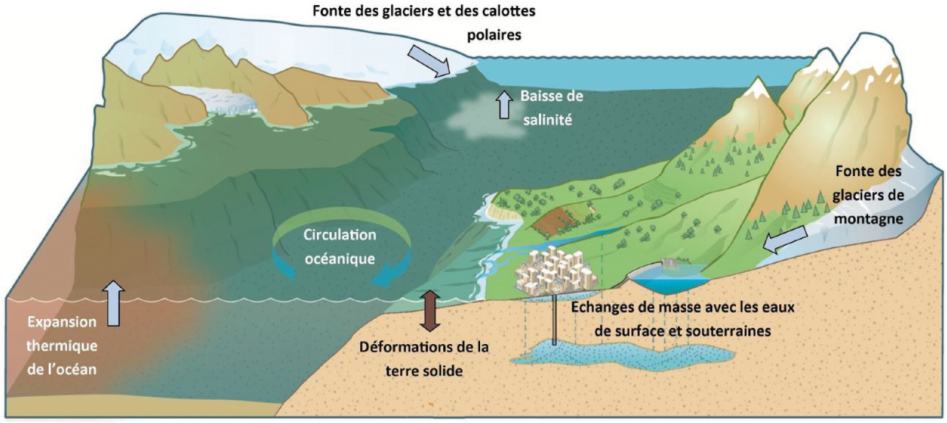


Figure 18 : Causes des variations du niveau marin relatif. *BRGM, adapté de Cazenave et Le Cozannet, 2014*

D'après le rapport du Groupe de travail I de 2021, premier volet du 6e rapport d'évaluation (AR6) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), il est pratiquement certain que le niveau moyen mondial de la mer qui a subi une accélération progressive au cours du XXe siècle continuera de s'élever au cours du XXIe siècle. Si à l'horizon 2050, les différents scénarios climatiques divergent peu : l'élévation du niveau de la mer (par rapport à la période 1995-2014) serait comprise entre 15 cm et 30 cm. Au-delà, les projections donnent :

	2100	2150
SSP1-2.6 (= accords de Paris)	0,44 m [0,33 – 0,61]	0,69 m [0,46 – 1,00]
SSP2-4.5	0,56 m [0,44 – 0,76]	0,93 m [0,67 – 1,33]
SSP5-8.5	0,77 m [0,63 – 1,02]	1,35 m [1,02 – 1,89]

Figure 19 : Valeurs médianes et intervalles pour l'élévation du niveau de la mer en 2100 et 2150 issu du rapport du Groupe de travail I de 2021, premier volet du 6e rapport d'évaluation du GIEC.
Les scénarios climatiques en colonne de gauche correspondent à des scénarios d'émission de gaz à effet de serre. SSP1-2.6 correspond à un scénario de faibles émissions tandis que SSP5-8.5 correspond à un scénario de fortes émissions.

Une élévation du niveau moyen de la mer global supérieure à la fourchette probable - approchant 2 m d'ici 2100 et 5 m d'ici 2150 dans le cadre d'un scénario d'émissions de GES très élevées (SSP5-8.5) (confiance faible) - ne peut être exclue en raison de l'incertitude profonde qui entoure la compréhension des processus contrôlant les pertes de masse des calottes glaciaires.

Les scénarios d'élévation du niveau de la mer recommandés pour l'élaboration des cartes locales d'exposition au recul du trait de côte sont présentés dans la partie 4.4. c.

Pour aller plus loin, la fiche n°3.1 explique les scénarios de changement climatique et leur utilisation.

3.2 Connaissances mobilisables sur l'élévation du niveau de la mer

Les moyennes globales exprimées à l'échelle du globe masquent néanmoins des variations entre les différents bassins océaniques. En effet, les observations spatiales, grâce à leur couverture quasi-globale, ont révélé **une forte variabilité régionale dans l'élévation du niveau de la mer**.

Il est donc recommandé de **prendre en compte les scénarios climatiques régionaux de niveau de la mer** pour s'adapter plus finement aux territoires et façades maritimes et permettre **une meilleure prise en compte des variabilités existant entre littoraux métropolitains et ultramarins**.

Pour aller plus loin, la fiche n°3.2 présente la variabilité régionale des scénarios d'élévation de niveau de la mer.

Les données de ces scénarios climatiques régionaux sont disponibles pour l'ensemble des côtes françaises et sont à jour de la connaissance scientifique (elles sont néanmoins susceptibles d'évoluer avec les travaux du GIEC en cours). Elles sont facilement accessibles à l'ensemble des acteurs concernés et illustrent l'utilisation des intervalles de confiance ressortant d'une approche probabiliste (voir fiche n°3.1).

Localement, l'élévation du niveau de la mer peut également être aggravée ou limitée par des **mouvements verticaux du sol** d'origine naturelle ou anthropogénique. L'un des facteurs aggravants de l'élévation du niveau de la mer est en effet la subsidence, qui se traduit par un enfoncement du sol. Si ces phénomènes sont connus et observés sur le territoire étudié, il est recommandé de les prendre en compte dans les projections d'élévation locale du niveau de la mer.

Pour aller plus loin, la fiche n°3.2 présente les données mobilisables pour l'étude des mouvements verticaux du sol.

La fiche n°3.3 présente les outils disponibles pour la visualisation et la mise à disposition de projections.

3.3 Relations entre élévation du niveau de la mer et recul du trait de côte

L'élévation du niveau de la mer affecte le recul du trait de côte à travers deux processus :

- l'érosion accrue du littoral. Elle affecte principalement les côtes sédimentaires meubles, notamment sableuses, reconnues particulièrement sensibles à l'élévation du niveau de la mer ;
- l'envahissement chronique puis permanent par la mer de zones basses du littoral qui, sous l'effet de la montée progressive du niveau moyen de la mer, se traduira par un déplacement du trait de côte vers l'intérieur des terres, sans érosion (au sens de « perte de sédiment ») ni évolution de la topographie.

a. Approches mobilisables pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer

Côtes sableuses

Sur les côtes sableuses, l'estimation du recul du trait de côte attribué à l'élévation du niveau de la mer a fait l'objet de nombreux travaux de recherche comme d'ingénierie côtière. L'une des approches concernant le recul du trait de côte à long terme due à l'élévation du niveau de la mer consiste à utiliser **la Loi de Bruun** (1962), qui est mobilisée depuis près de six décennies.

Il a, en effet, été démontré que les modèles d'évolution du trait de côte basés sur un concept de profil de plage à l'équilibre peuvent prédire les changements du trait de côte induits par les processus hydrodynamiques combinés (vagues, marée, courants) à court terme, et ce sur des échelles de temps allant de quelques heures à plusieurs décennies. La règle de Bruun et les modèles de plage à l'équilibre reposent sur une même théorie, dans une approche à long terme qui considère que la forme du profil de la plage s'équilibre avec les conditions locales des vagues et du niveau de la mer. La Loi de Bruun permet ainsi, pour une montée du niveau marin donnée, d'estimer un recul du trait de côte sableux en connaissant uniquement la pente générale du domaine côtier. Cette formule empirique, dans sa version simplifiée a été très critiquée dans la bibliographie et nécessite d'être employée avec prudence. Elle permet cependant d'obtenir un premier niveau d'information sur les gammes de reculs envisageables pour un territoire donné.

Dans le cadre de l'étude des projections du trait de côte, il est recommandé de tester l'approche de la Loi de Bruun, dans une mise en œuvre probabiliste, qui intègre les intervalles d'incertitudes des différents paramètres utilisés. Pour justifier de l'utilisation d'une loi simplifiée, le travail doit être discuté avec soin : notamment les différentes options choisies, les méthodes d'estimation des pentes, le choix des limites au large des pentes, les limites d'utilisation de l'approche simplifiée par rapport aux processus dynamiques du territoire et aux stocks sédimentaires en présence.

La fiche n°3.4 présente en détail l'utilisation de la règle d'érosion de Bruun et la fiche n° 3.5 illustre la mise en œuvre de la règle de Bruun pour la réalisation de projections probabilistes d'évolution du trait de côte.

Pour aller plus loin, la fiche n°3.6 présente des pistes de modélisation pour améliorer la réalisation de projections d'évolution du trait de côte à long terme et la fiche n°3.7 présente les principes du modèle PCR *(Probabilistic Coastal Recession)*.

Approche générique pour les autres types de côtes

La connaissance du fonctionnement du littoral est un préalable nécessaire à la réalisation de projection du trait de côte dans des conditions évolutives. Cette connaissance repose notamment sur les relations entre les forçages agissant sur le milieu côtier et leurs effets sur la morphologie littorale, et par extension, le trait de côte.

Dès lors que des forçages agissant sur le recul de trait de côte peuvent être modifiés par l'élévation du niveau de la mer, il est recommandé de lister les forçages concernés et de détailler les effets possibles de ces changements sur l'évolution de la morphologie littorale et du trait de côte.
Cette approche générique est valable pour les différents types de côtes : falaise rocheuse, littoraux mixtes (roche et sédiments), littoraux biogéniques (récifs coralliens, herbier), etc.

Si un modèle de fonctionnement local existe, qu'il soit conceptuel, empirique, numérique ou combiné, et qu'il est calibré et validé, il est recommandé de tester l'évolution des forçages selon le cadre d'élévation du niveau de la mer défini pour l'étude.

S'il n'existe pas de modèle fonctionnel, il est recommandé de mettre en œuvre une phase d'expertise visant à pondérer les vitesses d'évolutions en fonction de l'évolution possible des forçages influencés par le niveau de la mer. Les processus envisagés et les effets estimés seront présentés et discutés avec soin pour justifier des choix.

b. Envahissement par la mer de zones basses

La seule montée progressive du niveau de la mer entraîne le déplacement vers les terres de la limite des plus hautes mers, constituant de fait un recul du trait de côte. Associé à l'évolution érosive de certains milieux littoraux, ce phénomène peut amener à l'envahissement chronique voire permanent par la mer de plus de zones basses situées en arrière littoral.

Il peut s'agir de zones basses meubles protégées de l'action érosive de la mer (fond de baie, lagunes et étangs côtiers) ou dépourvues d'ouvrage de défense, ou de zones basses rocheuses (platiers, etc.), progressivement ennoyées sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer.

Les zones affectées peuvent également ne pas être en contact direct avec le plan d'eau, une lagune ou la mer, leur mise en eau pouvant se faire par le biais de remontée de nappes (du niveau piézométrique). Dans le cadre d'une cartographie locale de la zone soumise au recul du trait de côte, il est vivement recommandé d'étudier les terrains potentiellement impactés par ces phénomènes chroniques. Le croisement du niveau marin attendu avec la topographie (le plus souvent des modèles numériques de terrain "MNT" de l'IGN ou des relevés produits par des structures d'observation), permet de cartographier les terrains possiblement atteints par la mer.

En première approche, il convient de repérer les terrains les plus bas, ouverts sur la mer. Dans un second temps, il est vivement recommandé de repérer les terrains, qui pourraient s'ouvrir sur la mer selon l'évolution du trait de côte (en lien notamment avec les phénomènes de ruptures, des brèches, lors d'évènements extrêmes).

Enfin, des études de modélisation plus fines peuvent être envisagées par rapport aux différentes situations rencontrées localement en fonction de la morphologie, végétation, hydrogéologie, etc.



Figure 20 : Illustration de l'envahissement « régulier » à marée haute par la mer d'une zone basse, après rupture d'un cordon/digue. *Réserve naturelle nationale de la Belle Henriette (Vendée), Wikimedia Commons*

L'inondation des zones basses par la mer

L'inondation des zones basses est une expression générique qui regroupe plusieurs types de phénomènes distincts. Cet encadré précise les termes employés dans ce document et les phénomènes pris en compte pour l'élaboration des projections de trait de côte :

- les zones basses littorales peuvent être inondées régulièrement par le simple jeu de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique. Ces inondations sont chroniques, car elles se répètent avec les plus hautes marées et sont possibles même par temps calme. Afin de ne pas confondre ce phénomène avec celui des submersions marines générées par des évènements extrêmes, le parti-pris de ce document est de nommer **« envahissement par la mer des zones basses »** l'inondation progressive puis permanente des zones basses par la simple élévation du niveau marin. **Ce phénomène, lié au changement climatique, est à prendre en compte dans les projections de recul du trait de côte** ;

- lors de violentes tempêtes, les zones basses situées en arrière littoral peuvent être inondées sous l'effet de la surcote de tempête, de l'apport d'eau par franchissement des paquets de mer et de brèches. On parle alors de **submersions marines**. Ces phénomènes restent rares, au moins pour ce début de siècle, et **l'inondation des zones basses est temporaire**. Les submersions marines demeurent cependant des phénomènes particulièrement dangereux et des mesures de prévention sont prises par les pouvoirs publics dans les communes exposées à ce risque (en particulier par des PPR littoraux). **Les submersions marines générées par des évènements extrêmes ne sont donc pas à prendre dans la carte locale d'exposition au recul du trait de côte. En revanche, les phénomènes de recul liés à ces évènements extrêmes sont à prendre en compte dans la carte locale.**



Figure 21 : Submersion marine au niveau d'une zone lors de la tempête Xynthia en Charente-Maritime.
Bruno Landreau/Terra

3.4 Évolution et impacts des autres processus météo-marins

L'élévation du niveau marin n'est pas la seule conséquence du changement climatique. Il engendre de nombreux autres phénomènes qui affecteront le littoral et potentiellement le recul du trait de côte. Le changement de la direction moyenne des houles par exemple, de quelques degrés, peut ainsi impacter les transports de dérive littorale sur le long terme et ainsi modifier le taux moyen d'érosion.

Dès lors qu'un ou plusieurs processus en lien avec le changement climatique peuvent agir sur les forçages météo-marin à la côte, les apports sédimentaires et la morphologie du territoire étudié, il est recommandé de lister et de détailler les effets possibles de ces changements sur l'évolution du trait de côte.

Si un modèle (conceptuel, empirique, numérique ou combiné) ou des données d'étude sont disponibles, il est recommandé de tester l'évolution des forçages et processus identifiés sur la morphologie et la position du trait de côte.

S'il n'existe pas de modèle opérationnel, il est recommandé d'associer un expert local dans le comité technique pour évaluer la possibilité d'estimer les effets de ces changements sur le trait de côte. Si cette possibilité est avérée, une phase d'expertise dédiée permettra de pondérer les paramètres d'évolutions du trait de côte et les scénarios de projection possibles en fonction des processus et phénomènes liés au changement climatique, en complément de l'élévation du niveau de la mer. Les processus envisagés et les effets estimés seront présentés et discutés avec soin pour justifier des choix.

Dans le cas contraire, le rapport d'étude fera état de la démarche initiée et de l'avis négatif de l'expert local.

La fiche n°3.8 développe les évolutions et les impacts des autres processus météo-marins sur le recul du trait de côte.

4 Méthodologie pour la cartographie de la projection du trait de côte

À ce stade de l'étude, la collectivité dispose de connaissances sur le fonctionnement général de son littoral, sur la mobilité passée et la dynamique d'évolution du trait de côte. Il va désormais s'agir de transposer ces connaissances en une cartographie des zones exposées au recul du trait de côte dans les prochaines décennies.

4.1 Principes méthodologiques

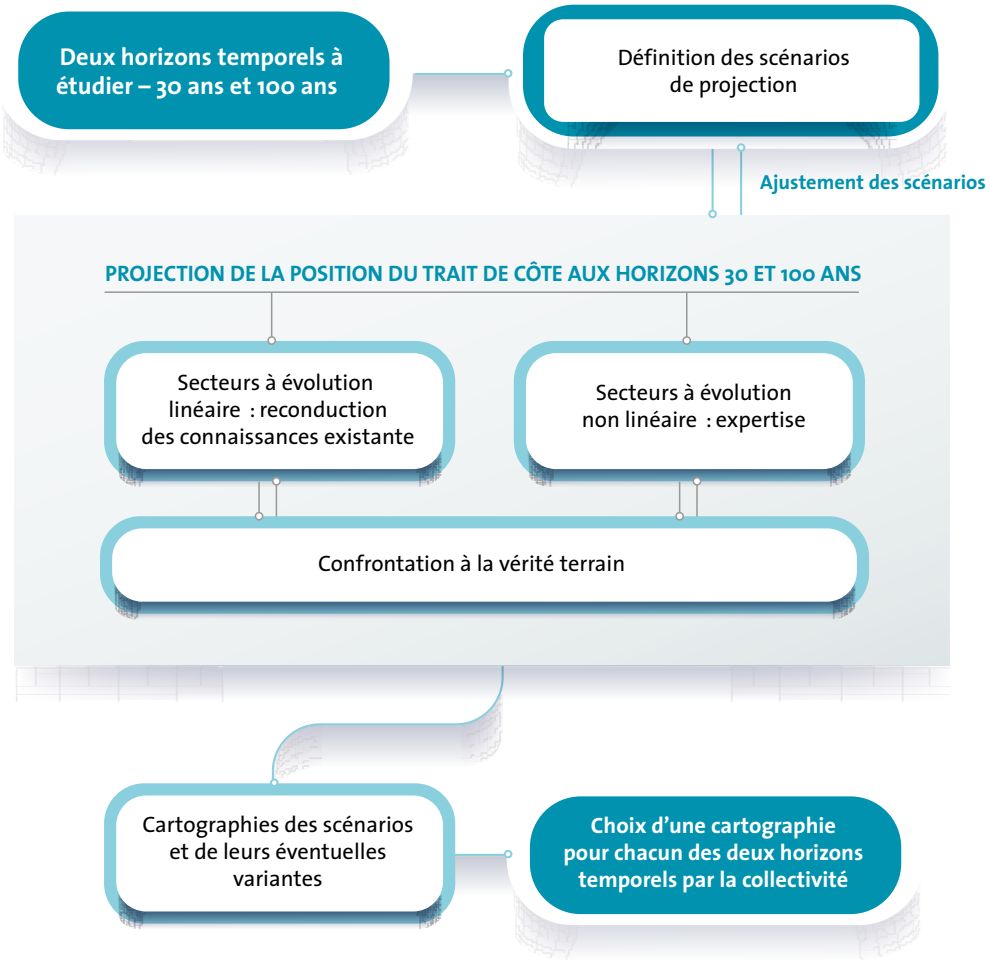


Figure 22 : Principe de l'organisation des études de la partie 4.

La carte locale d'exposition doit délimiter respectivement les zones exposées au recul du trait de côte à l'horizon 30 ans et 100 ans.

Pour construire ces projections du trait de côte, il est recommandé d'étudier un scénario dit « médian » avec des paramètres usuels et un scénario dit « sécuritaire » visant à détecter d'éventuels effets de seuils avec des hypothèses et des approches maximisant le recul du trait de côte. Les paramètres ou les valeurs à retenir de chacune des composantes pour le calcul des projections du trait de côte seront ainsi à justifier pour élaborer ces scénarios.

Entre la phase de définition des scénarios et la phase de cartographie, des ajustements sur les paramètres et modalités des projections sont à prévoir en fonction de la réalité du terrain. Celle-ci est en effet susceptible de modifier les premiers scénarios de projection.

Lorsque des paramètres influencent grandement la délimitation des zones exposées, des variantes aux scénarios peuvent être introduites dans la démarche pour aller plus loin.

Les cartographies des scénarios de projection réalisées, accompagnées par les justifications techniques, permettront aux décideurs publics de disposer de l'ensemble des éléments pour définir, en lien avec l'équipe chargée des études, les zones exposées au recul du trait de côte aux deux horizons temporels à intégrer dans le document d'urbanisme.

4.2 Horizons temporels et échelles spatiales

Le premier horizon à cartographier, l'horizon à 30 ans, correspond à une échéance de moyen terme. Elle est à la fois suffisamment lointaine pour que des évolutions du trait de côte soient significatives, et proche en termes d'aménagement durable du territoire. À l'horizon de 30 ans, il est possible que les dynamiques littorales et l'attractivité des territoires littoraux se poursuivent dans cet intervalle de temps.

La seconde cartographie est à réaliser à l'horizon 100 ans (art. L. 121-22-2 du Code de l'urbanisme). À cet horizon plus lointain, la détermination de la zone exposée devient un exercice plus prospectif et nécessite une justification rigoureuse des hypothèses et choix techniques retenus.

Les projections du trait de côte et les cartographies sont à réaliser à l'échelle du territoire. Pour un territoire parfaitement uniforme, il est envisageable que la méthode de projection soit unique. Néanmoins, dès lors que le littoral est diversifié par sa nature, son exposition aux forçages et son aménagement, les approches peuvent varier à l'échelle des cellules hydro-sédimentaires, voire des sous-cellules ou segments littoraux et que la projection finale soit issue d'une combinaison de scénarios.

4.3 Scénarios de projection du trait de côte

La réalisation de projection du trait de côte nécessite de combiner les différents éléments qui influencent l'érosion et le recul du trait de côte. Pour chaque élément, le choix des approches méthodologiques, leur paramétrage et les résultats obtenus vont influencer les projections et leur cartographie.

La définition d'un scénario permet de synthétiser le choix des approches et des paramètres nécessaires à l'estimation du recul du trait de côte pour un horizon temporel donné. La figure 23 présente de façon très synthétique les principaux éléments à prendre en compte pour bâtir des scénarios de projection du trait de côte aux deux horizons temporels de la carte locale. Pour chacun des éléments à évaluer (évolution chronique, reculs majeurs évènementiels, ouvrages, effets de l'élévation du niveau de la mer et incertitude), les approches méthodologiques présentées dans ce document sont rappelées, ainsi que les principaux paramètres ou résultats qui influencent la projection du trait de côte.

Projection : principaux éléments	Méthodes	Principaux paramètres	Scénario médian	Scénario sécuritaire
1) Évolution chronique	2 approches (§ 2.4)	Taux de recul Tx (m/an)	Tx médian	Tx (marge haute)
2) Reculs majeurs évènementiels	2 approches (§ 2.5)	Recul Lmax (m)	Recul Lmax (m)	Recul Lmax (m)
3) Ouvrages	1 approche (§ 2.6)	Pérennité	Au cas par cas	Non pérenne
4) Élévation du niveau de la mer	2 approches (§ 3.3)	Niveau de la mer	Valeurs minimales : 30 ans : + 20 cm 100 ans : + 60 cm ou projections locales basées sur GIEC SSP2-4.5	Valeurs minimales : 30 ans : + 20 cm 100 ans : + 100 cm ou projections locales basées sur GIEC SSP5-8.5
5) Incertitudes sur les résultats	2 approches (§2.7)	Marges d'erreur	Valeurs médianes	Marges hautes

Figure 23 : Principaux éléments à prendre en compte pour bâtir des scénarios de projection du trait de côte.

Pour initier le travail de projection, puis de cartographie des traits de côte, **il est proposé d'établir les scénarios suivants** (figure 23) :

- un **scénario « médian »**, représentant un traitement des données considéré comme « classique » dans les travaux de projection du trait de côte ;
- un **scénario « sécuritaire »** visant à explorer l'effet d'hypothèses et d'approches qui maximisent le recul du trait de côte.

