

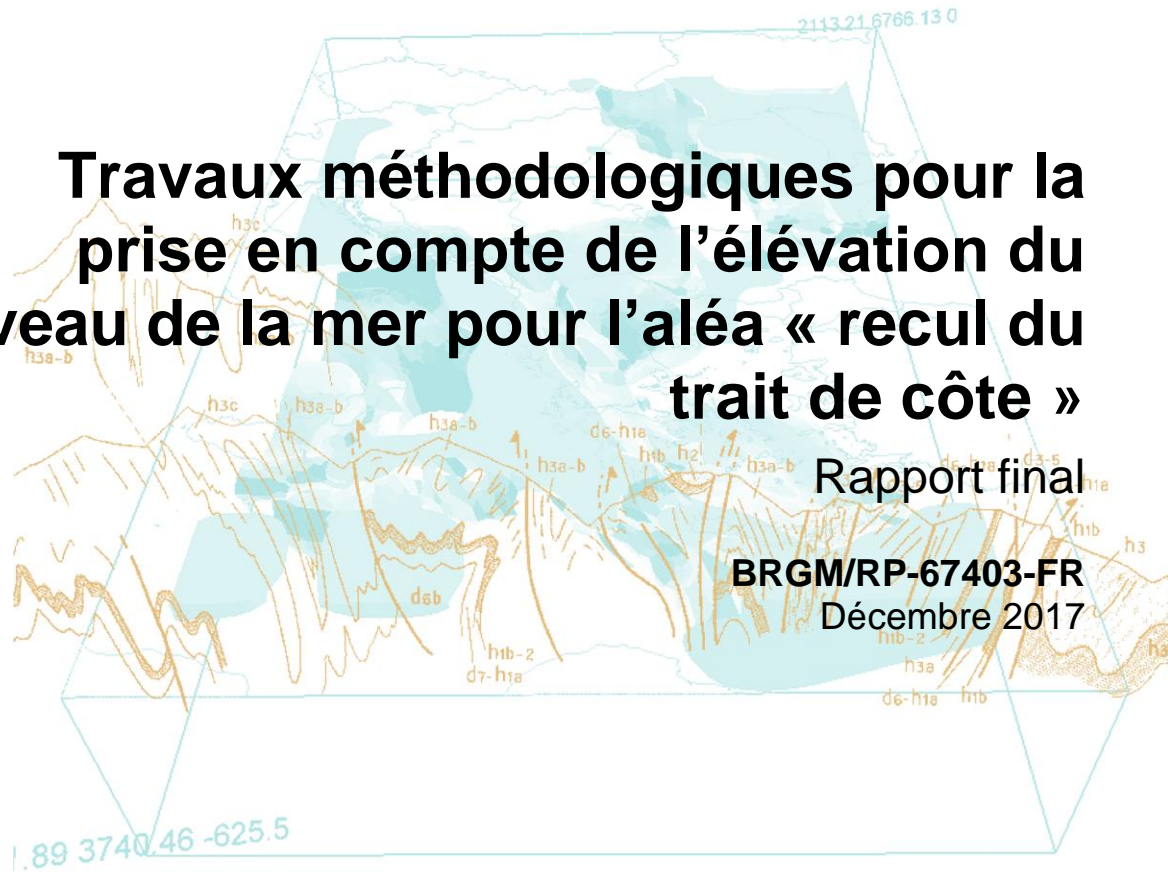


# Travaux méthodologiques pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer pour l'aléa « recul du trait de côte »

Rapport final

BRGM/RP-67403-FR

Décembre 2017



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



# 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**  
Décembre 2017

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM

**Franck Desmazes, Gonéri Le Cozannet, Aurélie Maspataud,**

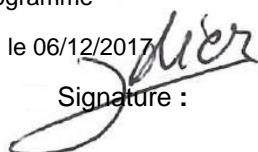
**Vérificateur :**

Nom : Déborah Idier

Fonction : Responsable scientifique  
de programme

Date : le 06/12/2017

Signature :



**Approbateur :**

Nom : Carlos Oliveros

Fonction : Responsable d'Unité

Date : le 06/12/2017

Signature :



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

**Mots-clés** : Érosion littorale, Niveau de la mer, Érosion du trait de côte.

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

**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.

## Synthèse

Cette étude est réalisée dans le cadre du programme de travail DGPR-BRGM de l'année 2017. Elle a pour objectif de proposer des méthodes pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer dans l'