Le scénario sécuritaire est utile pour la collectivité, notamment dans l'identification de parties potentiellement sensibles de leurs territoires, qui seraient impactées par des évolutions locales majeures, liées, entre autres, à une élévation du niveau de la mer accélérée et des effets de seuil.
Selon la connaissance locale et le détail des approches méthodologiques choisies, il peut être recommandé d'utiliser un paramétrage différent pour les deux horizons temporels.

En cours d'étude, les scénarios peuvent être déclinés en **variantes** afin de visualiser et d'approfondir l'effet de paramètres très impactant sur l'étendue des zones exposées. Les scénarios initiaux peuvent ainsi être adaptés en fonction des résultats intermédiaires de l'étude. Il s'agit d'une démarche itérative.

4.4 Projection du trait de côte - Approche « classique »

L'estimation de la position future du trait de côte à une échéance intègre les éléments suivants qui permettent de calculer des distances de recul potentiel du trait de côte à une échéance donnée :

- des **tendances d'évolution, issues des observations de la position passée du trait de côte** selon plusieurs pas de temps d'observation ;
- des **reculs évènementiels** susceptibles d'être engendrés lors de tempêtes ou de mouvements de terrain importants ;
- des **effets de la hausse du niveau marin** liée au dérèglement climatique ;
- les effets des **ouvrages et des modes de gestion locale** ;
- une analyse des incertitudes.

a. Tendances d'évolution (Tx)

Horizon 30 ans

Période d'observation à retenir pour évaluer le Tx :

Le relevé de marqueurs datés de position du trait de côte identiques permet de calculer des tendances moyennes d'évolution (Tx) sur une ou plusieurs périodes d'observations (parties 2.3 et 2.4. a).

Pour les côtes d'accumulation, il est recommandé de calculer le Tx sur une période d'observation équivalente à celle à projeter, soit ici sur les 30 dernières années, afin de travailler sur une base de moyen terme. La période d'observation sur les 30 dernières années est un ordre de grandeur puisque la production de traits de côte datés des années 1990 est conditionnée par la disponibilité des supports photographiques datant de cette période. La période d'observation peut être raccourcie si la construction récente d'un ouvrage massif et pérenne, ou une modification significative d'environnement comme le déplacement de l'embouchure d'un cours d'eau, venait à modifier considérablement les transits sédimentaires : dans ce cas, il serait préférable de retenir une période d'observation débutant après l'évènement perturbateur afin que la projection tienne mieux compte des nouvelles dynamiques sédimentaires.

Pour les côtes d'ablation, la situation est différente. Ce type de côte évolue, toujours en recul, le plus souvent ponctuellement et brutalement à la suite de tempêtes ou lors d'éboulements rocheux ou de glissements de terrain. Ces dernières évoluent aussi selon l'effet des agents continentaux (qui peuvent être prédominants pour expliquer l'origine des ruptures). À l'exception notable de certaines falaises composées de roches sédimentaires ou très altérées et de zones faillées, la vitesse moyenne de recul des côtes d'ablation est généralement très faible aux échelles de temps considérées pour la cartographie à produire. À titre d'illustration, un Tx inférieur à 0,2 m/an représenterait une projection d'environ 6 mètres de large en 30 ans, soit l'ordre de grandeur de la largeur d'un trait sur une cartographie au 1/5 000. Les reculs évènementiels peuvent être prédominants sur les côtes d'ablation (cf. partie suivante).

La période d'observation (pour les côtes d'accumulation et d'ablation) peut aussi être adaptée pour **tenir compte des actions de lutte contre l'érosion côtière et des actions issues des stratégies locales** mises en place par les collectivités ces dernières années (article L. 121-22-2 du Code de l'urbanisme). Des actions de rechargement en sable des plages ou la mise en place d'épis ou de brise-lames par exemple influencent directement le Tx. Dans le cas où il est prévu par la stratégie locale que des actions soient maintenues jusqu'à l'horizon 30 ans, la période d'observation pour la détermination du Tx peut être choisie à partir de la mise en place desdites actions. Leur pérennité doit cependant être garantie à cet horizon et **implique une inscription dans une SLGITC**.

L'estimation de la position future du trait de côte doit enfin tenir compte des **éventuelles actions de lutte contre l'érosion côtière** mises en œuvre et des **actions issues des stratégies locales** de gestion intégrée du trait de côte existantes (art. L121-22-2 du Code de l'urbanisme).

Que ce soit pour les côtes d'accumulation ou pour les côtes d'ablation, **le choix de la période d'observation pour le calcul des Tx doit être argumentée** et si possible faire l'objet d'une validation par le décideur local (« point d'arrêt » lors de l'étude).

Projection du Tx :
Les Tx sont généralement calculés selon des profils perpendiculaires au rivage ou selon des casiers. Or, les valeurs calculées du Tx pour la période d'observation choisie peuvent apparaître hétérogènes au sein d'un environnement à priori homogène. Ceci peut s'expliquer par un détail important apporté au relevé du trait de côte (le tracé apparaît « crénelé ») ou par le mode de relevé (le tracé « remonte » par exemple ponctuellement dans le chemin d'accès à la plage). Il peut ainsi être nécessaire **de lisser les valeurs de Tx par secteur homogène** (évolution similaire par type de côte) soit en moyennant les résultats ou à dire d'expert.

Les valeurs du Tx en recul sont à projeter vers les terres à partir du trait de côte de référence choisi (généralement le plus récent, sauf s'il a été relevé après un évènement très morphogène). La distance à appliquer correspond à la valeur du Tx (en m/an) multipliée par le nombre d'années séparant la date du trait de côte de référence et l'année choisie pour l'horizon à 30 ans. Par exemple, s'il est prévu d'adopter la cartographie de recul du trait de côte en 2025, sur la base d'un trait de côte de référence levé en 2020, l'horizon 30 correspond à l'année 2055. La distance à appliquer sera donc : d = 35 * Tx (35 correspondant au nombre d'années entre 2020 et 2055).

Les valeurs du Tx positives peuvent aussi être projetées vers la mer selon les mêmes principes pour information afin de montrer le caractère évolutif du trait de côte. Les secteurs potentiellement « gagnés » à l'avenir sur la mer ne seront cependant aucunement stabilisés et seront facilement érodables lors de tempête majeure.

Horizon à 100 ans

Il est une nouvelle fois recommandé que la période d'observation passée pour le calcul du Tx soit comparable à la durée prévue pour la projection à horizon 100 ans. Du fait de l'importance de la période de projection, il peut être difficile pour les collectivités de remonter sur les 100 dernières années pour connaître la position du trait de côte à cette époque puisque la Bd-Ortho Historique débute généralement dans les années 1950. Il existe cependant dans certaines régions des photographies aériennes datant des années 1920. Elles peuvent être utilisées si leur résolution permet d'observer le trait de côte et sous réserve qu'elles soient correctement géoréférencées.

Comme pour le premier horizon à 30 ans, la période d'observation passée peut être réduite pour tenir compte de modifications récentes des transits sédimentaires et des actions de lutte contre l'érosion côtière et des actions issues des stratégies locales.

En fonction des évolutions constatées selon différentes périodes d'observation, le Tx calculé pour le premier horizon 30 ans pourrait être plus élevé que celui calculé pour un horizon de 100 ans (montrant ainsi indirectement une accélération du phénomène sur une période récente). Afin d'éviter des incohérences dans cette situation, il est conseillé d'appliquer le Tx calculé pour un horizon de 100 ans à partir de la position estimée pour le premier horizon à 30 ans (et non à partir du trait de côte de référence). Et donc pour l'horizon 100 ans, d = 70 * Tx (70 correspondant au nombre d'années séparant les horizons 30 et 100 ans).

b. Reculs évènementiels

Pour la mise en œuvre de cette méthode, les reculs majeurs évènementiels sont estimés selon l'approche « Lmax », décrite partie 2.5. Cette recommandation est valable pour les différents types de côte, y compris les zones basses où les effets de submersions lors des évènements extrêmes l'emportent souvent sur l'analyse des modifications morphologiques du littoral.

■ Horizon 30 ans

Dans le cas de littoraux où ces impacts sont bien renseignés, largement connus et que des périodes de retour des évènements ont été établies, il peut être envisagé de proposer une valeur "Lmax30" correspondant à un recul dont la période de retour est de 30 ans.

Si le niveau de connaissance permet d'identifier uniquement des valeurs de reculs associées à des forçages dont la période de retour est de 30 ans, il est envisageable d'utiliser une valeur "LmaxF30" mais il est recommandé de choisir la marge haute de la gamme de reculs et de justifier le choix par un avis d'expert.

À défaut, le Lmax correspond au recul maximal ponctuel lié à un phénomène exceptionnel.

■ Horizon à 100 ans

Le Lmax correspond au recul maximal ponctuel lié à un phénomène exceptionnel comme décrit dans la partie 2.5. Pour rappel, en l'absence de valeur historique mesurée pour les phénomènes exceptionnels passés, il est recommandé de procéder, dans la mesure du possible, à des analyses complémentaires pour estimer des valeurs de reculs possibles ou avoir recours au dire d'expert pour proposer des marges d'erreur ou des pondérations sur les observations disponibles.

c. Influence du changement climatique

■ Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer

Sur une base de 2022, le document préconise comme valeur par défaut les élévations du niveau de la mer suivantes :

- à l'horizon 30 ans, la valeur a minima de +20 cm ;
- à l'horizon 100 ans, la valeur a minima de +60 cm pour le scénario médian et la valeur a minima +100 cm, pour le scénario « sécuritaire ».

Ces valeurs constituent un minimum. Il est possible de majorer ces valeurs sur la base des données de projections régionales basées sur les scénarios du GIEC, si elles existent. Il est alors recommandé de les utiliser conformément à la partie 3 de ce document.

Note : Des outils disponibles en ligne sur internet sont présentés dans ce document pour suivre l'évolution des connaissances et intégrer des projections du niveau de la mer à plus longue échéance dans les scénarios (Fiche n°3.3).

Ces valeurs d'élévation du niveau de la mer sont utilisées pour la projection du trait de côte de la manière suivante :

- pour les côtes sableuses, il est recommandé de mettre en œuvre la loi de Bruun simplifiée. Le traitement de cette approche associé à une gestion probabiliste des incertitudes associées est souhaitable ;

- pour les côtes basses pouvant subir un envahissement par la mer, il est recommandé d'identifier les zones dont l'altitude est inférieure à l'élévation du niveau de la mer attendu. Dans un premier temps (avant la phase de confrontation à la réalité du terrain cf. partie 4.6), il est recommandé de prendre en compte les zones basses directement ouvertes sur la mer dans les projections du trait de côte ;
- pour les autres types de côte, en l'absence de modèle opérationnel, l'approche générique recommandée dans la partie 3 fait intervenir une phase d'expertise visant notamment à majorer les vitesses d'évolution du trait de côte.

Évolution et impacts des autres processus météo-marins

Dans le cadre de la mise en œuvre de la méthode « classique », il est recommandé de prendre en compte l'approche présentée dans la partie 3.4 pour des projections de trait de côte à horizon 100 ans et dans le cadre d'un scénario « sécuritaire ».
Cette approche peut être menée notamment à partir des données du scénario SSP5-8.5 du GIEC.

d. Prise en compte des ouvrages et des aménagements dans la cartographie

Les ouvrages littoraux longitudinaux, comme des perrés ou des murs, figent la position du trait de côte pendant le temps de leur durée de vie. La collectivité doit s'interroger sur la pérennité de ces ouvrages existants et sur leur rôle.

Ces ouvrages ne permettent pas de contrer les phénomènes d'érosion dans la durée, mais permettent souvent uniquement de fixer le trait de côte temporairement ou de limiter ses fluctuations. Un littoral dont la ligne de rivage est en apparence fixée peut ainsi être soumis à d'autres phénomènes d'érosion pouvant se traduire par un abaissement du profil, des affouillements en pied d'ouvrages, etc. Ainsi, une zone située derrière un trait de côte artificialisé reste une zone potentiellement sujette à l'érosion en cas de défaillance ou contournement des ouvrages.

La réflexion sur le maintien ou non des ouvrages existants, qui pourra avoir de fortes conséquences dans le zonage de la carte locale d'exposition, pourra être facilitée avec l'élaboration d'une variante de scénario considérant la faillibilité des ouvrages et la ruine généralisée (pour les deux horizons temporels) afin d'identifier l'importance du rôle des ouvrages existants. Cette réflexion serait par ailleurs à mener idéalement dans le cadre de stratégies locales de gestion intégrée du trait de côte.

Le rôle de ces ouvrages pourra être maintenu dans la définition des scénarios de recul, sous réserve qu'ils bénéficient d'un gestionnaire bien identifié et soient surveillés et entretenus. Une attention particulière doit être portée aux ouvrages littoraux sans gestionnaire et/ou présentant des dégradations ou un abaissement significatif de l'estran sableux à leur base, susceptibles d'entraîner une ruine de l'ouvrage à l'horizon temporel étudié. Dans ces conditions, il est recommandé que ces ouvrages soient considérés comme **inexistants** dans la carte locale d'exposition.

Pour étudier les conséquences d'une éventuelle disparition de l'ouvrage, il est nécessaire de reconduire les hypothèses de recul appliquées sur les secteurs adjacents pour délimiter un secteur en recul derrière l'ouvrage.



Figure 24 : Illustration d'un recul accru à l'extrémité d'un ouvrage. *Géoportail.*

Il convient enfin d'être très vigilant avec les ouvrages existants qui pourraient se retrouver en avancée sur la mer en raison de forts reculs de part et d'autre de celui-ci. Une érosion accrue est très souvent observée aux extrémités des ouvrages (effet de bord). Dans cette situation, le recul du trait de côte des secteurs adjacents pourrait à terme contourner l'ouvrage.

Littoraux très artificialisés

Certaines communes possèdent un **littoral très artificialisé** par de longs ouvrages de protection fixant la position du trait de côte au droit de nombreux enjeux. Dans ce contexte, il est difficile d'étudier la mobilité du littoral et il peut sembler complexe d'envisager un recul du trait de côte dans les prochaines décennies. Cet état ne doit pourtant pas empêcher les réflexions sur l'adaptation à la hausse du niveau marin causée par la modification du climat.

En complément des cartographies établies par un éventuel PPRL comportant des dispositions relatives au risque de submersion marine et d'éventuelles règles sur les systèmes d'endiguement, des scénarios intégrant une hausse du niveau moyen des mers peuvent mettre en évidence des secteurs plus exposés que d'autres. Toujours dans cet objectif, une projection d'un Tx (établi sur des secteurs similaires en termes de géomorphologie sur des communes voisines par exemple) pourra être réalisée sans tenir compte de la présence des ouvrages.

Par exemple, des actions de suivi régulier de l'altimétrie de l'estran et des petits-fonds, de gestion des ouvrages littoraux, de rechargement en sédiments ou de toutes autres mesures favorisant le maintien de sédiments sur l'estran dans le but d'assurer un « tampon » au pied des ouvrages de protection existants.



Figure 25 : Littoral artificialisé à Saint-Martin-de-Ré. Laurent Mignaux/Terra

Projets d'ouvrage de protection

S'il s'agit d'une action issue d'une stratégie locale de gestion intégrée du trait de côte (SLGITC) mise en œuvre par la collectivité territorialement compétente (au sens de l'article L. 121-22-2 du Code de l'urbanisme), la carte locale d'exposition au recul du trait de côte peut tenir compte d'un projet de **construction d'un nouvel ouvrage de protection** contre la mer dès lors que ses prescriptions techniques sont suffisamment précises et son plan de financement arrêté.

4.5 Projection pour évolutions non-linéaires – Approche « experte »

Le fonctionnement de certaines portions des territoires littoraux apparaît parfois particulièrement complexe, l'analyse des données existantes ne montrant pas de tendance d'évolution du trait de côte suffisamment marquée et linéaire. La mise en œuvre de l'approche « classique » pour définir des scénarios et réaliser les travaux de projection du trait de côte est alors rendue difficile. Dans ces situations, il est recommandé d'adopter une approche experte, basée sur des analyses complémentaires des données. Ce document propose des pistes de travail pour initier ces démarches pour deux éléments :

- tendance d'évolution et recul chronique. L'approche experte est basée sur l'analyse des variations temporelles du recul (partie 2.4. b) et la formulation de scénarios d'évolution de la vitesse de recul dans le temps ;
- reculs majeurs évènementiels. L'approche experte vise à formuler des scénarios paroxysmaux (partie 2.5. b) ; prenant en compte différents types d'évènements majeurs et leurs impacts sur le fonctionnement littoral.

a. Tendances d'évolution (Tx)

Les littoraux complexes sont constitués de segments qui présentent des caractéristiques variées, en termes de géomorphologie et d'évolution temporelle. Sur tout ou partie des segments complexes, l'analyse des données disponibles ne permet pas toujours d'établir clairement des tendances d'évolution chronique constante du trait de côte (cf. Fiche n°2.4).

L'analyse détaillée du fonctionnement de ces littoraux doit amener à comprendre les phénomènes à l'origine de la dynamique du milieu (partie 2.4. b), à l'échelle spatiale des segments littoraux et des cellules hydro-sédimentaires du territoire.

La réalisation de projection du trait de côte pour ces cas peut passer par l'utilisation de modèles à complexité réduite calibrés pour le site d'étude ou par la définition de scénarios d'évolution du trait de côte adapté pour ces littoraux. La formulation des scénarios et le choix de taux de recul à dire d'expert permet de proposer des variantes plus ou moins sécuritaires.

À titre d'exemple, la Fiche n°4.1 propose trois cas théoriques de côtes complexes, nécessitant la formulation de scénarios d'évolution qui impliquent des évolutions temporelles et spatiales des taux de recul du trait de côte.

b. Reculs évènementiels

Pour compléter l'estimation du paramètre Lmax, ce document de recommandations propose une approche qui vise à définir un scénario d'évolution paroxysmal en lien avec un évènement énergétique majeur. Comme détaillé dans la partie 2.5. b), il s'agit d'estimer le recul direct et instantané sur le trait de côte, mais également l'ensemble des effets négatifs envisageables à long terme : rupture permettant un envahissement chronique ou permanent par la mer de zones basses, épuisement soudain du stock sédimentaire impliquant une augmentation du recul chronique, remise en cause du fonctionnement d'ouvrages retro-littoraux, etc.

À l'horizon 30 ans, cette approche est recommandée pour la mise en œuvre d'un scénario sécuritaire, pour un littoral particulièrement sensible aux reculs évènementiels. Le scénario à bâtir doit prévoir une date pour l'évènement et une interaction avec la phase de projection du recul chronique (Tx).

À l'horizon 100 ans, cette approche peut être mise en perspective avec l'élévation du niveau de la mer qui va accroître significativement l'impact des évènements énergétiques, limiter les temps de reconstruction naturelle et renforcer l'intérêt d'anticiper ces scénarios paroxysmaux.

4.6 Confrontation des projections à la réalité du terrain

Les projections du trait de côte produites et cartographiées aux deux horizons temporels sur la base des deux scénarios principaux sont à confronter à la réalité de terrain. Il est, en effet, indispensable d'examiner soigneusement l'interaction possible des projections du trait de côte avec des terrains de différentes natures (lithologie, hydrologie, occupation du sol) ou de géomorphologie différente (ex. : zones basses).

Dans cette analyse, il est également nécessaire de retenir que la spécificité du marqueur du trait de côte projeté (jet de rive, limite de végétation, etc.) ne reflète pas toujours l'évolution globale de l'ensemble du système littoral.

a. Nature des terrains affectée par les projections

Le calcul des distances de projections du recul du trait de côte aux deux horizons temporels s'appuie en partie sur nos connaissances des évolutions et des évènements ayant affecté par le passé le littoral.

Il convient donc de s'assurer que les projections du trait de côte affectent des terrains aux caractéristiques similaires à ceux déjà disparus. En effet, les projections du trait de côte, surtout si elles s'étendent assez profondément vers les terres, peuvent affecter des terrains avec une géomorphologie ou une géologie différente. Ce serait par exemple le cas d'une projection d'un trait de côte d'un littoral sableux rencontrant une falaise morte. Les projections sont également susceptibles d'atteindre des points durs comme une route en remblai ou encore des aménagements portuaires. Des choix seront à réaliser pour éventuellement limiter la projection au niveau des points durs ou pour la moduler en fonction de la géomorphologie/géologie rencontrée.

b. Zones basses du littoral

Les projections réalisées dans le cadre des scénarios sont à confronter avec la topographie de l'arrière littoral. Un croisement de données entre le niveau de la mer retenu dans les scénarios et une topographie issue d'un MNT comme Litto3D permettra d'identifier les zones basses (cf. partie 3.3.b).



Figure 26 : Exemple d'un profil altimétrique réalisé sur le **Géoportail** *identifiant une zone basse située derrière un cordon dunaire (point bas du profil à +0,57 m NGF).*

Ce travail permet d'identifier les zones basses, y compris celles non connectées à la mer. Dans ce dernier cas, il est vivement recommandé d'examiner les caractéristiques et la nature des terrains situés entre la mer et la zone basse. Ceux-ci pourraient connaître une dégradation, voire une disparation, avec le recul du trait de côte ou subir des brèches lors de tempêtes. L'étude de variantes (cf. partie 2.5. b) ou la mise en œuvre d'une approche « experte » (cf. Fiche n°2.5) est vivement recommandée si de telles situations sont rencontrées.

c. Vigilance particulière sur les marqueurs du trait de côte utilisés

Comme expliqué en partie 2, les connaissances sur l'évolution du littoral s'appuient très généralement sur des études diachroniques où le déplacement de marqueurs de position du trait de côte est suivi dans le temps. Ces marqueurs sont généralement la limite de végétation, bien visibles sur les photographies aériennes, même anciennes, et sur le terrain. L'indicateur national de l'érosion côtière a ainsi démontré que ces limites de végétation peuvent être suivies sur les trois-quarts du linéaire côtier français. Ce type de limite présente l'avantage, dans de nombreuses situations, de séparer distinctement les domaines continentaux et maritimes.

Des secteurs sont donc étudiés avec d'autres marqueurs de position du trait de côte. Par exemple, pour les falaises le marqueur « haut de falaises » est souvent privilégié lorsqu'il existe une rupture de pente bien marquée. Ce marqueur est adapté à la finalité des cartes locales d'exposition. En revanche, sur certains secteurs à falaises, c'est le marqueur « pied de falaises » qui est utilisé à défaut d'autres marqueurs bien visibles. C'est donc uniquement cette ligne correspondant au pied de falaise qui est projetée dans le futur. Le zonage de la carte locale d'exposition doit alors tenir compte d'une surlargeur correspondant à l'espace de pente de la falaise.

Un autre marqueur appelle également une vigilance particulière : la limite du jet de rive. Ce marqueur est généralement utilisé pour les environnements micro-tidaux (très faibles marées), en particulier pour les côtes basses sableuses de toute la façade méditerranéenne. La ligne projetée dans le futur correspond alors globalement à la limite de la mer (par temps calme). La collectivité doit alors s'interroger sur une possible disparition de la plage et la possibilité d'intégrer dans la carte locale une zone pour conserver son environnement.

Le front de mangrove est un marqueur de végétation un peu particulier, car la mangrove peut entièrement disparaître. Si cette situation est cartographiée dans un des scénarios de projection, il sera alors nécessaire de considérer l'exposition au recul des terrains jusqu'à présent protégés par la mangrove.

De nombreux autres types de marqueurs existent et il est donc conseillé de préciser systématiquement le type de ligne cartographiée et de s'assurer qu'elle reflète bien la limite de la zone exposée au phénomène de recul du trait de côte.

4.7 Cartographie et choix des scénarios

La cartographie à intégrer dans les documents d'urbanismes, pour les horizons 30 ans et 100 ans, résultera des scénarios et des variantes retenus. Ces choix relèvent d'une discussion entre l'équipe technique et scientifique qui produit les études et les décideurs publics qui portent les orientations d'aménagement et d'adaptations des territoires littoraux. **Ces choix auront des conséquences en matière d'aménagement dans le cadre de l'exercice de leur compétence en matière d'urbanisme.**

Les scénarios retenus peuvent être différents entre les deux horizons temporels à cartographier afin de correspondre à d'éventuelles stratégies locales différentes sur court/moyen et sur le long terme.

Tous les scénarios étudiés, même ceux non retenus, restent néanmoins très utiles pour mettre **en évidence les éléments clés du territoire à surveiller et à préserver** (cordon dunaire par exemple) et les conséquences en termes de recul du trait de côte s'ils venaient à disparaître. Ils contribuent par exemple à **définir des actions de suivi et de gestion** du trait de côte à engager, ou à adapter, idéalement dans le cadre d'une SLGITC. Les différents scénarios produits sont enfin d'excellents outils pour **sensibiliser** les acteurs locaux et la population sur le bien-fondé des stratégies locales.

4.8 La représentation cartographique

Le choix des informations à afficher, des couleurs, de l'échelle de restitution ou encore du fond de plan participe à une meilleure compréhension des cartes produites.

Les recommandations de cette partie sont d'une portée générale puisque le mode de représentation cartographique dépendra principalement de l'emprise de la zone d'étude, de la configuration de la côte et de la largeur des zones exposées. Le format sera adapté pour qu'elles puissent être versées en version dématérialisée, au même titre que les servitudes, sur le portail national de l'urbanisme (art. L133-1 du Code de l'urbanisme).

La cartographie doit permettre de bien visualiser les informations principales, à savoir le zonage pour les deux horizons temporels. En fonction de la largeur des zones de projection du trait de côte, **l'échelle de restitution** des résultats pourra être de l'ordre du 1/10 000. Il pourra être **envisagé des zooms au 1/5 000** au droit des secteurs à enjeux afin de faciliter la prise en compte de la cartographie dans le document d'urbanisme.

Le choix du **fond de plan** a également une grande importance pour bien localiser les délimitations des zones exposées. Il est possible d'afficher une **photographie aérienne** en fond de plan, comme la BD ORTHO® ou l'Ortholittorale®. Ces images pourront éventuellement être éclaircies ou moins contrastées, voire affichées en nuances de gris, afin de mieux faire ressortir le zonage. D'autres fonds de plan comme le parcellaire, le Plan IGN® ou le SCAN Littoral® (assemblage du Scan 25® et des cartes marines du SHOM) sont également possibles. Il est vivement recommandé d'utiliser un fond de plan dont la date de production est proche de celle du trait de côte de référence (à partir duquel le zonage débute), en particulier dans le cas d'une utilisation d'une photographie aérienne, afin d'éviter des incohérences (en particulier en cas d'évolution rapide de la position du trait de côte).

En veillant à ne pas surcharger la carte, des données « vecteur » peuvent être ajoutées au-dessus du fond du plan afin de renforcer la compréhension de la cartographie, en particulier celles de la BD TOPO®, comme les axes routiers, le nom des rues, le tracé des cours d'eau, l'emprise des bâtiments, etc.

Comme présenté précédemment, les deux zonages sont issus de plusieurs composantes (Tx, orientations de gestion, etc.). La carte finale étant rendue publique, dans un souci d'en faciliter la lecture, il est conseillé de représenter la résultante, et non pas toutes les composantes. Les deux zonages pourront être affichés sur la même carte avec un soin particulier apporté à leur représentation. Une simple ligne correspondant aux horizons temporels 30 ans et 100 ans pourrait être suffisante. L'emprise des zonages peut également être affichée, par des hachures ou par une zone colorée sous réserve qu'elle ne masque pas la lisibilité du fond de plan.

Il n'y a pas de couleur recommandée, avec néanmoins une remarque sur l'utilisation du rouge et du bleu qui pourrait induire des confusions avec la cartographie réglementaire des PPR, d'autant plus si la commune possède déjà un PPRL comportant des dispositions relatives au recul du trait de côte (dans ce cas, la carte locale d'exposition et le PPRL peuvent coexister jusqu'à une année, art. L. 562-4-1 du Code de l'environnement).

S'ils aident à mieux comprendre les zonages, il est vivement recommandé d'afficher les ouvrages littoraux existants, éventuellement projetés, déconstruits, renforcés d'après les orientations de la SLGITC. La position des traits de côte historiques (au moins les plus représentatifs) peut aussi être affichée (avec leur date) sur les cartes afin d'assurer une meilleure sensibilisation aux reculs déjà observés sur le territoire.

Les éléments usuels d'une cartographie sont enfin bien évidemment à afficher : barre d'échelle, orientation, légende et titre. Il est conseillé d'indiquer les deux horizons temporels choisis dans le titre. L'ajout d'un cartouche résumant les principales hypothèses et orientations choisies pour aboutir aux zonages est conseillé. Un plus petit espace peut aussi être réservé pour le renvoi vers le rapport d'étude ou sa synthèse afin d'obtenir davantage d'informations sur les conditions d'élaboration de la cartographie.

❺ Usages et limites de la cartographie

La carte locale d'exposition au recul du trait de côte propose une **estimation de la zone exposée à un recul du trait de côte** à deux échéances temporelles : 30 ans et 100 ans. Cette estimation résulte de l'application de méthodes de projection basées sur des constatations scientifiques et d'orientations locales stratégiques d'aménagement et d'adaptation des territoires littoraux. **Il ne s'agit en aucun cas d'une prédiction** dont les résultats de projection seraient certains.

Cette cartographie intègre une part d'incertitude. Elles proviennent en particulier de la complexité du milieu littoral qui rend les projections difficiles, des multiples conséquences du changement climatique dont l'intensité des effets dépend de la quantité de gaz à effet de serre dans les prochaines années, des effets difficilement quantifiables des mesures de gestion mises œuvre, de la pérennité des ouvrages de protection, de notre capacité à préserver les cordons dunaires. Des recommandations sont faites dans ce document pour évaluer les incertitudes et les prendre en considération.

De nombreux choix ont donc été opérés pour produire la carte locale d'exposition. Le plus important est d'être **capable d'expliquer et de justifier les choix**.

Lorsqu'elles existent, la carte locale d'exposition tient compte également des actions issues des stratégies locales. Si l'une de ces composantes évolue ou n'est pas respectée, la carte locale d'exposition doit pouvoir être révisée.

Il est attendu que la carte locale d'exposition tienne compte de l'élévation du niveau marin dans les prochaines décennies avec au moins une cartographie de cette élévation sur la topographie des zones littorales. En fonction des études des collectivités, les processus érosifs pourront intégrer cette hausse. D'autres effets possibles du changement climatique sur la modification des environnements littoraux ne sont pas pris en compte, comme l'avancée du biseau salé, la modification de l'écoulement des fleuves côtiers et des risques d'inondation associés ou encore le développement de nouvelles zones humides avec l'élévation du niveau marin.

Comme son nom l'indique, cette carte ne traite que du recul du trait de côte, résultant des phénomènes érosifs et de la hausse du niveau marin. La carte locale d'exposition ne tient donc pas compte des risques de submersion marine générés par des niveaux marins extrêmes lors des tempêtes. Les communes exposées à ce dernier risque sont généralement couvertes par un plan de prévention des risques qui traite de cet aléa.

Enfin, l'aléa migration dunaire peut être considéré comme une conséquence de l'érosion côtière, mais il ne s'agit pas proprement dit d'un recul du trait de côte (au sens de la limite entre les milieux marins et continentaux) : il peut être étudié par les collectivités à la suite de l'approbation de la cartographie d'exposition locale au recul du trait de côte. Certaines communes sont déjà couvertes par un PPRL intégrant cet aléa dunaire.

6 Modalités pratiques

6.1 La production des cartographies

a. Conseils pour la commande des études

La réalisation des cartes locales d'exposition au recul du trait de côte nécessite une première identification des ressources (données et études existantes) afin de mieux dimensionner le contenu des études à réaliser. La partie 2 du document apporte des recommandations en ce sens.

À l'issue de la phase de recherche d'informations, la collectivité devrait être en mesure de savoir si des études relatives à la mobilité du trait de côte existent sur son territoire et si des données, comme la position datée du trait de côte ou des ouvrages littoraux, peuvent être exploitées. Une liste de ces documents peut alors être établie et être communiquée à l'équipe chargée des études techniques.

Le cahier des charges de l'étude rappellera les échéances temporelles des cartographies, à l'horizon 30 ans et à l'horizon 100 ans. Il définira également l'emprise des études (qui dépassera généralement les limites communales pour comprendre les dynamiques sédimentaires au sein de la cellule hydro-sédimentaire) et celle de la cartographie à produire. Un regroupement de commandes entre communes voisines appartenant à la même cellule hydro-sédimentaire apparaît particulièrement opportun dans ce contexte.

En cas de présence d'ouvrages et/ou de zones basses sur le territoire communal, le cahier des charges peut déjà prévoir des scénarios sur ces thématiques. Ce point pourra alimenter des réflexions dans le cadre d'une SLGITC.

Afin de respecter l'article L. 121-22-2 du Code de l'urbanisme, le cahier des charges doit commander spécifiquement, en plus du rapport d'étude décrivant et justifiant toutes les hypothèses étudiées, la synthèse des études techniques prise en compte et la synthèse des actions de lutte contre l'érosion côtière et des actions issues des stratégies locales de gestion intégrée du trait de côte mises en œuvre.

Il est enfin recommandé de prévoir une ultime phase de cartographie pour adapter si besoin les contours du zonage aux limites cadastrales afin de faciliter ultérieurement l'instruction des dossiers d'urbanisme.

Afin d'illustrer la synthèse des connaissances, il pourrait être intéressant de prévoir la réalisation de cartes informatives sur les évènements passés et les éléments de connaissances sur les phénomènes.

Le cahier des charges spécifiera enfin le format des fichiers SIG qui seront échangés et livrés et demandera une description des champs attributaires de ces fichiers, ainsi qu'une vérification topologique et géométrique des entités relevées sur SIG.

b. Conseils pour le suivi des études

Il est préférable de prévoir dès les premiers échanges avec l'équipe de production des « points d'arrêt » réguliers afin de valider les éléments clés au fur et à mesure de l'avancement des études. Quelques propositions de validation intermédiaire (non exhaustives) :

- synthèse des études existantes ;
- validation des périodes d'observation de la mobilité passée du trait de côte ;
- définition des scénarios à étudier ;
- choix des scénarios à retenir pour la carte à intégrer au document d'urbanisme ;
- validation de la synthèse des études et des actions prises en compte dans l'étude.

Afin d'éclairer les choix des décideurs locaux, l'équipe chargée de la production doit pouvoir expliquer et justifier par écrit chaque hypothèse retenue.

Selon la difficulté technique, il peut être conseillé aux décideurs locaux de s'entourer d'un assistant à maîtrise d'ouvrage pour les aider à mieux définir leurs attentes et mieux dialoguer avec l'équipe chargée de produire la carte locale d'exposition.

Il est conseillé de prévoir une visite sur le terrain, associant décideurs locaux et équipe de production, afin d'échanger sur le contexte local et les orientations d'aménagement déjà approuvées (dans le cadre d'une stratégie locale par exemple) pour les prochaines décennies.

6.2 Communiquer sa cartographie

La démarche de cartographie peut s'accompagner d'actions visant à associer et à sensibiliser le public, en complément de celles prévues par la stratégie locale de gestion intégrée du trait de côte.

Dès le début de l'étude lors de la synthèse des connaissances, il peut être pertinent de recueillir auprès des habitants des cartes postales/photos anciennes du littoral ou des témoignages sur les conséquences d'un évènement majeur passé.

À l'issue de cette synthèse, il peut être intéressant de partager les premières avancées de l'étude, à l'occasion d'une exposition ou d'un article, à l'aide d'une cartographie représentant les positions datées du trait de côte. Ce type de cartographie est facilement compréhensible et permet une sensibilisation au phénomène de recul du trait de côte de la population qui pourra implicitement intégrer une projection du trait de côte vers les terres (dans le cas d'une évolution linéaire du trait de côte). L'affichage de photographies ou de témoignages sur les évènements passés est également vivement souhaitable pour renforcer la sensibilisation de la population.

La finalisation de cartes locales d'exposition peut être l'occasion d'une présentation et d'échanges vers et avec la population. À cette occasion, il peut être opportun de s'entourer d'experts (bureaux d'étude, universitaires, observatoires, opérateurs publics, etc.) pour remettre la cartographie dans son contexte (explication du fonctionnement du littoral, effets du changement climatique, adaptations nécessaires des territoires littoraux, etc.) et pour répondre aux questions techniques.

6.3 Mise à jour de la cartographie

Les connaissances sur les dynamiques littorales s'améliorent en permanence et peuvent apporter de nouveaux éléments scientifiques ou de nouvelles méthodes d'évaluation des aléas susceptibles d'interroger la pertinence les cartes locales d'exposition produites. De plus, de nouveaux évènements naturels, comme la modification de l'embouchure de cours d'eau, ou anthropiques, comme la construction d'ouvrage, peuvent être à l'origine de perturbations des transits sédimentaires.

De nouvelles estimations du GIEC pourraient également conduire une réévaluation des niveaux marins à prendre en compte pour la cartographie sur le plus long terme.

Enfin, l'élaboration ou la révision d'une stratégie locale de gestion intégrée du trait de côte et, dans ce cadre, la définition d'actions de gestion du trait de côte ou d'orientations d'aménagements peuvent également interroger la pertinence de la cartographie locale d'exposition intégrée au document d'urbanisme.

La carte locale d'exposition au recul du trait de côte n'est donc pas figée dans le temps et est susceptible d'être mise à jour en fonction de l'amélioration des connaissances et d'éventuelles réorientations d'aménagement/adaptation des territoires littoraux. En complément des dispositions existantes sur les délais de modification/révision des PLU, l'article L. 121-22-11 du Code de l'urbanisme impose, dans un délai de six ans à compter de l'entrée en vigueur de la carte communale révisée intégrant la cartographie locale de recul du trait de côte et si la projection du recul du trait de côte le justifie, soit d'engager la révision de la carte communale, soit de maintenir la carte communale en vigueur, soit de prescrire l'élaboration d'un PLU établissant une carte locale d'exposition de son territoire au recul du trait de côte.

Sur le court terme et avant d'atteindre les délais légaux de révision des documents locaux d'urbanisme, des évènements majeurs ou une série d'évènements peuvent survenir et engendrer ponctuellement de forts reculs. Ces reculs peuvent questionner la pertinence de la cartographie en vigueur et conduire à envisager une révision. Un suivi régulier de la position du trait de côte permet généralement de mettre en évidence ce phénomène et peut apporter un éclairage très utile lors de situations de crise après des tempêtes majeures.

Pour aller plus loin, développement des approches méthodologiques

Cette section, comportant 17 fiches techniques, est à destination de lecteurs cherchant des détails sur les approches présentées dans les différentes parties.

Fiche technique pour la partie “Éléments introductifs”

Liens utiles

- Texte de la loi « Climat et résilience » promulgué le 24 août 2021 au Journal officiel (Articles 236 à 251 : Adapter les territoires aux effets du dérèglement climatique) : www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924
- Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte *(Géolittoral)* : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/strategie-nationale-de-gestion-integree-du-trait-r434.html
- Indicateur national de l’érosion côtière *(Géolittoral)* : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/indicateur-national-de-l-erosion-cotiere-r473.html
- Rapport du Cerema « Évaluation prospective des enjeux affectés par le recul du trait de côte » : https://doc.cerema.fr/Default/digital-viewer/c-15951 et son résumé : www.cerema.fr/system/files/documents/2019/10/evaluation_enjeux_potentiellement_atteints_part_recul_trait_cote_v_octobre_2019.pdf
- Publication « À l’interface entre terre et mer : la gestion du trait de côte » : www.mementodumaire.net/wp-content/uploads/2012/07/Gestion_du_trait_de_cote.pdf
- Page internet du ministère de la transition écologie sur l’adaptation des territoires aux évolutions du littoral : www.ecologie.gouv.fr/adaptation-des-territoires-aux-evolutions-du-littoral

Fiche 1.1 : Un phénomène mondial aux origines anciennes

Le phénomène d’érosion côtière affecte tous types de côtes au niveau mondial et trouve son origine dans les modifications passées du climat. Les littoraux que nous connaissons aujourd’hui ont en effet été façonnés par les éléments naturels pendant des milliers d’années.

Les sédiments (vase, sable, graviers et galets) présents sur nos côtes proviennent majoritairement de **l’intense érosion continentale intervenue lors de la dernière glaciation** (entre -115 000 et -12 000 ans). Lors de cette période, le niveau marin était bien plus bas (d’environ une centaine de mètres) et les terres émergées, mal protégées par une végétation rase adaptée au climat froid, subissaient des phénomènes érosifs liés à l’alternance du gel et du dégel, générant des volumes considérables de matériaux qui ont été charriés jusqu’à la mer.

À la faveur d’un climat plus chaud, la fonte des inlandsis (grands glaciers s’étendant jusqu’aux plaines) a provoqué **une hausse du niveau marin jusqu’à une relative stabilisation il y a 6 000 ans**. Pendant cette période, l’envahissement par la mer de la plateforme continentale a redistribué une partie du stock sédimentaire pour modeler les formes littorales que l’on observe aujourd’hui.

Les sédiments présents actuellement sur le littoral constituent pour partie **un stock hérité** : les pertes liées notamment au transfert des sédiments vers les grands fonds et l'érosion éolienne ne sont pas suffisamment compensées par l'érosion des falaises et celles des reliefs continentaux (les apports en sédiments des cours d'eau ont été significativement diminués en raison des activités humaines comme la construction de retenues d'eau ou les extractions). **Cette situation explique le déficit en sédiment et engendre une érosion chronique des littoraux constatée à l'échelle du globe**.

Les côtes d'accumulation, qui résultent de l'accumulation progressive de sédiments d'origine continentale et marine, se caractérisent par une mobilité permanente donnant au trait de côte une géométrie variable avec des phases d'avancée et de recul. Ces transformations s'observent à divers pas de temps, du siècle à la saison (profil de plage d'hiver et d'été), et même au sein d'un cycle de marée. La configuration du littoral peut même évoluer significativement en quelques heures lors de très fortes tempêtes.



Figure 27 : Exemple d'une côte d'accumulation – Plage de la Grande Côte entre Ronces-les-Bains et la Palmyre.
Laurent Mignaux/Terra

Les **côtes d'ablation**, composées de côtes à falaises et de côtes basses rocheuses, ne peuvent que reculer. Leur recul est souvent complexe à appréhender en raison de la combinaison des actions continentales (infiltration, ruissellement...) en haut de falaise et des actions directes de la mer qui s'exerce sur les massifs rocheux de caractéristiques très diverses (lithologie, altération, fracturation...).

Le recul du trait de côte s'étudie sur de longues périodes pour comprendre la mobilité du littoral. Les côtes basses sableuses peuvent connaître des tendances d'évolution de l'ordre du mètre par an. Ces tendances peuvent atteindre plusieurs mètres par an (sur des périodes de plusieurs années d'observation) dans des secteurs très évolutifs comme à la pointe du Cap-Ferret, en Camargue ou encore sur les côtes de Guyane.



Figure 28 : Exemple d'une côte d'ablation – Falaises de la Côte d'Opale. *Laurent Mignaux/Terra*

Les valeurs de reculs sont moins importantes sur les côtes rocheuses sur le temps long. Hors zones sensibles (zones faillées, venue d'eau, etc.), une côte rocheuse composée de granite reculera en moyenne de 0,001 m/an, soit 10 cm/siècle. Les falaises rocheuses peuvent néanmoins reculer, ponctuellement, de plusieurs mètres en un seul évènement lors d'un mouvement de terrain de grande ampleur. Ces falaises ne peuvent que reculer, à la rare exception des coulées de lave atteignant la mer (éruption du Piton de la Fournaise à la Réunion par exemple) comme l'indique la figure ci-dessous.

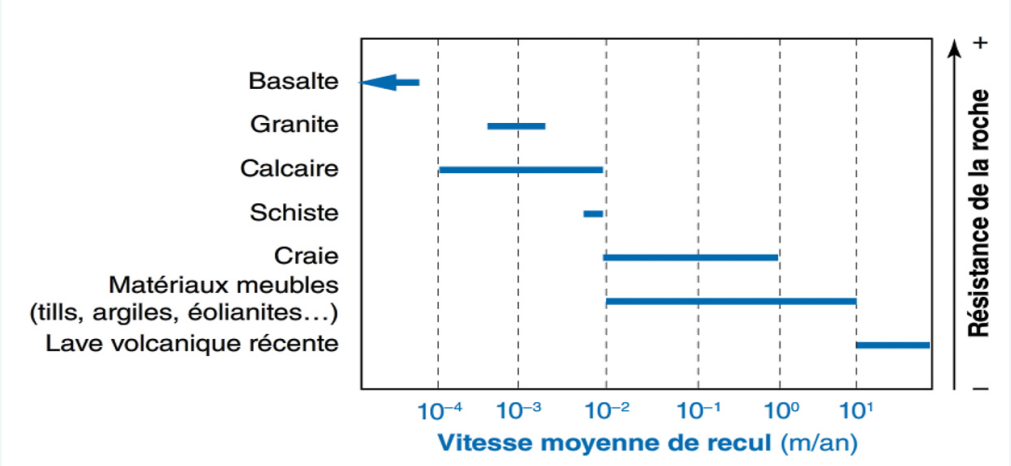


Figure 29 : Recul moyen des falaises en fonction de la lithologie. *Costa et Lebreton, 2010, fig. 1.13, d'après Woodroff, 2002*[5]

5 – MEDDE, 2010. *La gestion du trait de côte*, ed. Quae. 289 p.

Fiches techniques pour la partie “Connaissance de la mobilité du littoral”

Liens utiles

- Site internet du RNOTC (Réseau national des observatoires du trait de côte) : observatoires-littoral.developpement-durable.gouv.fr/
- Portail Géolittoral : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/
- Espace de téléchargement de données de *Géolittoral* : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/telechargement-en-ligne-donnees-geolittoral-a802.html
- Portail du *Shom* : data.shom.fr/
- Portail *Géorisques* : www.georisques.gouv.fr/
- Portail du *BRGM* : infoterre.brgm.fr/
- Plateforme documentaire du *BRGM* : www.brgm.fr/fr/resultats-donnees-references-publications-brgm
- Portail le l’*IGN* : www.ign.fr/carto
- Portail « Gestion du trait de côte » du *Cerema* : www.cerema.fr/fr/activites/mer-littoral/gestion-du-littoral-mer/gestion-du-trait-cote
- Plateforme documentaire du *Cerema* : doc.cerema.fr/
- Guide PPR Littoral (MTE, 2014) : www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Guide%20PPRL%20-%20version%20finale%20mai%202014.pdf
- Indicateur national de l’érosion côtière *(Géolittoral)* : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/indicateur-national-de-l-erosion-cotiere-r473.html
- Cartographie nationale des ouvrages et aménagements *(Géolittoral)* : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/cartographie-nationale-des-ouvrages-et-r502.html
- Dynamiques et évolution du littoral - synthèse des connaissances des côtes françaises *(Géolittoral)* : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/dynamiques-et-evolution-du-littoral-synthese-des-r462.html
- Téléchargement du logiciel *MobiTC* : github.com/CEREMA/dtermed.MobiTC
- Accès aux millésimes de l’Ortholittorale : www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr/orthophotographie-du-littoral-r181.html

Fiche 2.1 : Méthodes d’observation et de suivi du trait de côte

Le logigramme principal propose une vision synthétique des approches permettant l’acquisition de données de traits de côte à partir des outils de suivi et d’observation du milieu littoral.

Trois types de méthodes sont distinguées et détaillées dans la suite du logigramme :

- méthodes basées sur des données linéaires (transects, profils de plages, suivi de marqueurs). Les données de terrain sont obtenues grâce au positionnement GPS d’indicateurs paysagers, observables par un opérateur ;
- méthodes basées sur la télé détection et les orthophotographies. Ces données de télédétection sont obtenues grâce à différents porteurs mobiles (satellites, avion, hélicoptère, drones) ou sont fixes (vidéo). Elle nécessite un travail de post-traitement pour analyser les images et positionner précisément les indicateurs de suivi ;
- méthodes basées sur les MNT. Les mesures sont acquises par des moyens de télédétection (relevés par Lidar, photogrammétrie) ou des campagnes de terrain grâce à des moyens topo-bathymétriques.

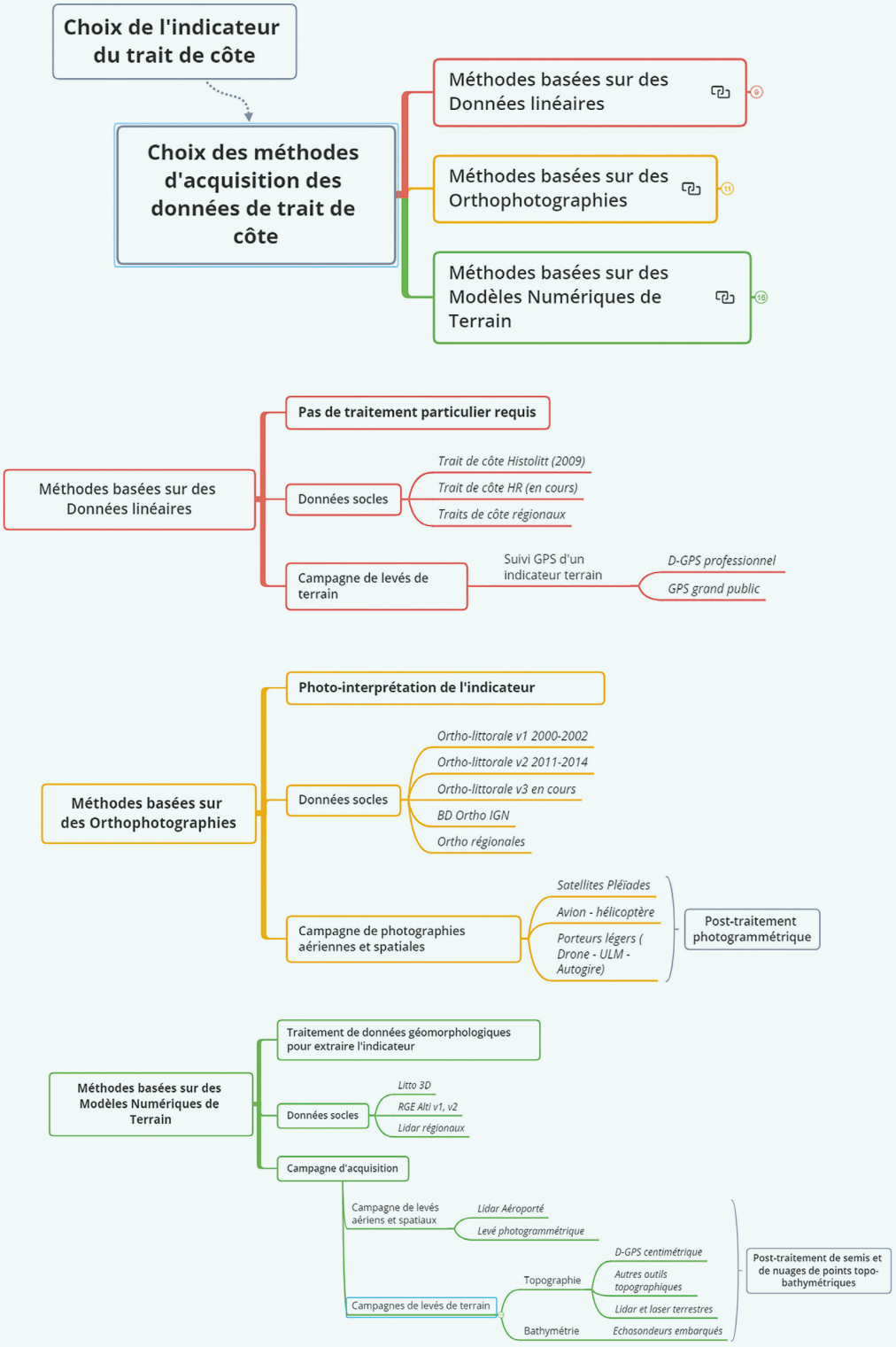


Figure 30 : Méthodes d'observation et de suivi du trait de côte. BRGM

Fiche 2.2 : Relevé de traits de côte supplémentaires

S'il est nécessaire de relever de nouveaux traits des côtes, le meilleur marqueur à choisir pour les numérisations est celui qui existe déjà dans les données récupérées afin de pouvoir comparer et analyser les dynamiques du trait de côte.

Les traits de côte à partir de 2000 pourront être relevés à partir des supports suivants :
- la BD ORTHO® IGN ;
- l'imagerie satellitaire (les images Pléiades possèdent la résolution nécessaire) ;
- les orthophotographies réalisées par une structure locale ;
- l'Ortholittorale V1 et V2 (voire l'Ortholittorale V3 en cours de production).

Des relevés au DGPS sont également possibles, tout comme l'utilisation de relevés topographiques pour positionner précisément des hauts de falaises ou des pieds de dune par exemple.
Les traits de côte les plus anciens peuvent être relevés à partir de la BD ORTHO® Historique de l'IGN dont les clichés datent des années 1950-1965. Il est nécessaire de consulter le mosaïquage afin de connaître précisément l'année de prise de vue (le nom du fichier pouvant induire en erreur). Il existe peu de sources disponibles à l'échelle nationale entre les années 1960 et 2000, mais il est assez courant que des structures en région aient produit ou récupéré des séries exploitables de cette époque.

L'IGN propose enfin le téléchargement d'une importante collection d'images aériennes brutes. Ces clichés ne sont pas géoréférencés, ni orthorectifiés. Ils ne sont donc pas recommandés pour le relevé de la position du trait de côte, mais ils peuvent être précieux pour comprendre la dynamique du littoral.

Le relevé des marqueurs de la position du trait de côte intègre toujours une part d'incertitude liée à :
- l'ortho-rectification (en fonction du relief et de l'angle de prise de vue, le calage de l'image peut varier significativement au sein d'un même cliché, y compris sur supports récents) ;
- la qualité des clichés originaux (netteté, contraste, colorimétrie, déformation de l'optique) ;
- l'interprétation de l'opérateur (notamment dans les zones de végétations clairsemées).

Ces sources d'incertitudes sont difficilement quantifiables, car elles se combinent entre elles en tout point de l'image étudiée. Il est généralement estimé une valeur unique d'incertitude (par exemple position + ou – 10 mètres), mais une estimation peut aussi être fournie par section homogène de trait de côte.

Enfin, en plus d'identifier et de digitaliser les marqueurs de position du trait de côte naturel, il est également recommandé de relever les ouvrages afin de les inclure dans une autre couche SIG permettant de structurer une base de données spécifiques aux ouvrages littoraux.

Fiche 2.3 : Le calcul du Tx

Le calcul du **taux moyen annuel de recul du trait de côte** est généralement réalisé selon des **profils** régulièrement espacés et disposés à la perpendiculaire de la ligne de rivage pour les côtes basses. L'espacement des profils est généralement compris entre 25 et 100 mètres.

Pour les **falaises évolutives** (falaises généralement taillées dans des matériaux sédimentaires peu résistants ou présentant des roches très altérées ou fracturées) et **présentant des reculs ponctuels**, une analyse par surface perdue selon **des casiers prédéfinis** est souvent plus adaptée. Pour les falaises composées de roches massives qui évoluent très lentement, le calcul des taux d'évolution n'est pas toujours nécessaire. En effet, la marge d'incertitude des mesures est généralement supérieure aux taux calculés. Il convient alors de rechercher et caractériser l'ampleur des mouvements de terrain pouvant les affecter (cf. partie 2.5).

Le calcul du Tx nécessite plusieurs traits de côte disposant au moins des informations suivantes :
- **date du trait de côte**. Date de prise de vue de la photographie aérienne ou date des relevés *in situ ;*
- **type de marqueur de position** relevé. Cette information permet de s'assurer que les calculs du Tx seront représentatifs (même objet observé) ;
- **incertitudes** de relevé (cf. partie précédente).

Ce calcul peut être réalisé entre les deux traits de côte correspondant au début et à la fin de la période observée. Dans ce cas, le calcul est très simple puisqu'il s'agit de diviser la distance séparant les deux traits de côte au niveau d'un profil par le nombre d'années les séparant. Pour le cas de casiers, il suffit de diviser la surface présente entre les deux traits de côte (au sein du casier) par le nombre d'années les séparant, puis de multiplier ce résultat par la longueur du casier afin de retrouver des m/an.

Si d'autres traits de côte sont disponibles au sein de la période observée, il est plus intéressant de **tenir compte de l'ensemble de ces traits de côte** afin d'affiner le calcul du Tx. Plusieurs méthodes de calcul du Tx sont possibles avec plus de deux traits de côte : plusieurs **lois statistiques** peuvent être mises en œuvre pour déterminer la tendance d'évolution du trait de côte. Elles permettent notamment d'intégrer les incertitudes de positionnement du trait de trait de côte et peuvent ainsi fournir un intervalle de confiance sur les droites de régression calculées. La régression aux moindres carrés pondérés (*Weighted Least Squares* - WLS) est souvent privilégiée dans les études de ce type, mais il est conseillé d'en tester plusieurs afin de vérifier si les résultats sont cohérents entre différentes approches. Les droites de régression seront encadrées avec un intervalle de confiance d'au moins à 70 %.

Des exemples d'application de plusieurs lois statistiques sont donnés dans l'encart 5 du guide PPRL (DGPR, 2014).

Fiche 2.4 : Segmentation du littoral et évolutions temporelles

Dans ce cas d'une approche experte, pour un territoire marqué par un trait de côte complexe, il est recommandé de procéder à un travail de classification des côtes du territoire. Il s'agit de cartographier les différentes parties qui, le cas échéant, composent le littoral du territoire étudié (une commune ou une intercommunalité donnée) afin de segmenter si nécessaire le littoral et les différentes zones de mobilité.

Plusieurs facteurs sont à prendre en considération pour la classification des littoraux d'un territoire :
- nature géologique (lithologie, altération, fracturation) ;
- géomorphologie de la côte et de l'estran, occupation du sol ;
- forçages, orientation de la côte face aux forçages ;
- modalité de gestion anthropique et ces effets ;
- connaissance préalable des cellules et sous-cellules sédimentaires

Le choix des facteurs dépend du type de territoire et des littoraux rencontrés, ils peuvent être définis et adaptés au cas par cas. Cette approche n'est pas uniquement centrée sur le trait de côte, mais devrait prendre en considération, selon les besoins et la dynamique du milieu, les éléments des zones pré-littorales, littorales ou rétro-littorales. Si les cellules et sous-cellules sédimentaires sont peu connues ou mal renseignées pour le territoire, cette démarche de segmentation détaillée permet d'améliorer cette connaissance.

Il est recommandé que ce travail de classification et de segmentation de la zone littorale soit réalisé par un expert local, ayant une bonne connaissance du territoire. Les données disponibles doivent être confrontées à un travail de vérification sur le terrain.

Géomorphologie				Nature de l'estran	Exposition	Action anthropique
	Hauteur	Origine géologique	Cohérence du piédestal			
R Côtes rocheuses	> >20 m	E Métamorphique	_	0 Platier 1 Schorre 2 Sablo-vaseux 3 Sables 4 Galets 5 Blocs 6 Éboulis (cônes)	X Exposé B Abrité	0 Non renseigné 1 Absence 2 Présence
		A Magmatique	_			
		S Sédimentaire	C calcaire ou craie résistante			
			Y crayeux			
			G argilo-marneux			
	< <20m	E Métamorphique	_			
		A Magmatique	_			
		S Sédimentaire	C craie résistante			
			Y crayeux			
			G argilo-marneux			
U Côtes d'accumulation	V Côtes sablo-vaseuses	_	_			
	D Systèmes dunaires	_	_			
	H Havres – Estuaires	_	_			

Figure 31 : Exemple d'une trame pour la segmentation du littoral en Normandie. Cerema

Outre l'analyse spatiale de la typologie littorale du territoire, l'évolution temporelle doit également être prise en considération pour affiner la segmentation.

La détermination de zones qui présentent des évolutions similaires dans le temps est un moyen utile pour les travaux de projection du trait de côte aux différentes échéances (Figure 30).

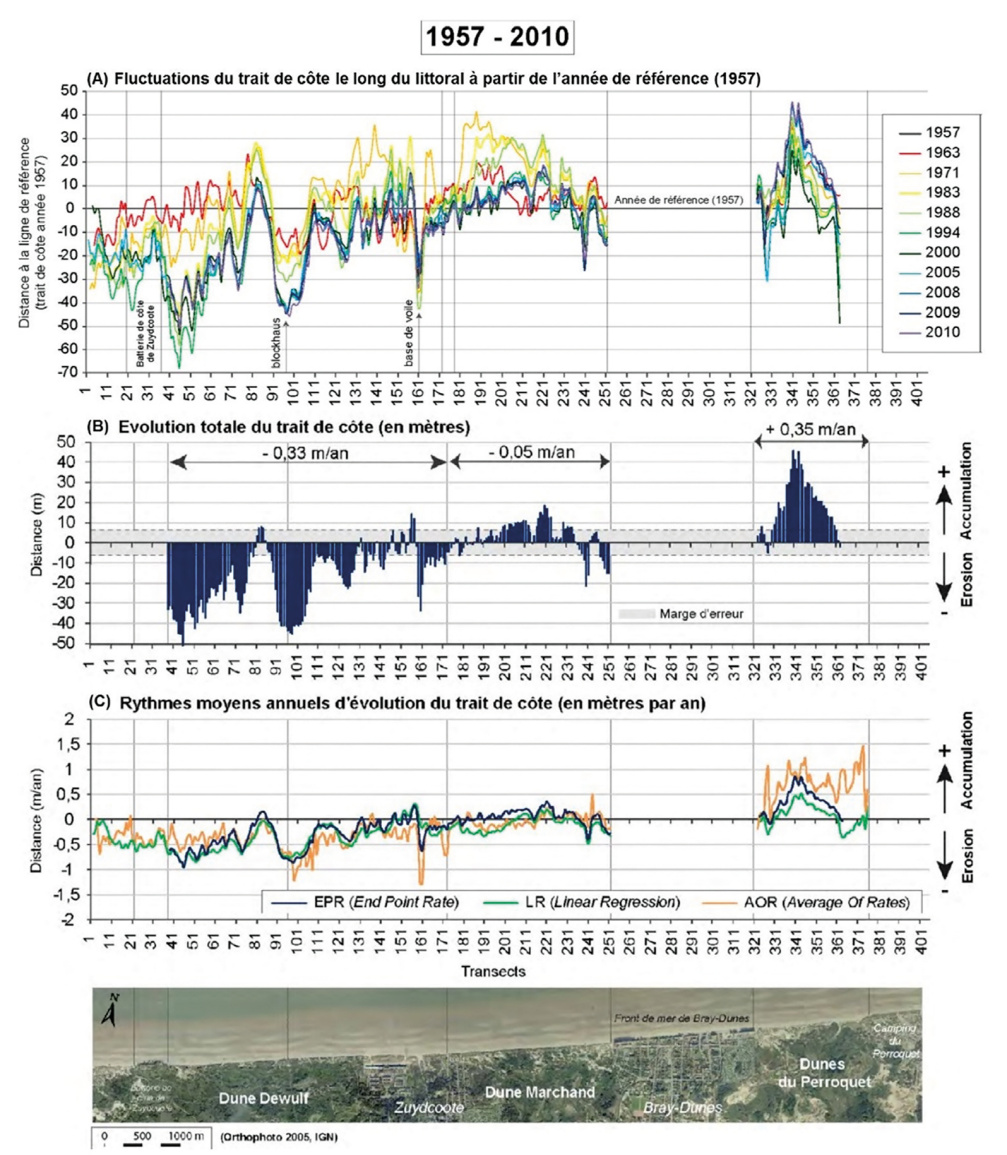


Figure 32 : Exemple de suivi de l'évolution du trait de côte entre 1957 et 2010 (de l'échelle pluriannuelle à pluridécenale) dans les Hauts-de-France et découpage en segments homogènes.
(A) Fluctuations du trait de côte le long du littoral par rapport à l'année de référence (1957) ;
(B) Évolution totale du trait de côte en mètres, par transects et par secteurs homogènes ;
(C) Rythmes moyens annuels d'évolution du trait de côte, calculés selon trois méthodes statistiques et exprimés en mètres par an. D'après Maspataud, 2011 ; dans Desmazes et al. *2017*[6]

6 – **Desmazes F., Le Cozannet G., Maspataud A.** (2017) – *Travaux méthodologiques la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer pour l'aléa « recul du trait de côte »*. Rapport final. BRGM/RP-67403-FR, 81 p., 32 Illustrations

Les données de mobilité du trait de côte sont utilisées en premier lieu pour cette analyse comme dans les exemples des Hauts-de-France (Figure 32) et de Nouvelle-Calédonie (Figure 33 et Figure 34). Mais l'utilisation des données complémentaires, permettant le traitement d'autres indicateurs morphologiques et de données tridimensionnelles (cartes d'isolignes, MNT topographiques et bathymétriques, cartes géologiques) sont également utiles et parfois nécessaires pour comprendre le fonctionnement du territoire.

Il est recommandé de confronter l'analyse des évolutions temporelles avec les segments pré-identifiés par l'analyse spatiale (Figure 34). Il s'agit d'affiner la typologie en distinguant les secteurs d'évolutions homogènes et les secteurs qui évoluent de manière plus complexe. Cette approche impose de bien comprendre les mécanismes de la dynamique locale et d'identifier les lacunes éventuelles de connaissance.

Pour chaque type et segments littoraux identifiés, il s'agit d'établir des tendances et des statistiques de mobilité à une échelle spatiale adaptée au territoire (Figure 34). Ce travail spécifique de traitement de données ne devrait pas chercher à lisser ou à moyenner toutes les observations au sein des segments littoraux, car il s'agit avant tout de bien prendre en compte la variabilité mesurée et d'apporter des explications aux phénomènes observés à l'échelle locale. Cette approche permet également d'identifier le manque de connaissances et d'estimer les incertitudes associées à ces variabilités.

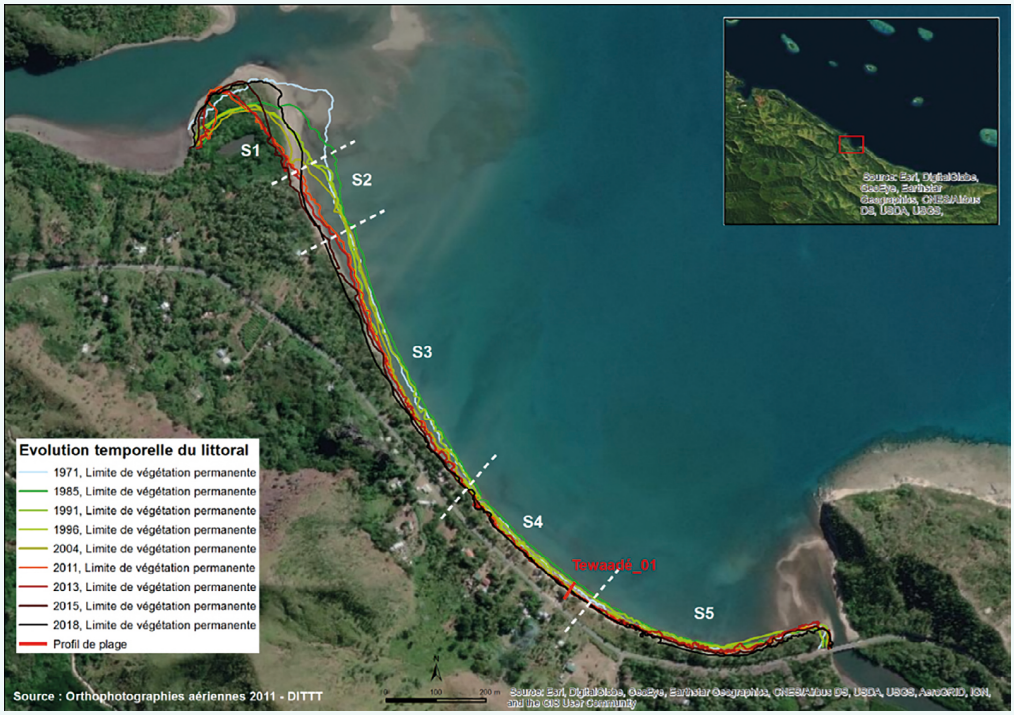


Figure 33 : Les traits de côte successifs de Tewaadé-Tipindjié (Nouvelle-Calédonie) de 1971 à 2018 et les différents segments identifiés. BRGM – OBLIC

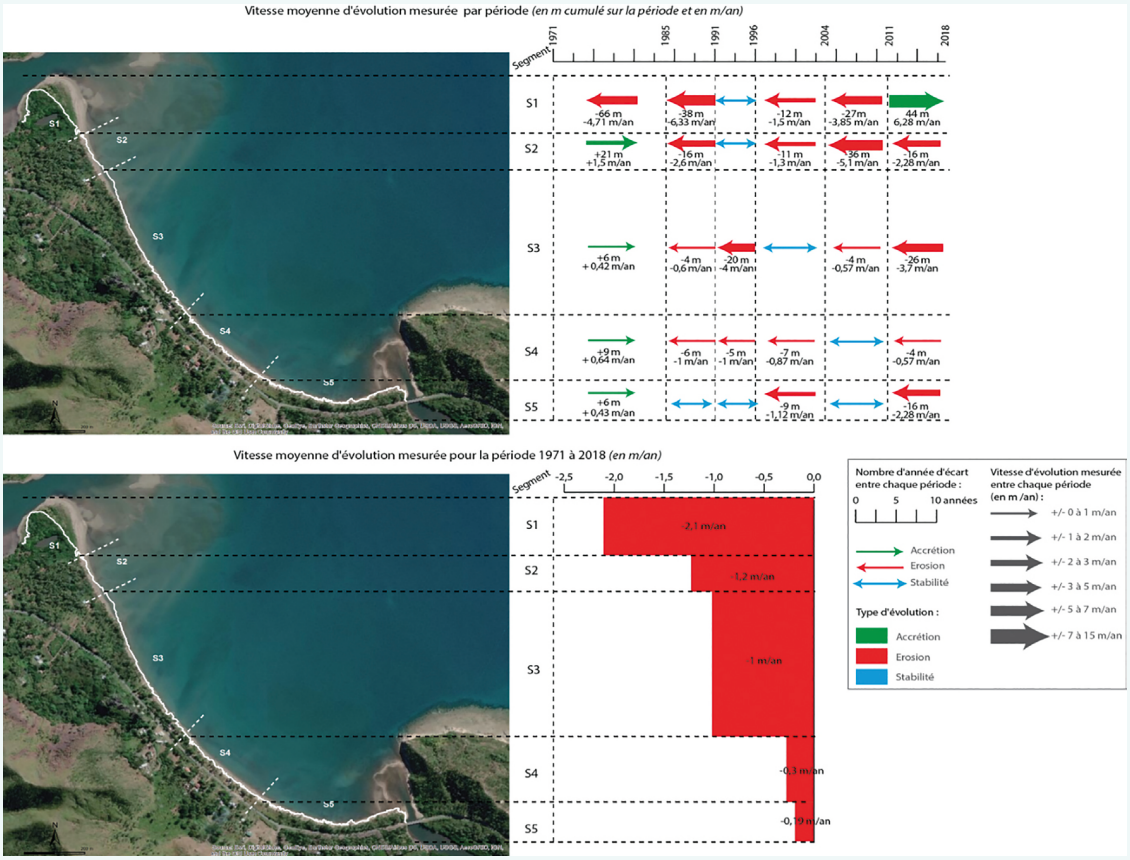


Figure 34 : Variabilité temporelle de la mobilité du trait de côte par segment à différentes échelles temporelles de 1978 à 2018 *- En haut analyse des vitesses par période et par segment ; en bas : analyse des vitesses sur le long terme (Tewaade-Tipindjié, Nouvelle-Calédonie, OBLIC). BRGM*[7]

7 – **Garcin M., M. Vendé-Leclerc, N. Valentini (2022)** - *Observatoire du Littoral de Nouvelle-Calédonie (OBLIC) – Bilan des actions 2020-2022*. Rapport BRGM/RP-71652-FR. 104 p., 79 fig., 12 tab.

Fiche 2.5 : Analyse des évolutions temporelles non-linéaires

Le littoral est un système complexe qui évolue dans le temps vers un équilibre dynamique, par des effets d'ajustement ou de rupture. Les éléments qui composent le milieu littoral se modifient en réponse aux conditions énergétiques ou aux flux sédimentaires, provoquant des mouvements et des évolutions. Le trait de côte, indicateur de la frontière entre les domaines marin et terrestre, évolue également selon ces règles.

L'analyse des évolutions temporelles du trait de côte est dépendante des données disponibles. Plus exactement, l'analyse temporelle est largement dépendante de la fréquence d'acquisition des données par rapport aux phénomènes provoquant une mobilité. Ainsi, des observations de longs termes réalisées à une fréquence quinquennale ne permettront pas d'analyser correctement les évolutions saisonnières du milieu.

Dans un contexte de mise à disposition croissante de données environnementales et de suivis renforcés du milieu littoral par des observatoires (partie 2.2), **il apparaît utile d'exploiter au mieux les nouveaux jeux de données disponibles pour limiter ou améliorer le dire d'expert.**

Pour chaque territoire et chaque type de données « littorale » ou « trait de côte » existants, des situations différentes peuvent se présenter. Si les observations disponibles rendent difficiles les travaux d'interpolation linéaire sur l'ensemble des données historiques, **il est recommandé d'analyser toutes les séries temporelles disponibles sur les différents indicateurs locaux**. En complément du travail d'analyse des tendances d'évolution chronique, l'analyse des séries temporelles disponibles pour les littoraux complexes consiste à détecter et interpréter :

- les évolutions saisonnières et à court terme, incluant la temporalité des cycles, leur variabilité et amplitude ;
- les évolutions cycliques, liées à des cycles climatiques pluriannuels notamment ;
- les évolutions exceptionnelles, en lien avec des évènements extrêmes ou des modifications soudaines du milieu (partie 2.5)
- les changements de tendance d'évolution, rupture soudaine ou progressive, inversion de tendance, variation du taux d'évolution, etc.

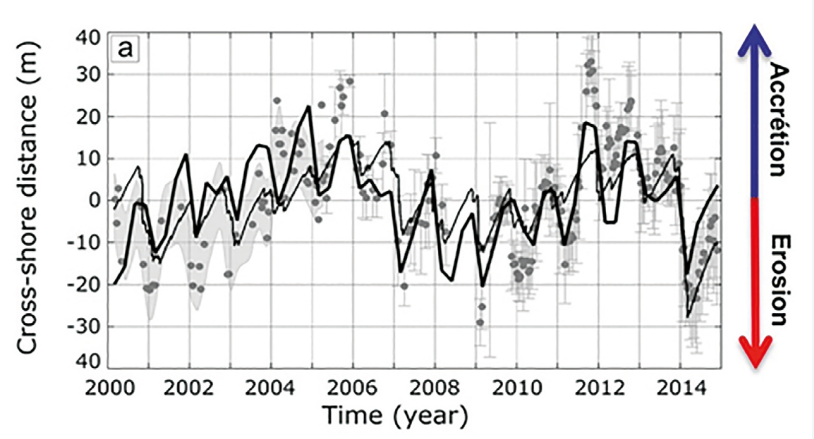


Figure 35 : Exemple de variabilité saisonnière et interannuelle sur la côte aquitaine. *Les points en gris indiquent les positions très régulièrement observées du trait de côte. BRGM d'après Robinet* et al. *2016*

Cette analyse permet également la collecte des informations sur les modifications des taux d'érosion ou d'accrétion (accélération, ralentissement, stabilité), les périodes, l'intensité des modifications. Ces données détaillées pourront être utilisées lors de la mise en application des scénarios de projection du trait de côte.

Dans l'idéal, ce travail d'analyse complémentaire nécessite des jeux de données suffisamment complets, en termes de période, de fréquence de suivi et de qualité. Il implique également de chercher à corréler les évolutions observées avec des processus et des phénomènes observables (notamment les forçages météo-océaniques, mode de gestion, apports sédimentaires, etc.). Dans le meilleur des cas, l'analyse poussée d'un jeu de données complet devrait permettre d'identifier l'effet des différents phénomènes et composantes qui rendent complexe l'évolution du trait de côte.

Dans la réalité, les jeux de données parfaitement adaptés à l'observation des différents phénomènes en jeu au sein des cellules et segments des littoraux complexes restent rares. Les séries temporelles peuvent apparaître restreintes dans l'espace et bruitées, ce qui peut limiter la portée des interprétations. Les travaux récents des observatoires du littoral sont donc d'une grande importance pour appréhender la dynamique de ces secteurs particuliers et leur suivi sur le long terme.

Fiche 2.6 : Reculs majeurs - prise en compte des séquences d'évolutions morphologiques et approche à long terme[8]

■ Évolution avant l'évènement

Un évènement majeur de recul du trait de côte peut être engendré par un phénomène énergétique unique d'intensité exceptionnelle, mais il peut aussi être la conséquence d'une séquence d'évolution du domaine littoral qui engendre une configuration particulièrement sensible à un phénomène d'intensité plus modérée. La tempête Xynthia de 2010 est un exemple récent d'un évènement de forçage exceptionnel ayant provoqué un recul majeur du trait de côte. L'hiver 2013-2014 et la succession de tempêtes qui se sont abattues sur le littoral Atlantique ont provoqué également des reculs exceptionnels, à l'issue d'une séquence évolutive particulière.

Les enjeux de compréhension et de connaissance du territoire consistent à établir les liens entre un évènement majeur de recul du trait de côte, les évolutions morphologiques récentes du littoral (à court ou moyen terme) et les facteurs de forçages ayant provoqué ces évolutions.
Sur les secteurs disposant d'un observatoire, la bonne compréhension des phénomènes morphogènes les plus intenses, leurs causes, effets et impact à long terme sera établie à partir du suivi environnemental complet et régulier de la morphologie du littoral et des forçages.
Sur les autres secteurs, le dire d'experts sera utilisé, basé sur le maximum de connaissance de terrain possible.

■ Évolution post-évènement

Pour les côtes d'accumulations, les évènements énergétiques les plus intenses provoquent brutalement le recul du trait de côte. Si la configuration initiale du littoral est fragile (cordons sableux étroits, zones basses, ouvrages dégradés), elle peut être définitivement modifiée par l'évènement extrême, entrainant des modifications profondes du littoral et accélérant les phénomènes d'érosion

8 – Les références bibliographiques de cette fiche sont disponibles dans le rapport :
Desmazes F., Le Cozannet G., Maspataud A. (2017) – *Travaux méthodologiques la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer pour l'aléa « recul du trait de côte »*. Rapport final. BRGM/RP-67403-FR, 81 p., 32 Illustrations.

et de recul du trait de côte. À l'inverse, le recul évènementiel du trait de côte n'est pas systématiquement inéluctable. La dynamique sédimentaire naturelle peut permettre un répit d'érosion, la reconstruction des stocks sédimentaires autour du trait de côte, favorisant un retour à l'accrétion du domaine subaérien et une période d'avancée du trait de côte. Les informations liées à la capacité de résilience du milieu sont des informations précieuses pour bâtir des scénarios d'évolutions du trait de côte à long terme qui prennent en considération les effets des évènements énergétiques majeurs.

Pour les milieux rocheux, le recul évènementiel d'une falaise apparaît définitif. Néanmoins, la libération soudaine d'un important volume de matériaux terrestres sur le domaine littoral n'est pas sans conséquence sur le milieu. Les informations liées à la suite de l'évènement sont aussi importantes : protection momentanée du pied de falaise ou au contraire, accentuation des vitesses de recul en lien avec la géologie locale, doivent permettre d'améliorer la connaissance de la dynamique locale et d'affiner les scénarios d'évolution du taux de recul du trait de côte à moyen et long terme.

Dans les secteurs à enjeux, la gestion active par les actions humaines peut avoir des conséquences dans les séquences d'évolutions morphologiques en lien avec les phénomènes énergétiques. Dans les secteurs de littoraux sableux, les actions de reprofilage de plage, de rechargement, de comblement de brèche sont à prendre en considération pour expliquer les évolutions et distinguer d'un côté, le rôle des actions de gestion et de l'autre, la résilience naturelle du milieu.

■ **Prise en compte des évènements majeurs dans une approche à long terme**

Pour aller plus loin, une troisième approche est envisagée pour améliorer la prise en compte des évènements énergétiques dans les projections de recul du trait de côte. Cette approche nécessite des développements techniques et s'inscrit dans la mise en place à l'échelle du territoire de modèle reproduisant de façon simplifiée les principaux phénomènes affectant le territoire (cf. Fiche n°3.5).

Dans le cas de littoraux bien connus, régulièrement suivis par un observatoire et fréquemment soumis aux effets érosifs des tempêtes, il peut être envisagé une approche basée sur des outils stochastiques/probabilistes pour reproduire l'effet des tempêtes, tenant compte de leur succession dans le temps et des possibilités de récupération naturelle après les évènements. Cette approche peut permettre de mieux comprendre une évolution historique qui ne soit pas linéaire et de justifier le test de plusieurs scénarios d'évolution pour le territoire, incluant différents évènements extrêmes, dans des temporalités variées (favorable ou non à la résilience).

Ce type de modèles, tels que développé par Ranasinghe *et al.* (2012) et Le Cozannet *et al.* (2019) sont également conçus pour prendre en compte l'évolution du niveau de la mer en lien avec le changement climatique et le renforcement prévisible de l'effet des évènements énergétiques sur les milieux littoraux (cf. Fiche n°3.6 pour une présentation détaillée).

Fiche 2.7 : Approches mobilisables pour la gestion des incertitudes

Trois cas théoriques sont proposés comme cadre de gestion des incertitudes.

■ Cas 1 : Évaluation des intervalles d'incertitude

Ce premier cadre se base sur des calculs d'intervalles définis à partir d'informations du type bornes min/max ou des scénarios optimistes/pessimistes. Le résultat prend alors la forme d'un intervalle (voir Figure 36, gauche) dont la largeur peut être utilisée pour définir des marges d'erreur. L'intérêt de ce cadre est sa facilité de mise en œuvre lorsque peu d'informations sont disponibles mais il présente l'inconvénient de donner des marges pouvant être très larges et donc difficilement exploitables pour la réalisation de cartes.

Si les incertitudes estimées pour les projections de trait de côte sont susceptibles de nuire à la réalisation des cartes, il est recommandé de mettre en œuvre des analyses complémentaires permettant de restreindre la marge d'incertitude ou de recourir au dire d'expert, impliquant notamment une réflexion sur la vérité locale du terrain ou encore l'expérience d'analogues connus.

■ Cas 2 : Approche probabiliste

Ce cadre est approprié quand il existe un nombre et une qualité de données et de connaissances suffisantes pour bien représenter la variabilité des paramètres sous la forme de fonction de probabilités (voir Figure 36, milieu).

Pour la réalisation des projections de recul du trait de côte, il est recommandé de mettre en œuvre une approche probabiliste, basée sur la représentation des incertitudes des paramètres par des fonctions de probabilités. Ce cadre permet de prendre en compte les incertitudes sur l'ensemble de la chaîne de traitement de projection du trait de côte si les données disponibles permettent l'ajustement des lois de probabilités.

■ Approche experte, cas 3 : Approche extra-probabiliste

Les critères de quantité, qualité et pertinence des données disponibles ne permettent pas toujours de représenter les différents processus par des fonctions de probabilité. En l'absence de telles informations, il est envisageable de privilégier un cadre de description des incertitudes élargi (dit « extra-probabiliste »), combinant lois de probabilités (pour les sources d'incertitudes dont on dispose de suffisamment d'informations/données) et calculs d'intervalles/calculs d'erreurs (pour les sources d'incertitudes dont les informations/données sont plus parcellaires).

Le résultat d'un tel cadre permet d'évaluer une incertitude sur le résultat de l'approche probabiliste comme illustré sur la Figure 36 (droite). Les projections réalisées dans ce cadre doivent être analysées avec prudence, et interprétées par des experts.

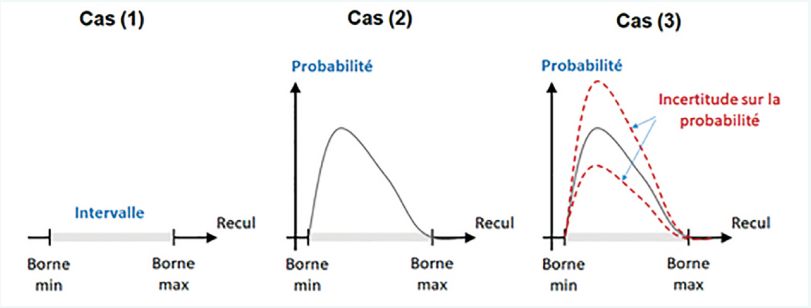


Figure 36 : Représentation schématique du résultat possible d'une propagation d'incertitudes selon le cadre utilisé.
Cas 1 : intervalle donnant la borne min/max du recul ;
Cas 2 : loi de probabilité donnant la vraisemblance de chaque valeur de recul au sein de l'intervalle ;
Cas 3 : incertitude sur la loi de probabilité du recul résultant de la combinaison d'intervalles et de lois de probabilités. BRGM

Fiches techniques pour la partie “Influence du changement climatique”

Liens utiles

- Page internet du *MTECT* « Impacts du changement climatique : Littoral et Milieu marin » : www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-littoral-et-milieu-marin
- Page internet du *MTECT* « Comprendre le GIEC » : www.ecologie.gouv.fr/comprendre-giec
- Page internet du *MTECT* « Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique – ONERC » : www.ecologie.gouv.fr/observatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onerc
- Rapport de synthèse du GIEC 2014 *(AR5)* : www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf
- Rapport du rapport spécial GIEC 2019 *(SROCC)* : www.ipcc.ch/srocc/
- Rapport du GIEC 2022 (AR6) : www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/
- Scénarios régionalisés d’élévation du niveau de la mer *(projets ERA4CS)* : sealevelrise.brgm.fr/sea-level-scenarios
- Outil de projections du niveau de la mer produit par la *NASA* : sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool

Fiche 3.1 : Scénarios de changement climatique : de quoi s’agit-il ?

Pour chaque scénario considéré, les projections dépendent de la mise en œuvre de modèles qui intègrent des connaissances, certes toujours plus avancées, mais en partie incomplètes des différents processus physiques en jeu dans la hausse du niveau marin.

Pour rappel, trois scénarios de référence, dits RCP *(Representative Concentration Pathways)*, ont été couramment mobilisés jusqu’en 2022.

Définis par le GIEC, ils représentent plusieurs profils de l’évolution possible des concentrations de gaz à effet de serre dans l’atmosphère (ou GES), et sont eux-mêmes associés à des scénarios de développements socio-économiques et diverses stratégies d’adaptation des activités humaines et d’atténuation :

- le scénario RCP 2.6, considérait que l’objectif de contenir le réchauffement global à 2 °C d’ici 2100 par rapport à la période préindustrielle serait vraisemblablement atteint. Il impliquait de fortes réductions d’émissions de GES par la communauté internationale et un réchauffement climatique compatible avec l’Accord de Paris ;
- le scénario RCP 4.5 correspondait approximativement aux objectifs de réduction d’émissions de GES auxquelles les États se sont engagés dans l’Accord de Paris. Ce scénario ne permettait pas d’atteindre l’objectif de 2 °C, mais il supposait déjà une réduction des GES très importante ;
- le scénario RCP 8.5 était le plus pessimiste, car il correspondait à la poursuite des émissions actuelles qui pourrait conduire à une hausse des températures proches de 4 °C.

À partir de 2022, cinq nouveaux scénarios ont été proposés par le GIEC, bâtis sur des trajectoires socio-économiques de référence, dits SSP, pour « *Shared Socioeconomic Pathways* ».

Basées sur les scénarios RCP ou SSP, les projections du niveau de la mer sont associées à des incertitudes de type et d’ampleur différents. Tout d’abord, ces projections sont conditionnées par des scénarios de changement climatique auxquels il n’est pas possible d’associer un degré de probabilité.

Pour refléter ces incertitudes, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) utilise une terminologie qui permet d'associer un « degré de vraisemblance » et un « niveau de confiance » aux projections du niveau de la mer qu'il émet. Les courbes couramment diffusées comportent la médiane des projections (courbes continues) et l'intervalle de vraisemblance dit « vraisemblable » (aires semi-transparentes) pour les différents scénarios de référence.

Dans la terminologie du GIEC, le qualificatif « vraisemblable » signifie qu'il existe au minimum deux chances sur trois pour que le futur niveau de la mer se situe dans cet intervalle. Ces projections n'excluent donc pas une élévation du niveau de la mer plus importante que celles présentées, notamment dans l'éventualité d'une fonte accélérée de la calotte antarctique.

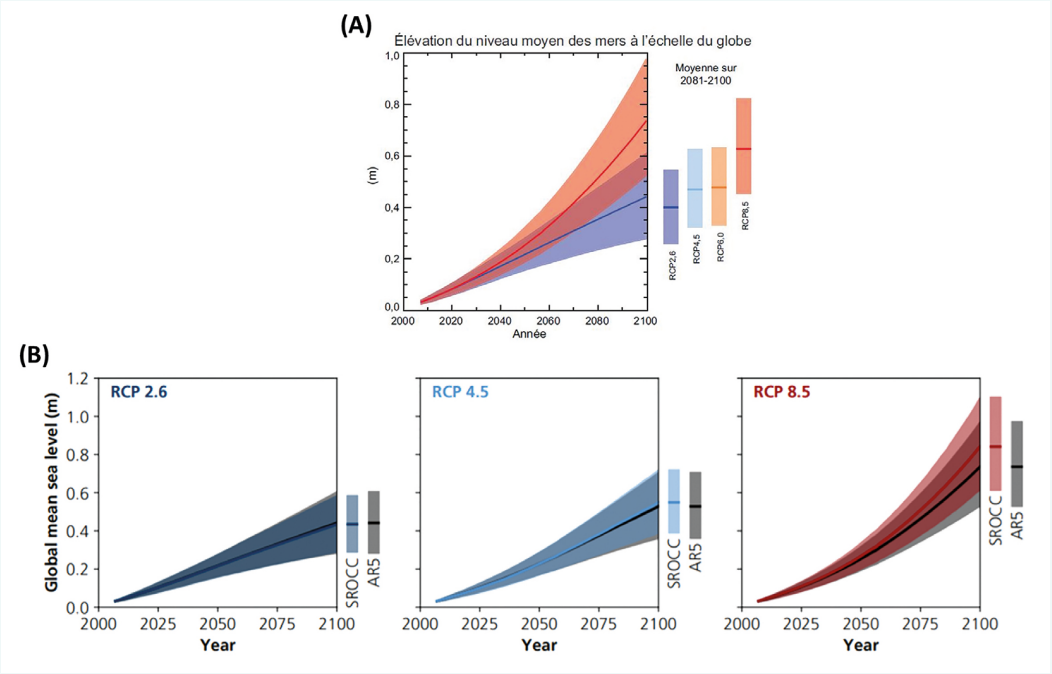


Figure 37 : Projections de l'élévation du niveau de la mer *fournies dans (A) le 5e rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) (AR5 ; Church* et al. *2013) ; et (B) le rapport spécial du GIEC publié en 2019.* *SROCC / IPCC, 2019*

Fiche 3.2 : Projections régionalisées et prise en compte des mouvements verticaux du sol[9]

■ Variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer

Les moyennes globales exprimées à l'échelle du globe masquent des variations entre les différents bassins océaniques. En effet, les observations spatiales, grâce à leur couverture quasi-globale, ont révélé une forte variabilité régionale dans l'élévation du niveau de la mer (Figure 38).

Les projections du niveau de la mer géocentrique s'effectuent en sommant les **effets régionaux de plusieurs contributions** : l'expansion thermique des océans et les effets de changements de circulation océanique et de pression atmosphérique (cette contribution est aussi appelée stéréodynamique) ; les pertes de masses des glaciers de montagne ; les pertes de masses des calottes glaciaires antarctique et du Groenland ; l'extraction des eaux souterraines (Figure 18).

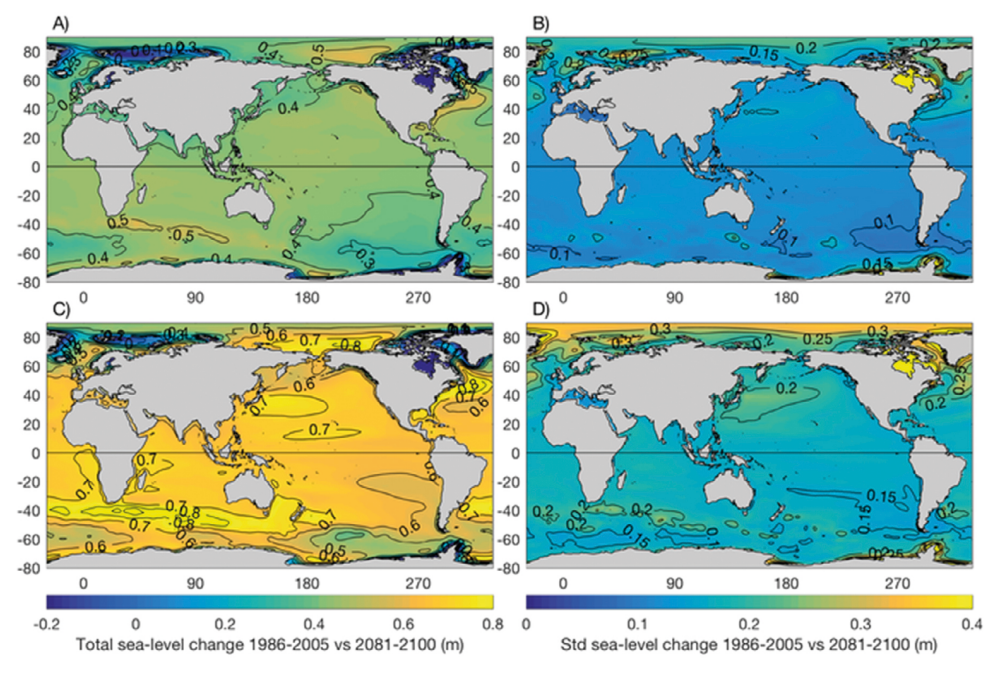


Figure 38 : Variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer et ses incertitudes (1 écart type, indiqué Std dans la figure) dans le cas des scénarios RCP 2.6 (A et B) et RCP 8.5 (C et D). *Desmazes* et al. *2017*

Des disparités régionales peuvent exister entre ces différentes contributions, c'est pourquoi il est désormais admis qu'il est primordial de considérer les effets régionaux de ces contributions et non leurs estimations globales pour effectuer des projections locales ou régionales de recul du trait de côte. Il est donc recommandé de **prendre en compte les scénarios régionaux de niveau de la mer** pour s'adapter plus finement aux territoires et façades maritimes et permettre **une meilleure prise en compte des variabilités existant entre littoraux métropolitains et ultramarins**.

---

9 – Les références bibliographiques de cette fiche sont disponibles dans le rapport :
Desmazes F., Le Cozannet G., Maspataud A. (2017) – *Travaux méthodologiques la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer pour l'aléa « recul du trait de côte »*. Rapport final. BRGM/RP-67403-FR, 81 p., 32 Illustrations.

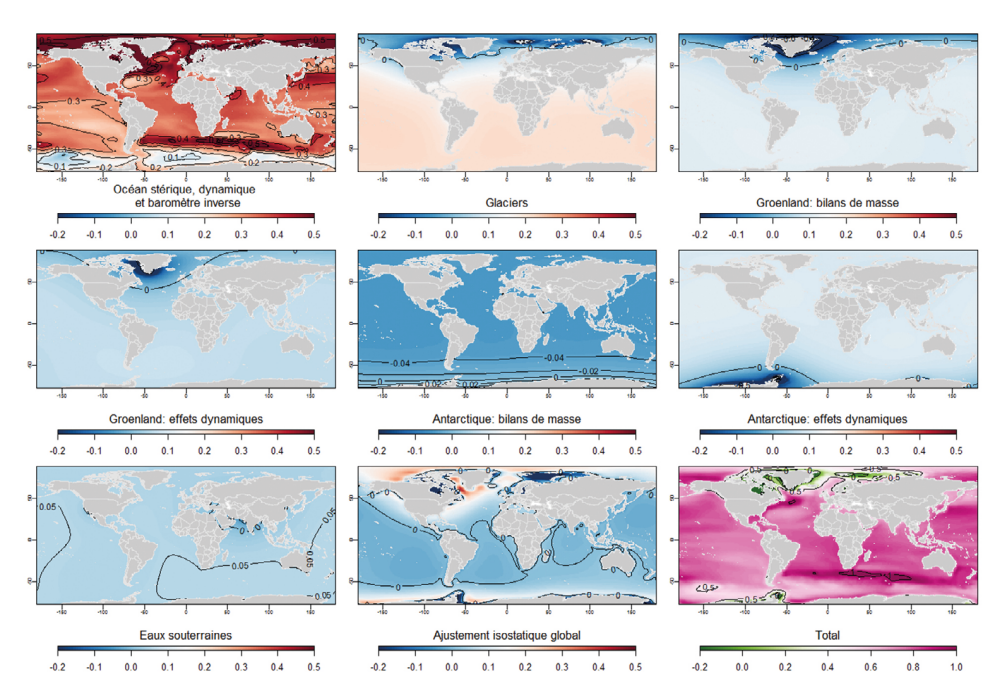


Figure 39 : Projections médianes de l'élévation du niveau de la mer *(en mètres d'élévation du niveau de la mer par rapport à une référence correspondant au niveau marin global moyen sur la période 1986-2005) ; ces projections prennent en compte les empreintes spatiales des différentes contributions massiques, dans le cas du scénario RCP 8.5 en 2100.* GIEC ; *Carson* et al. *2015*

■ Mouvements verticaux du sol

L'élévation du niveau de la mer peut également être aggravée ou limitée localement par des **mouvements verticaux du sol** d'origine naturelle (tectonique, volcanique ; exemple récent de l'Île de Mayotte) ou anthropogénique (extraction d'eau souterraine, tassements de terrain en lien avec l'aménagement ou les activités humaines, etc.). L'un des facteurs aggravants de l'élévation du niveau de la mer est la subsidence, qui se traduit par un enfoncement du sol. Les scénarios de niveau marin produits par le GIEC ne prennent pas en compte (ou peu précisément) les éventuelles subsidences locales.

Il est donc recommandé d'effectuer une **recherche des études potentiellement existantes et une analyse des données disponibles** afin de déterminer si cette composante doit être prise en compte sur le territoire étudié pour la réalisation de scénarios d'élévation locale du niveau de la mer. Les données mobilisables pour étudier localement les mouvements verticaux du sol sont :

- les séries temporelles de GPS permanents, telles que celles présentes dans la base de données SONEL (www.sonel.org ; Wöppelmann *et al.* 2007). Ces mesures sont précises, mais ponctuelles et plusieurs années d'acquisition sont nécessaires pour bénéficier d'une précision optimale. D'autres données de GPS (telles que celles du réseau IGN) sont également mobilisables ;
- la comparaison de campagnes de nivellement (certaines permettent par exemple d'atteindre des précisions millimétriques le long de réseaux de transports, mais ne permettent pas de détecter des mouvements verticaux du sol plus locaux) ;

- l'analyse par interférométrie radar satellitaire, qui permet de cartographier et de quantifier des mouvements verticaux dans une gamme de valeurs de moins d'un millimètre par an à quelques centimètres par an. Cette technique, dont l'essor est notable, s'applique avant tout aux zones peu végétalisées, et est conditionnée à l'existence d'une archive d'images radar ;
- l'analyse de paléo-niveaux marins peut également être une source d'informations utile ;
- en termes d'acquisition de données, le déploiement de GPS permanents et l'analyse de données InSAR (exploitation des données Sentinel notamment) sont tout particulièrement importants pour cette phase d'analyse.

Localement, et lorsque des observations sont disponibles (notamment issues des GPS permanents) des projections peuvent ainsi être effectuées en extrapolant les taux mesurés sur la période considérée. Cette extrapolation ne se justifie pas toujours, tout particulièrement dans le cas de mouvements d'origine tectonique, volcanique, ou liés à des extractions de fluides dans le sous-sol. Elle doit être effectuée avec prudence.

Fiche 3.3 : Outils disponibles pour la visualisation et la mise à disposition de projections de l'élévation du niveau de la mer

Outil développé dans le cadre de projets ERA4CS dédiés au co-développement de services climatiques côtiers, pour évaluer le niveau de la mer régional, le portail https://sealevelrise.brgm.fr/sea-level-scenarios est accessible à tout utilisateur ayant besoin de scénarios régionalisés d'élévation du niveau de la mer.
Ce démonstrateur permet d'analyser et de visualiser différents scénarios de contributions à l'élévation du niveau de la mer global, en combinant ses différentes composantes. Il permet le porter à connaissance de projections régionales de l'élévation du niveau de la mer, adaptées aux différents bassins océaniques et façades maritimes. Il est basé sur les jeux de données fournies par le *Integrated Climate Data Center ICDC* de l'Université de Hambourg et le GIEC. Les données dès à présent disponibles concernent les scénarios du GIEC produits dans le cadre de son 5e rapport d'évaluation (AR5/IPCC, 2013) ainsi que dans le cadre de son rapport spécial (SROCC / IPCC, 2019), pour différentes échéances temporelles, ici jusqu'à 2100. Il considère les valeurs probables (médiane et intervalle de confiance) associées aux scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5 (décrits précédemment). Des mises à jour sont attendues suivant l'évolution de la connaissance scientifique. Des projections « basses » *(low-end)* et « hautes » *(high-end)* du niveau de la mer sont également fournies. Les projections basses sont proches de l'élévation minimale du niveau des mers attendue d'ici 2100 compte tenu des émissions, elles sont utiles pour évaluer les besoins d'adaptation minimum. Inversement, les projections hautes fournissent des scénarios à faible probabilité et à fort impact, particulièrement adaptés aux contextes de prise de décision avec une faible tolérance à l'incertitude (gestion d'infrastructures critiques telles que les ports, municipalités côtières, industries chimiques ou les centrales nucléaires).

Outil de projections du niveau de la mer produit par la NASA, et permettant aux utilisateurs de visualiser et télécharger les données de projections du niveau de la mer du 6e rapport d'évaluation du GIEC (AR6), accessibles via la plateforme : https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool.
L'outil permet aux utilisateurs (public large) de visualiser les projections mondiales et régionales du niveau de la mer de 2020 à 2150, ainsi que la manière dont ces projections diffèrent en fonction du scénario futur. Les utilisateurs peuvent consulter les projections pour n'importe quelle région géographique (valeur médiane, et intervalle de confiance suivant la définition du GIEC). Les contributions des différents processus physiques à l'élévation future du niveau de la mer sont également

fournies, indiquant quels processus seront les principaux moteurs du niveau futur de la mer pour un lieu donné. Enfin, les utilisateurs peuvent télécharger les données de projection du niveau de la mer du 6e rapport d'évaluation du GIEC dans plusieurs formats.

Fiche 3.4 : Modèles d'impact du niveau de la mer sur le trait de côte : recommandations pour l'utilisation de la règle d'érosion de Bruun[10]

Formulation

Pour les côtes sableuses, la règle d'érosion de Bruun traite du budget sédimentaire littoral à long terme et des échanges de matériaux entre les domaines littoral et pré-littoral (Figure 40). Elle repose sur une première hypothèse selon laquelle l'élévation du niveau de la mer se traduit par un dépôt en zone pré-littorale de sédiments prélevés sur la partie haute de la plage. Cet équilibrage du profil de plage a pour effet l'érosion du littoral et le recul du trait de côte.

La règle de Bruun repose également sur une autre hypothèse forte pour quantifier le bilan sédimentaire. Elle considère que l'équilibre du profil est rétabli lorsque les dépôts sur le secteur pré-littoral ont compensé en hauteur la montée du niveau de la mer, comme le montre la Figure 40 et le paramètre « a » correspondant. Cette figure montre bien que les sédiments permettant le rééquilibrage du domaine pré-littoral proviennent du haut de plage, ce qui implique nécessairement le recul du trait de côte, paramètre « s » de la figure.

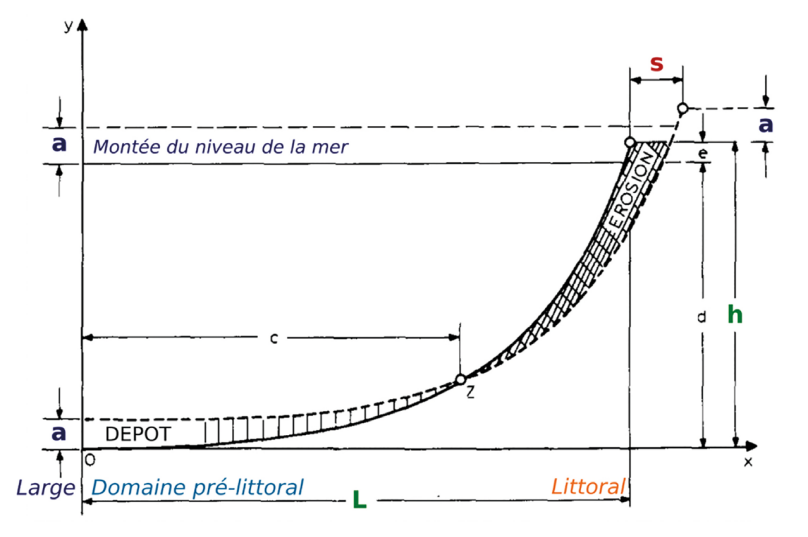


***Figure 40 : Règle d'érosion de Bruun**. Hypothèse d'évolution du profil de plage et principaux paramètres descriptifs : a, montée du niveau de la mer ; L, longueur du profil de plage soumis à l'influence de vagues ; h, hauteur entre le trait de côte et le bas du domaine pré-littoral. BRGM, Desmazes* et al. *2019, d'après Bruun, 1983*

10 – Les références bibliographiques de cette fiche sont disponibles dans le rapport :
Desmazes F., Maspataud A., Elineau S., Billy J., Le Cozannet G. (2019) – *Comparaison de méthodes pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer sur l'aléa recul du trait de côte des PPRL : application sur deux sites métropolitains.* Rapport final. BRGM/RP-68626-FR, 101 p., 45 ill., 2 ann.

En étudiant ces hypothèses sur un profil de plage théorique, Bruun (1983) montre qu'il n'est pas forcément nécessaire de modéliser l'évolution de l'ensemble du profil de plage pour déterminer le recul du trait de côte, si le ratio entre le recul « s » et la longueur du domaine littoral et pré-littoral « L » (supposée de l'ordre du kilomètre) est très inférieur à 1 (s/L <<1), ce qui est généralement le cas. Ainsi, la règle de Bruun s'exprime de façon simplifiée par la formule :

$$s.h = a.L$$

Soit :

$$s = \frac{a.L}{h \tan(\alpha)} = \frac{a}{\tan(\alpha)}$$

Avec tan (α) la « pente de plage », au sens de la figure 40, nommée « pente de Bruun » dans la suite de ce rapport et a l'élévation du niveau de la mer.
Cette fiche présente la mise en œuvre de la formule simplifiée de la règle de Bruun pour établir un premier niveau d'information sur les évolutions du trait de côte liées à l'augmentation du niveau de la mer, sans occulter les discussions et les critiques associées à l'utilisation d'une règle qui peut apparaitre trop simpliste (Cooper et Pilkey, 2004). Des travaux de recherche basés sur la règle de Bruun proposent des approches plus complètes et précises qui traitent des profils d'équilibres, de la variabilité sédimentaire du profil de plage ou de l'ajout de processus connus (telle l'évolution parallèle à la plage, le transport sédimentaire vers le haut de plage etc.). Ces travaux spécifiques ne sont pas traités ici.

■ Détermination des limites de pente

La mise en œuvre de la règle de Bruun nécessite un travail spécifique pour établir et justifier les paramètres de longueur de plage (L) et de hauteur de la zone active modifiée par les effets de la montée du niveau de la mer (h). Il s'agit donc de déterminer les limites de cette zone active au large et à terre.

■ Limite au large

La règle de Bruun estime les effets de la montée du niveau de la mer sur un profil de plage en équilibre avec les vagues. Selon Bruun (1988), la limite au large correspond à la profondeur maximale à laquelle peuvent intervenir des transferts de sédiments par l'action des processus côtiers. En fonction de la configuration géomorphologique et de la dynamique du milieu étudié, la détermination de cette profondeur est sujette à des discussions nécessaires dès que la règle de Bruun est utilisée (Dean et Houston, 2016). Cette réflexion est associée à un champ de recherche scientifique entrepris par les ingénieurs américains depuis les années 1970 pour déterminer la profondeur de fermeture d'un domaine littoral. La profondeur de fermeture est un concept qui se définit comme la profondeur pour laquelle le transport sédimentaire lié aux processus littoraux devient très faible ou nul (Brutsché *et al.* 2014).

La profondeur de fermeture *(Dc)* est déterminée à partir de mesures répétitives d'un profil topo-bathymétrique. Elle correspond au point au-delà duquel on ne détecte plus de variations morphologiques significatives dans les données. Nicholls *et al.* (1998) observent à partir d'un jeu de mesures complet de 8 ans, que la profondeur de fermeture observée augmente lorsque la période d'observation augmente. Des jeux de données plus récents issus d'acquisitions très régulières de Lidar topo-bathymétrique peuvent également être utilisés pour ces déterminations (Hartman et Kennedy, 2016).

L'étude théorique de référence sur ce sujet a été menée par Hallermeier (1981) qui a défini une profondeur de fermeture interne et une profondeur de fermeture externe sur un profil bathymétrique.

La profondeur de fermeture interne *(dl)* limite la plage très active, où le fond sableux est remobilisé fréquemment sous l'effet des vagues déferlantes et des courants induits. La profondeur de fermeture externe *(di)* marque la limite entre un secteur prélittoral plus profond (où l'effet des vagues se fait ressentir par un faible transport sédimentaire et une interaction négligeable avec le fond marin) et le domaine du large, réputé sans interaction avec les vagues.

Dans un premier temps, Hallermeier (1981) présente une synthèse des approches basées sur les observations de terrain : analyse des ruptures de pentes entre le profil de plage et le plateau continental, détermination des modifications sédimentaires sur le profil, voire également indicateur indirect lié aux changements de faunes benthiques.

Dans un second temps, il utilise la théorie linéaire des vagues pour proposer des formulations permettant d'estimer la profondeur de fermeture interne *(dl)*, telle que :

$$d_l = a_0 H_s + a_2 * {H_s^2}/{gT_s^2} \quad (1)$$

Avec Hs et Ts correspondant respectivement aux hauteurs et périodes significatives des vagues ; g la constante gravitationnelle (9,81 $m.s^{-2}$), a_0=2.28 et a_2= -68.5, coefficients obtenus à partir d'une relation théorique de mise en suspension de grains de quartz.

Pour les besoins de l'ingénierie côtière, Hallermeier (1981) précise l'intérêt d'utiliser cette formule dans l'estimation d'une profondeur de fermeture annuelle. Cette valeur est basée sur la détection de la plus forte hauteur de vagues dépassée durant 12 h consécutives pendant l'année, afin d'établir les valeurs Hsx et Tsx à introduire dans la formule (1) d'estimation de la profondeur de fermeture interne *dl*. Cette formulation implique une variation annuelle de la valeur de la profondeur de fermeture en lien avec les conditions hydrodynamiques et une dépendance du résultat aux techniques de détermination et d'observation des conditions extrêmes. Pour les besoins d'estimation de la limite au large de la pente de Bruun, cette profondeur de fermeture annuelle est discutable. Des valeurs décennales pourraient être testées.

La profondeur de fermeture externe di définie par Hallermeier (1981) s'exprime telle que :

$$d_i = (\overline{H}_s - 0.3\,\sigma_s) * \overline{T}_s * ({g}/{5000D})^{0.5}$$

Avec Hs et Ts correspondant respectivement aux hauteurs et périodes significatives des vagues, σs à l'écart-type de la hauteur significative moyenne et D la granulométrie moyenne du sable (D_{50}).

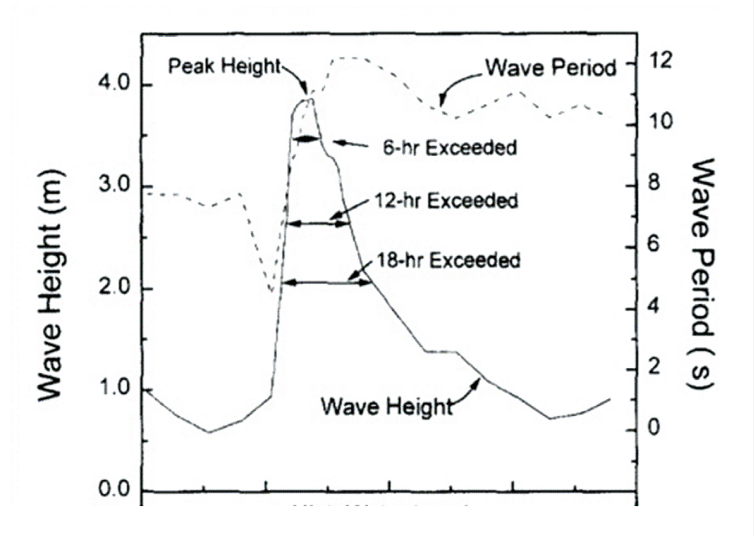


Figure 41 : Exemple de détermination de hauteur de vague et période dépassée durant 12 h consécutives lors d'un évènement extrême. *D'après Nicholls* et al. *1998*

Les résultats de ces formules ont été comparés avec des données de suivis morpho-sédimentaires réguliers situés aux USA. Globalement, la profondeur de fermeture interne *(dI)* limite bien les secteurs de plages sous-marines dont les évolutions sont observables avec les techniques classiques de bathymétrie, à l'échelle annuelle ou saisonnière. Avec la même approche, Birkemeier (1985) montre l'intérêt de paramétrer cette formule à l'aide d'un jeu de données locales complet, lorsqu'il existe.

Plus au large, les observations de faibles variations morphologiques comme le déplacement de rides sableuses ou à de fines évolutions sédimentaires sont des informations utiles à la détermination de la profondeur de fermeture externe *(di)*. Mais ces observations sont beaucoup moins aisées à réaliser et à interpréter. Hallermeier (1981) identifie ce paramètre de profondeur de fermeture externe *(di)* pour traiter plus spécifiquement des questions d'évolutions à long terme proposées dans la règle de Bruun. Ce point reste sujet à discussion, des études plus récentes pouvant prendre d'autres partis pour représenter la limite au large de la zone pré-littorale (Ortiz et Ashton, 2016).

Au bilan, l'approche recommandée pour établir la limite au large pour le calcul de la pente de Bruun consiste à :

- déterminer s'il existe une série de données topo-bathymétriques mesurées à une fréquence et sur une période suffisante pour déterminer une profondeur de fermeture observée fiable ;
- en l'absence d'un jeu de mesures topo-bathymétriques suffisamment complet, estimer les profondeurs de fermeture interne et externe selon les formules d'Hallermeier (1981) et Birkemeier (1985). Des tests visant à augmenter la période d'analyse des pics de vagues pour l'estimation de la profondeur de fermeture interne peuvent être effectués ;
- analyser les données morpho-sédimentaires disponibles localement pour y détecter les frontières naturelles pouvant limiter les transferts sédimentaires vers le large ;
- confronter les estimations calculées avec les informations morpho-sédimentaires existantes pour choisir et discuter les profondeurs et positions représentant au mieux la zone de limite au large. En cas de doutes, plusieurs limites calculées peuvent être utilisées pour définir les pentes. L'incertitude sur ce paramètre peut être prise en compte dans le cadre d'une approche probabiliste.

Il faut noter que les observations des mouvements du fond sur le plateau continental et les estimations de mobilités sédimentaires sous l'effet des vagues sont des sujets de recherche qui ont donné lieu à de grands progrès techniques depuis les travaux fondateurs d'Hallermeier (1981) et Birkemeier (1985). Les formules empiriques proposées dans cette étude sont cependant une base d'informations exploitables en première approche qui restent d'actualité pour les projets opérationnels, à condition d'être discutées avec soin et confrontées à des observations ou modèles complémentaires s'ils existent (Brutsché *et al.* 2014, Ortiz et Ashton, 2016).

■ Limite à terre

La limite terrestre de la pente de Bruun est un sujet moins débattu dans la communauté scientifique que la limite au large. Le texte de Bruun (1983) est pourtant assez peu explicite, se contentant de mentionner une limite située sur la plage ou la dune.

■ Sommet de berme

Dans les travaux de mise en œuvre de la loi de Bruun, cette limite haute est associée au sommet de la berme (Rosati *et al.* 2013 par exemple), telle qu'elle est représentée dans le profil de plage logarithmique utilisé par Bruun pour illustrer sa règle.
La berme est une structure sédimentaire très évolutive, qui se développe en période de beau temps en haut de la plage et se retrouve érodée lors des premières tempêtes hivernales. Son repérage et son observation nécessitent des données morphologiques très régulièrement acquises dans le temps, enregistrant les évolutions du haut de plage. Ces données ne sont malheureusement pas disponibles sur l'ensemble des plages de nos côtes. Pour cette raison, le sommet de la berme n'est donc probablement pas un indicateur qui convienne parfaitement pour les applications opérationnelles visées par ces travaux. Si les données existent, il convient toutefois de ne pas les négliger.

■ Sommet de dune

Le sommet de dune est un indicateur plus pérenne dans le temps et donc plus simple à observer et à cartographier que les bermes. Dans certaines configurations, il forme la limite terrestre du stock sédimentaire potentiellement mobilisé par l'érosion et l'effet possible de l'élévation du niveau de la mer. Mais dans d'autres configurations, c'est essentiellement un secteur dont l'évolution est d'abord liée à l'action éolienne. Pour ces configurations, la position et l'altitude du sommet de dune peuvent ne pas être liées à l'évolution du niveau de la mer. Le choix du sommet de dune comme limite à terre du profil de Bruun est une solution possible, mais il convient de bien la justifier par une connaissance fine du secteur d'étude et des interactions possibles de l'ensemble du front dunaire avec la mer.

■ Pied de dune

Pour les secteurs de plages sableuses traités dans cette étude, le pied de dune marque la frontière entre le haut de plage et le domaine terrestre. Le pied de dune évolue sous l'action des processus marins et de la montée du niveau de la mer. Il est également relativement simple à observer et à cartographier. C'est donc cet indicateur qui sera utilisé de façon prioritaire dans la suite de ces tests. Mais il convient toujours de préciser les méthodes appliquées pour déterminer la position de cet indicateur à partir des données existantes. De plus, l'utilisation de cet indicateur implique de ne pas prendre en compte des stocks sédimentaires inclus dans la dune et potentiellement impactés par la montée du niveau de la mer. Ce choix aura tendance à surestimer les reculs du trait de côte par rapport à un indicateur placé au sommet de la dune.

Fiche 3.5 : Mise en œuvre de la règle de Bruun pour la réalisation de projections probabilistes d'évolution du trait de côte

Le modèle COASTAUD *(COASTAl Uncertainties Demystification,* Le Cozannet *et al.* 2019[11]*)* est un outil dédié à la production de projections probabilistes d'évolution du trait de côte sous l'influence de la montée du niveau de la mer. Il a été développé par le BRGM dans un cadre de recherche, mais vise à être opérationnel à court terme et à faciliter la fourniture de projections d'évolution du trait de côte exploitable pour les études d'aléas littoraux. C'est un outil modulaire et évolutif, qui est amené à intégrer des éléments nouveaux issus des progrès scientifiques et des développements à conduire. Les principes de l'approche et la mise en œuvre de l'outil sont présentés dans deux rapports BRGM (Desmazes *et al.* 2017[12] et Desmazes *et al.* 2019[13]).

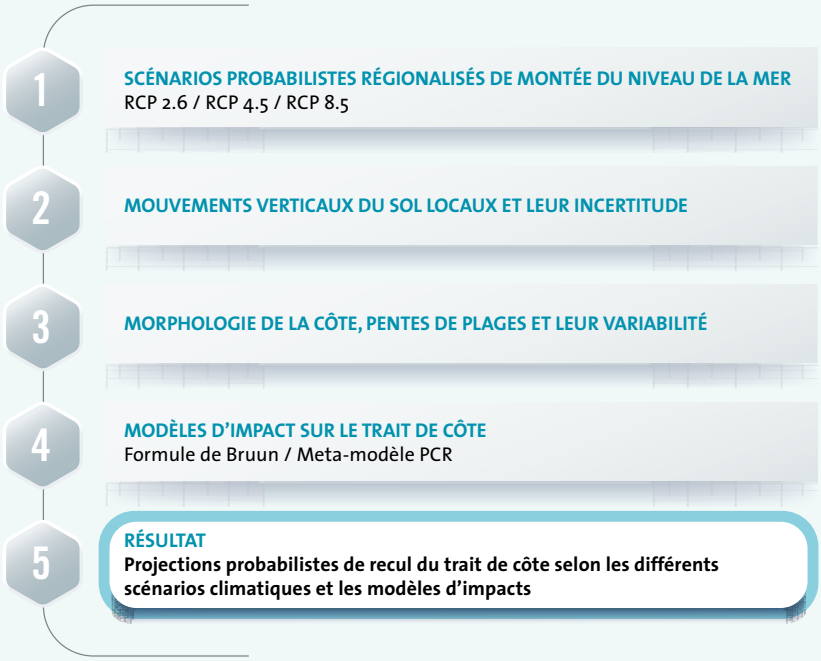


Figure 42 : Caractéristiques principales du modèle COASTAUD. *Présentation des données entrantes et modèles d'impacts basés sur les pentes, utilisés pour établir des projections de recul du trait de côte sous l'effet de la montée du niveau de la mer. BRGM*

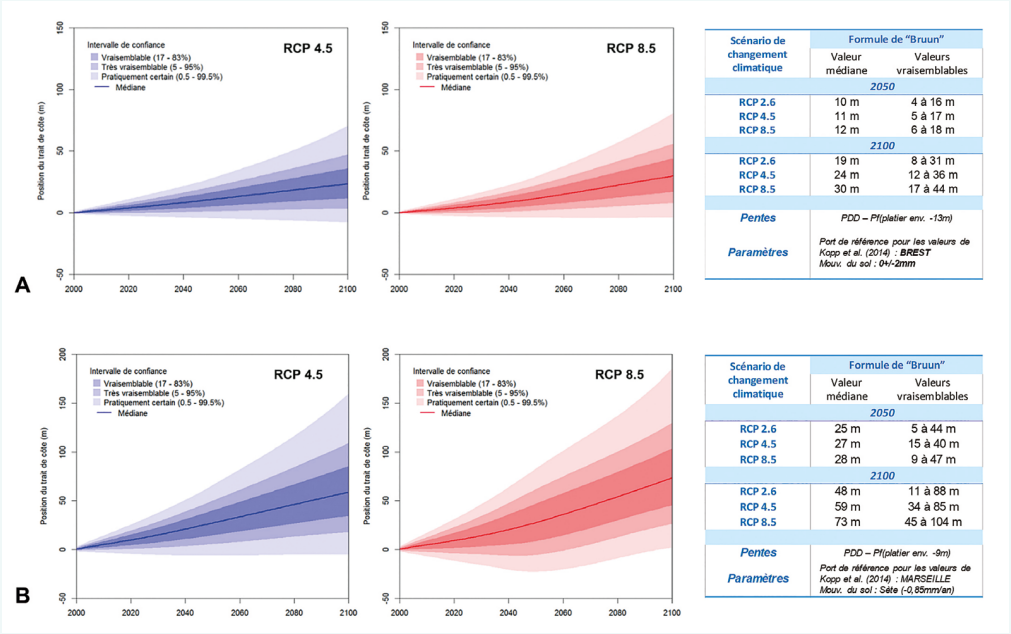
Deux secteurs ont été étudiés, pour illustrer la réalisation de projections probabilistes du recul du trait de côte en 2050 et 2100 : un premier secteur de plage « Manche », situé en environnement à très fort marnage, et un secteur de plage « Golfe du Lion », situé sur un lido.

---

11 – **Le Cozannet G., Bulteau T., Castelle B., Ranasinghe R., Wöppelmann G., Rohmer J., Bernon N., Idier D., Louisor J. et Salas-y-Mélia D.** (2019) - *Quantifying uncertainties of sandy shoreline change projections as sea level rises.* Scientific Reports, 9, (1), p. 42.

12 – **Desmazes, F, Le Cozannet, G., Maspataud, A.** (2017) - *Travaux méthodologiques pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer pour l'aléa « recul du trait de côte ».* Rapport final. BRGM/RP-67403-FR, 81 p., 32 Illustrations.

13 – **Desmazes F., Maspataud A., Elineau S., Billy J., Le Cozannet G.** (2019) - *Comparaison de méthodes pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer sur l'aléa recul du trait de côte des PPRL : application sur deux sites métropolitains.* Rapport final. BRGM/RP-68626-FR, 101 p., 45 ill., 2 ann.



Scénario de changement climatique	Formule de "Bruun"	
	Valeur médiane	Valeurs vraisemblables
2050		
RCP 2.6	10 m	4 à 16 m
RCP 4.5	11 m	5 à 17 m
RCP 8.5	12 m	6 à 18 m
2100		
RCP 2.6	19 m	8 à 31 m
RCP 4.5	24 m	12 à 36 m
RCP 8.5	30 m	17 à 44 m
Pentes	*PDD – Pf(platier env. -13m)*	
Paramètres	*Port de référence pour les valeurs de Kopp et al. (2014) : BREST Mouv. du sol : 0+/-2mm*	

Scénario de changement climatique	Formule de "Bruun"	
	Valeur médiane	Valeurs vraisemblables
2050		
RCP 2.6	25 m	5 à 44 m
RCP 4.5	27 m	15 à 40 m
RCP 8.5	28 m	9 à 47 m
2100		
RCP 2.6	48 m	11 à 88 m
RCP 4.5	59 m	34 à 85 m
RCP 8.5	73 m	45 à 104 m
Pentes	*PDD – Pf(platier env. -9m)*	
Paramètres	*Port de référence pour les valeurs de Kopp et al. (2014) : MARSEILLE Mouv. du sol : Sète (-0,85mm/an)*	

***Figure 43 : Projections d'évolution du trait de côte** pour le site d'étude dans la configuration « Bruun probabiliste », selon les projections d'élévation du niveau marin de Kopp* et al. *2014, intégrant les mouvements du sol, et pour trois scénarios de changement climatique (RCP 4.5 et 8.5) et résultat des projections aux horizons 2050 et 2100 pour les scénarios (RCP 2.6, 4.5 et 8.5). A) Cas « Manche ». B) Cas « Golfe du Lion ».* BRGM, Desmazes et al. *2019*

Fiche 3.6 : Développement des outils de modélisation pour améliorer la réalisation de projections d'évolution du trait de côte à long terme

Le développement de **modèles dits « à complexité réduite »** permet d'envisager des projections probabilistes d'évolution du trait de côte sur le long terme. Ils se concentrent sur les processus dominants du littoral. Leur caractère modulaire supporte une analyse des contributions de chacun des processus en jeu, passés ou futurs. Souvent appliqués sur des cas idéalisés, ces modèles ont pour la plupart déjà été mis en œuvre sur des sites en conditions réelles. Ces modèles s'appuient sur des jeux de données de suivi du trait de côte disponibles sur plusieurs années ou décennies, avec une résolution temporelle variable, parfois à haute fréquence en cas d'évènement érosif intense. Ces outils sont en développement, leur amélioration dépendant étroitement de la disponibilité de données de suivi du trait de côte sur des périodes suffisamment longues (plusieurs décennies), à des fréquences adaptées aux suivis des évolutions (mensuelles) pour permettre de diminuer les incertitudes associées.

Pour les territoires présentant une sensibilité particulière au recul du trait de côte et disposant de données morpho-sédimentaires régulièrement collectées, il apparaît opportun de travailler à la conception de ce type de modèle.

Une autre approche s'appuie sur des modèles permettant de mieux décrire les phénomènes de transport sédimentaire (parallèlement et perpendiculairement à la côte) et de mieux prendre en compte des paramètres comme les vagues et la montée du niveau de la mer. Ces **modèles numériques complexes (2D, 3D)** résolvent numériquement les équations concernant des forçages hydrodynamiques et calculent le transport sédimentaire associé, afin de modéliser la réponse morphologique des systèmes littoraux (X-Beach, Delft3D...). Ils requièrent souvent une densité spatiale et temporelle de données encore peu disponibles. De telles méthodes sont donc souvent difficilement applicables au-delà d'échelles multi-décennales, en raison notamment de leurs coûts élevés en temps de calcul.

Des **modèles uniquement fondés sur des données**, utilisant des méthodes statistiques calibrées à partir d'observations, représentent une autre approche largement utilisée pour estimer l'évolution à long terme du littoral.

Les développements d'approches combinées, associant des modèles numériques complexes, des modèles basés sur des données historiques et des synthèses de modèles de complexité réduite, et tirant parti de leurs avantages respectifs sont à envisager pour répondre aux besoins de projection du trait de côte.

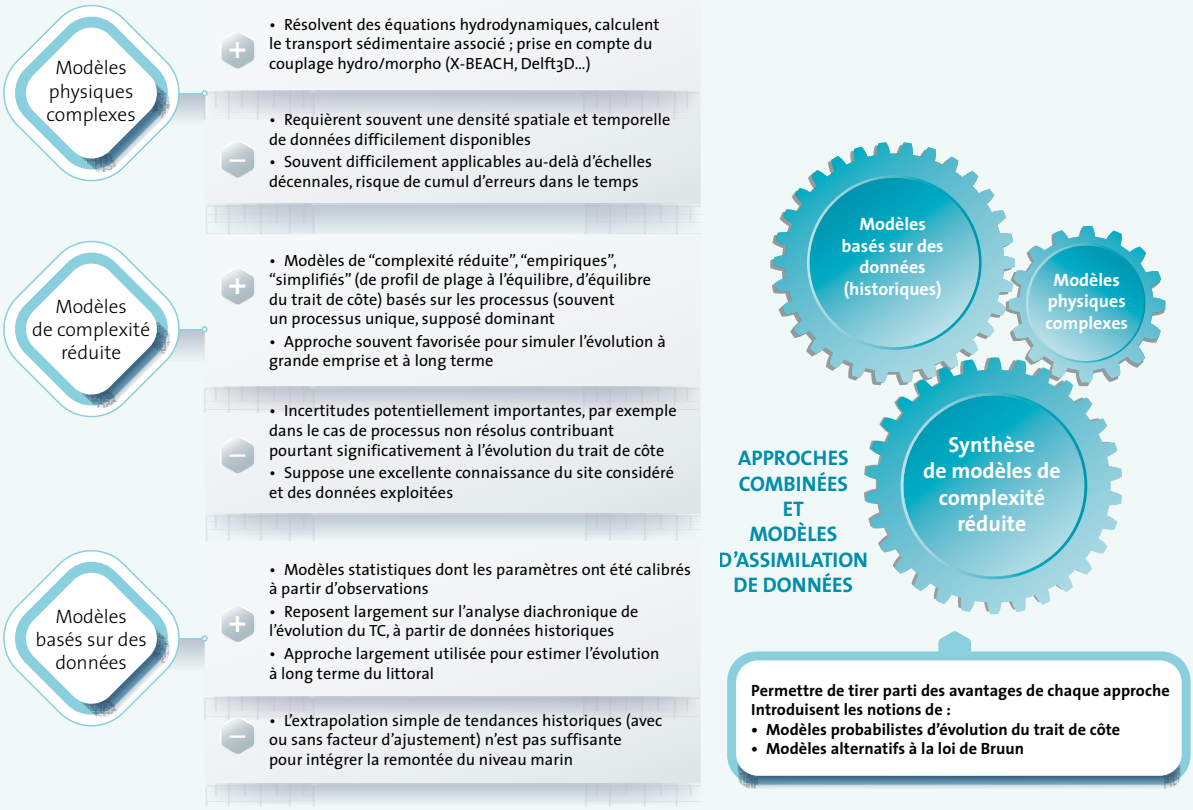


Figure 44 : Différents modèles d'évolution côtière. *BRGM, Desmazes et al. 2017*

Fiche 3.7 : Présentation du modèle PCR (Probabilistic Coastline Recession)[14]

Le modèle *Probabilistic Coastline Recession* de Ranasinghe *et al.* (2012)15 est un modèle probabiliste de recul du trait de côte basé sur les processus physiques. Ces auteurs l'ont développé pour fournir une alternative crédible à l'utilisation de la règle de Bruun, souvent jugée trop simpliste.

Les auteurs constatent d'abord que la production d'une valeur unique et déterministe du recul du trait de côte sous l'effet de la montée du niveau de la mer n'est plus suffisante pour les besoins spécifiques des gestionnaires des risques côtiers. La quantification des incertitudes et la mise en œuvre d'approches probabilistes pour l'évaluation des aléas apparaissent alors nécessaires à la construction des stratégies à moyen et long terme.

La règle de Bruun est une approche d'évaluation du recul du trait de côte qui ne prend pas en compte explicitement les processus en œuvre sur les côtes sableuses contrairement au modèle PCR de Ranasinghe *et al.* (2012), qui vise à reproduire l'effet de l'élévation du niveau de la mer sur le trait de côte en évaluant les échanges de sédiments entre la zone intertidale et la dune lors des tempêtes. Ainsi, lorsque les vagues de tempête atteignent le pied de dune, le front dunaire est érodé et le trait de côte recule. Par temps calme, les processus éoliens nourrissent la dune, favorisant la reconstruction du front dunaire et l'avancée du trait de côte.

■ Reproduction de l'érosion dunaire lors d'une tempête

Pour reproduire l'érosion dunaire lors d'une tempête, les auteurs font l'inventaire des modèles existants et choisissent d'employer la formule de Larson *et al.* (2004) qui estime un poids de sable érodé en fonction de la force des vagues impactant le front dunaire (Figure 45). La force d'impact d'une vague sur la dune est une fonction de sa propagation sous forme de jet de rive sur la pente du haut de plage.

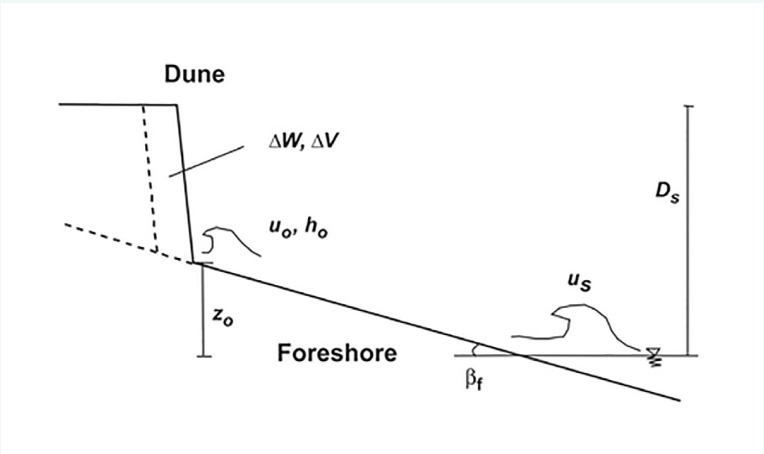


***Figure 45 : Illustration du modèle d'érosion dunaire**, utilisée par Ranasinghe* et al. *2012 pour estimer l'effet de l'élévation du niveau de la mer sur le recul du pied de dune. Foreshore signifie estran. Larson* et al. *2004*

---

14 – Les références bibliographiques de cette fiche sont disponibles dans le rapport :
Desmazes F., Maspataud A., Elineau S., Billy J., Le Cozannet G. (2019) – *Comparaison de méthodes pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer sur l'aléa recul du trait de côte des PPRL : application sur deux sites métropolitains*. Rapport final. BRGM/RP-68626-FR, 101 p., 45 ill., 2 ann.

15 – **Ranasinghe, R., Callaghan, D., Stive, M.J.F.**, 2012. *Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule.* Climatic Change 110, 561–574. https://doi.org/DOI 10.1007/s10584-011-0107-8

La Figure 45 présente les paramètres les plus importants du modèle de Larson *et al.* (2004), ainsi :

- ΔW et ΔV : respectivement poids et volume de sable déplacé de la dune vers la plage sous l'effet de l'impact d'une vague. La détermination de ces paramètres par la formule de Larson permet le calcul du recul généré par une/des vagues le long de la pente de plage ;
- $ß_f$: pente de la zone intertidale ;
- u_s, vitesse initiale de la vague se propageant sur la plage sous forme de jet de rive et u_0, vitesse au niveau du pied de dune ; h_0, hauteur de la vague se déplaçant sous forme de jet de rive. Ces paramètres permettent l'estimation de la force de la vague impactant le front dunaire. Ils sont fournis par un modèle de propagation des vagues ;
- z_0 et D_s : respectivement altitudes moyennes du pied de dune et de la crête de dune, repérées par rapport au niveau moyen de l'eau instantané. Ces paramètres intègrent donc la topographie et le niveau d'eau qui prend en compte notamment la marée, la surcote de tempête et la montée du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique.

■ Reconstruction du front dunaire en période de calme

Entre chaque tempête capable d'éroder le front dunaire, le taux de reconstruction de la dune est évalué de façon empirique, à partir de séries d'observations de terrain suffisamment longues et mesurant correctement le phénomène.

■ Évolution sur le long terme

Le modèle PCR est conçu pour proposer une évaluation de l'évolution du trait de côte sur le long terme. Il permet donc de générer les paramètres de vagues entrant dans le modèle de Larson *et al.* (2014) pour une série de très nombreuses tempêtes pouvant impacter la dune jusqu'à l'échéance souhaitée (2100). Les paramètres nécessaires pour chaque tempête individuelle sont :

- hauteur significative, période et direction des vagues au large ;
- surcote locale, qui viendra s'ajouter à la montée du niveau de la mer ;
- durée de la tempête et le délai jusqu'à la prochaine tempête.

Dans le cadre des travaux de Ranasinghe *et al.* (2012), la détermination de ces paramètres est issue d'une analyse statistique de longues séries de mesures (ou de modélisations rétrospectives) de vagues et de surcotes selon la méthode de Callaghan *et al.* (2008).

■ Résultats probabilistes

Le caractère probabiliste des résultats de recul du trait de côte du modèle PCR de Ranasinghe *et al.* (2012) est lié à l'utilisation de très nombreuses séries de tempêtes qui fournissent, au final, un grand nombre de données de recul à long terme.

Ainsi, les fonctions de probabilités conjointes établies localement pour les sites d'étude sont exploitées à l'aide de simulations de Monte-Carlo pour fournir l'ensemble des séries de tempêtes nécessaire à l'approche probabiliste. Ces séries de tempêtes sont établies de façon pseudo-aléatoires ce qui garantit des combinaisons suffisamment différentes d'évènements, tout en conservant, selon les auteurs, des paramètres qui restent réalistes par rapport aux distributions temporelles connues par les mesures ou les modèles rétrospectifs.

Au bilan, le modèle de Ranasinghe *et al.* (2012) utilise un grand nombre de séries de tempêtes qui fournissent des probabilités de recul dunaire à l'échéance 2100. Pour chaque série temporelle, le recul total est estimé par un bilan des érosions liées aux évènements extrêmes et des périodes de reconstruction de la dune. Pour chaque séquence individuelle de tempête et de reconstruction, le modèle PCR calcule les paramètres nécessaires à la formule de Larson *et al.* (2004) en simulant

la propagation des vagues vers la côte et en prenant en compte le niveau de la mer influencé par le changement climatique. Puis la formule est appliquée pour déterminer les volumes de dune érodée durant une tempête et le recul associé. Le délai jusqu'au prochain évènement extrême est pris en compte pour estimer la reconstruction jusqu'à la prochaine tempête qui relance le cycle de modélisation.

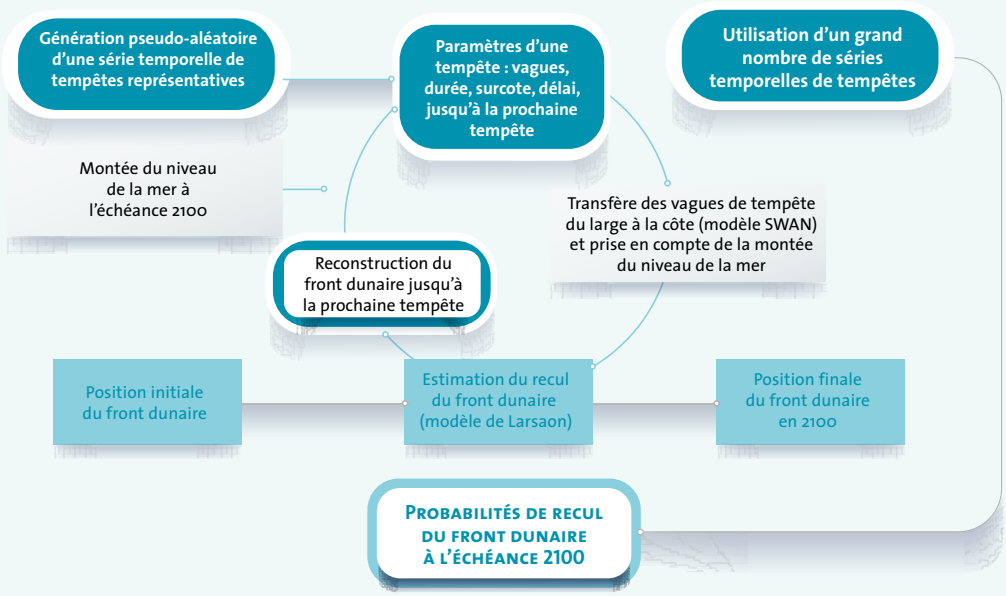


Figure 46 : Schéma de synthèse présentant une implémentation du modèle PCR « Probabilistic Coastal Recession » de Ranasinghe et al. 2012. *BRGM, Desmazes et al. 2019*

Les résultats produits par le modèle PCR original prennent la forme de courbes de probabilité de dépassement (Figure 47). Pour la plage de Narrabeen en Australie, on note que pour une montée du niveau de la mer de 0,92 m en 2100, la probabilité d'un recul du trait de côte supérieur à 20 m est de 50 % (R/S_{2100} = 22). De plus, selon les résultats du modèle PCR, il y a 1 % de probabilité de dépassement d'un recul de 44 m (R/S_{2100} = 44).

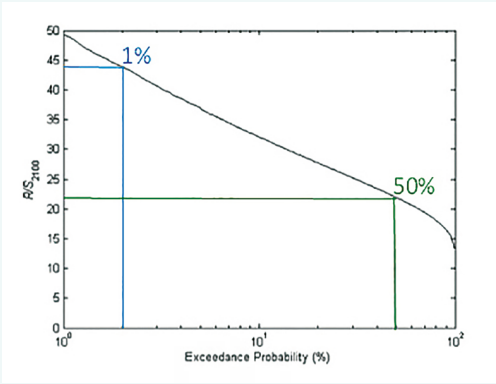


Figure 47 : Résultat du modèle PCR pour la plage de Narrabeen, Sydney, Australie. *Estimation probabiliste de recul du trait de côte (R) par rapport à la montée du niveau de la mer (S) pour l'année 2100. Ranasinghe et al. 2012*

Fiche 3.8 : Évolution et impacts des autres processus météo-marins

L'élévation du niveau marin n'est pas la seule conséquence du changement climatique. Il engendrera de nombreux autres phénomènes qui affecteront le littoral et potentiellement le recul du trait de côte.

Le changement de la direction moyenne des houles par exemple, de quelques degrés, peut ainsi impacter les transports de dérive littorale sur le long terme et ainsi modifier le taux moyen d'érosion. Des études récentes ont souligné le fait que des **épisodes de submersion marine et d'érosion côtière intenses**, survenant lors de tempêtes, pourraient être **plus fréquents**. Des niveaux d'eau atteints aujourd'hui « en moyenne » une fois par siècle pourraient être atteints « en moyenne » tous les 10 ans et moins d'ici à la fin du XXIe siècle, en raison de l'élévation du niveau de la mer. Également, la montée du niveau marin pourrait modifier **l'amplitude de la marée, les courants, les vagues**, de manière plus ou moins significative suivant les territoires.

Ces modifications associées, entre autres, à **l'appauvrissement des stocks sédimentaires sableux côtiers** et à **l'action humaine**, auront des effets sur l'évolution morphologique (et topographique) des littoraux, contribuant à amplifier le phénomène de recul du trait de côte.

Outre des phénomènes climatiques aggravés, l'évolution du climat modifiant la **fréquence, l'intensité, la répartition géographique et la durée d'évènements météorologiques extrêmes** (tempêtes, cyclones), le changement climatique se traduira également à moyen et long terme par d'autres effets importants tout particulièrement sur les littoraux français ultramarins :

- les **climats ultramarins** sont très différents du climat métropolitain. Excepté Saint-Pierre-et-Miquelon (ainsi que les Terres australes et antarctiques françaises), l'outre-mer français est principalement situé en zone tropicale. Cette situation induit une très forte exposition de ces territoires aux aléas météo-marins (cyclones, tempêtes, etc.) et à l'élévation du niveau de la mer, en complément d'autres facteurs qui influencent grandement la dynamique du trait de côte (facteurs géodynamiques, biologiques et anthropogéniques) ;
- le changement climatique modifiant la répartition des pluies, il est attendu que les précipitations augmentent aux hautes latitudes, tandis qu'une baisse est projetée dans une grande partie des régions subtropicales ;
- **l'acidification de l'eau de mer** par l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère entraînant une plus forte concentration du CO_2 dans l'océan. Ces changements affectent les écosystèmes marins, aussi bien que les populations qui dépendent de ceux-ci, et ils se poursuivront au moins jusqu'à la fin de ce siècle. Cette acidification représente un **risque majeur pour les récifs coralliens** en particulier (et plus largement tous les systèmes littoraux avec apport de sédiment d'origine biogène) et **menace l'équilibre de nombreux écosystèmes**. La disparition d'au moins 70 % de la couverture corallienne en zone tropicale d'ici le milieu du XXIe siècle aura vraisemblablement des effets sur l'érosion du littoral comme sur les risques de submersion marine ;
- la **perturbation des grands équilibres écologiques**, déjà observée, et le bouleversement de nombreux écosystèmes (qui s'efforcent de s'adapter ou disparaissent) sous les **effets conjugués du changement climatique et de la pression de l'Homme sur leur environnement**. C'est tout particulièrement le cas des **bioconstructions**, tels que les récifs coralliens, les **écosystèmes comme les mangroves**, etc. dont l'évolution future sera dépendante de l'évolution du climat. Une dégradation importante ou la disparition de ces constructions aura des incidences sur leur rôle protecteur et donc sur l'évolution du trait de côte ;
- aux hautes latitudes, d'autres effets du changement climatique sont déjà observés à travers la disparition du pied de glace qui pouvait jouer un rôle de protection face aux agents météo-marins. Sa disparition se traduit localement par une érosion accrue, et par conséquent un recul du trait de côte notable (accentué par le déficit en ressource sédimentaire).

Fiche technique pour la partie "Méthodologie pour la cartographie de la projection du trait de côte"

Fiche 4.1 : Approche experte, prise en compte de tendances d'évolutions non-linéaires d'une côte complexe

À titre d'exemple, plusieurs cas théoriques sont proposés pour illustrer des côtes complexes, nécessitant de formuler des scénarios d'évolution à dire d'expert, pour réaliser des projections de trait de côte.

■ **Cas 1** (côte à plage de poche, petite embouchure sur un segment côtier, rechargement ponctuel moyen terme)
- les phénomènes à l'origine des évolutions non-linéaires du littoral sont connus et durables à l'échelle des échéances étudiées ;
- l'emprise géographique de ces phénomènes est stable à l'échelle spatiale des segments du territoire.

Recommandation : Les scénarios formulés par segments prennent en compte des taux d'évolutions variables en fonction du temps. Les taux d'évolutions proviennent des observations et connaissances élaborées par segment. La durée et les modalités de chaque séquence des scénarios sont élaborées à dire d'expert et justifiées par la connaissance préalable de la dynamique du milieu.

■ **Cas 2** (migration de banc, de chenaux, rechargement massif)
- les phénomènes à l'origine des évolutions non-linéaires du littoral sont connus et durables à l'échelle des échéances étudiées ;
- l'emprise géographique de ces phénomènes varie entre les segments, à l'échelle spatiale du territoire ou des cellules hydro-sédimentaires.

Recommandation : Les scénarios formulés à l'échelle adaptée (segment, cellules hydro-sédimentaire ou territoire) prennent en compte des taux d'évolutions variables en fonction du temps. Les taux d'évolutions proviennent des observations et connaissances à l'échelle du territoire affecté par le processus, plus précisément, les observations réalisées sur les segments affectés par les phénomènes sont utilisées pour justifier des choix de taux d'évolution du trait de côte. La durée et les modalités de chaque séquence des scénarios, le choix des taux d'évolutions et leur emprise spatiale sont élaborés à dire d'expert et justifiés par la connaissance préalable de la dynamique du milieu.

■ **Cas 3** (secteur avec rupture de fonctionnement, changement de nature, travaux d'aménagement ou de gestion nouvelle, etc.)
- les phénomènes à l'origine des évolutions non-linéaires du littoral sont mal connus et évolutifs pour les échéances étudiées ;
- l'emprise géographique de ces phénomènes varie entre les segments, à l'échelle spatiale du territoire ou des cellules hydro-sédimentaires ;
- des hypothèses d'évolutions et des choix de taux d'évolution, qui n'ont pas été observés localement, sont envisageables.

Recommandation : Les scénarios formulés à l'échelle adaptée (segment, cellules hydro-sédimentaires ou territoire) prennent en compte des taux d'évolutions variables en fonction du temps. Les taux d'évolutions proviennent des observations et connaissances acquises à l'échelle du territoire affecté par le processus et de taux modifiés par des hypothèses proposées à dire d'expert.

Glossaire[16]

A

Affouillement
Érosion d'un rivage, due aux courants et aux vagues, ou dégradation des ouvrages côtiers qui en résulte.

Arrière-côte
Partie située en retrait du rivage, côté terre.

Avant-côte
Partie du domaine subtidal proche du rivage, concernée par les échanges avec la côte.

B

Brise-lames
Ouvrage de protection du littoral détaché en mer parallèlement au trait de côte, permettant de diminuer l'énergie de la houle incidente par déferlement.

Budget sédimentaire
Bilan des apports et des pertes de sédiment sur une zone.

C

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

D

Déferlement (des vagues)
Déformation rapide du profil de l'onde, associé à la production de turbulence et de perte d'énergie. Le déferlement des vagues aboutit aussi à un transfert de quantité de mouvement, principale cause de l'accélération des courants de surface, ainsi que de la dérive littorale.

Déflation éolienne
Érosion provoquée par le vent.

Dérive littorale
Flux de sédiments sensiblement parallèle au rivage, en proche côtier, résultant de différentes causes : houle, courants, vent.

---

16 – La majorité des définitions de ce glossaire sont issues de l'ouvrage : MEDDE, 2010. *La gestion du trait de côte*, ed. Quae. 289 p.

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

- **Diffraction**
Processus subi par les ondes au voisinage d'un obstacle, se traduisant par une redistribution locale de l'énergie, qui se manifeste pour la houle par un changement d'amplitude, de direction et de célérité.

- **Digue côtière**
Ouvrage de protection du littoral longitudinal, sur le trait de côte ou en rétro-littoral, faisant obstacle à l'écoulement et permettant ainsi de lutter contre la submersion marine.

E

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

- **Épi**
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.

- **Estran**
Zone comprise entre les plus hautes et les plus basses mers connues ou zone de balancement des marées.

- **État de mer**
Agitation locale de la mer due à la superposition de la mer de vent et de la houle.

F

- **Falaise vive/Falaise morte**
Une falaise vive est régulièrement en contact avec la mer, au contraire d'une falaise morte dont l'évolution n'est plus liée à l'action de la mer.

- **Flèche**
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'avançant en mer.

- **Forçage**
Facteurs météo-marins auxquels le système est exposé (vagues, niveaux etc.).

G

- **Ganivelle**
Brise-vent constitué de lattes fendues de bois (le plus souvent de châtaignier) verticales liées par des fils d'acier galvanisés, constituant un obstacle au transport éolien et permettant ainsi la reconstitution et la protection des dunes littorales.

• Géomorphologie
Discipline scientifique dont l'objet est de nommer et de mesurer les formes du relief, mais aussi d'expliquer leur genèse et de prévoir leur évolution.

• Glissement
Mouvement entraînant une masse de matériaux meubles vers le bas d'un versant, avec une vitesse faible (de l'ordre de quelques mètres par jour).

H

• 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.

• Hydrodynamisme
Discipline scientifique relative à l'étude des phénomènes physiques agissant sur l'écoulement et la dynamique d'une masse d'eau.

I

• Intertidal
Qualifie la zone de balancement des marées comprise entre les niveaux des pleines et des basses mers (synonyme : estran).

• Isostasie
Ajustement vertical de la position de la croûte terrestre en réponse aux variations des charges de surface (théorie d'équilibre de la croûte terrestre par application du principe d'Archimède).

J

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

L

• Laisse de mer
Dépôt d'algues et de matériaux organiques divers abandonnés par la mer à marée haute ou après une tempête. La laisse de pleine (resp. basse) mer désigne la limite haute (resp. basse) atteinte lors des plus grandes marées astronomiques.

M

• Macrotidal/Mésotidal
Qualifie un milieu subissant des amplitudes de marée de 2 à 4 m pour mésotidal et de plus de 4 à 5 m pour macrotidal.

• Marnage
Amplitude de marée correspondant à la différence de hauteur d'eau entre le niveau de la pleine mer et celui de la basse mer qui la suit ou la précède immédiatement.

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

• Modèle numérique de terrain (MNT)
Un Modèle Numérique de Terrain est une représentation de la topographie (altimétrie et/ou bathymétrie) d'une zone terrestre sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur.

P

• Perré
Ouvrage allongé et parallèle au rivage, constitué d'un revêtement recouvrant un talus auto-stable, destiné à assurer un maintien du trait de côte et éventuellement lutter contre la submersion marine.

• Petits-fonds
Fonds marins de très faible profondeur (entre 0 et - 5 m), situés en très proche côtier.
Pleine mer (resp. Basse mer) : Niveau le plus élevé (resp. bas) atteint par le flot (resp. jusant) au cours d'un cycle de marée (synonyme : marée haute/basse).

• Polder
Étendue de terres gagnées sur la mer, par endiguement et drainage (SMCO, 2003).

• Poldérisation
Action d'endiguer et d'assécher des marais littoraux ou des zones basses gagnées sur la mer afin d'étendre les terres cultivables.

• Profondeur de fermeture
Profondeur limite d'action de la houle au-delà de laquelle la mobilisation des sédiments est considérée comme nulle.

• Progradation
Avancée vers le large d'une construction sédimentaire (marge continentale, estran, front de delta, etc.) due à un budget sédimentaire positif.

Q

• Quantile
En statistiques, désigne un paramètre qui permet de partitionner une distribution en classes d'effectifs égaux. Le quantile X % correspond à la valeur maximale observée X % du temps et est noté QX %.

R

• Régression/Transgression (marine)
Abaissement (resp. élévation) du niveau moyen de la mer à l'échelle des temps géologiques.

• Résilience
Capacité d'un milieu à résister à des agressions ou à retrouver son intégrité.

S

• Sédimentation
Processus selon lequel des particules se déposent sous forme de sédiments et éventuellement se consolident pour former une roche sédimentaire.

- **Subsidence**

Abaissement du niveau de la terre par mouvement tectonique.

- **Subtidal/Supratidal**

Qualifie les fonds marins côtiers s'étendant en dessous (resp. au-dessus) du niveau des plus basses (resp. hautes) mers de vive-eau.

- **Surcote marine (resp. décote marine)**

Élévation exceptionnelle (resp. abaissement exceptionnel) du niveau marin qui dure quelques heures et qui s'explique par une baisse (resp. hausse) de la pression atmosphérique et des vents forts soufflant vers la terre (resp. vers la mer).

T

- **Transgression/Régression**

Avancée (resp. retrait) de la mer au-delà (resp. en deçà) de ses limites antérieures avec submersion (resp. émersion) de zones plus ou moins vastes des parties basses des continents. Elle est due soit à la remontée (resp. baisse) du niveau de la mer (eustatisme), soit à un enfoncement (resp. soulèvement) général du continent (épirogenèse), ces deux phénomènes pouvant se combiner. La régression peut être également due à un apport important de sédiments, ce phénomène pouvant se combiner aux deux précédents (d'après Foucault et Raoult, 2005).

Le trait de côte évolue naturellement du fait des phénomènes hydro-sédimentaires. En France, près de 20 % du trait de côte naturel est en recul. C'est pourquoi la connaissance et la prise en compte de son évolution dans l'aménagement du littoral sont essentielles pour anticiper l'adaptation des territoires.

Les **recommandations pour l'élaboration de la carte locale d'exposition au recul du trait de côte** s'adressent aux communes dont l'action en matière d'urbanisme et la politique d'aménagement doivent être adaptées aux phénomènes hydro-sédimentaires entraînant l'érosion du littoral, telles qu'identifiées conformément à l'article L. 321-15 du code de l'environnement créé par la loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets.

Pour être en mesure d'adapter leurs territoires, ces communes établissent une carte locale d'exposition au recul du trait de côte à moyen et long terme (30 et 100 ans). Cette carte est un outil de connaissance et d'anticipation complémentaire aux orientations des stratégies locales de gestion intégrée du trait de côte (SLGITC) lorsqu'elles existent, et cohérente avec les stratégies nationales de gestion intégrée du trait de côte (SNGITC) et de gestion des risques d'inondation (SNGRI).

Ces recommandations s'adressent également aux établissements publics de coopération intercommunale – EPCI – compétents et aux éventuels prestataires mandatés par les collectivités pour les accompagner dans l'élaboration de cette carte.

Elles ont pour but de donner des repères méthodologiques concernant les principales questions à se poser et les tâches à réaliser afin d'aboutir à une carte de projection du recul du trait de côte pertinente et adaptée au contexte local.

Ce document traduit la volonté de l'État d'accompagner les collectivités dans la prise en compte de l'évolution du trait de côte dans les politiques d'aménagement du littoral afin d'anticiper et d'adapter leur territoire au recul du trait de côte.

Il est le fruit des travaux menés par le BRGM et le Cerema, accompagnés d'un groupe de travail rassemblant des représentants des services déconcentrés de l'État, l'Université de Caen Normandie et Nantes Université, sous le pilotage du ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires (milieux naturels et littoral, risques naturels, aménagement). Les associations d'élus (ANEL, AMF) et le Conservatoire des espaces littoraux et des rivages lacustres ont été consultés sur le document.

BRGM
3, avenue Claude Guillemin
BP 36009
45060 Orléans cedex 2
02 38 64 34 34
www.brgm.fr

CEREMA
Cité des mobilités
25 avenue François Mitterrand,
CS92803
69674 Bron Cedex
04 72 14 30 30
www.cerema.fr

9 782715 927919

9 782371 805668

brgmeditions

Cerema éditions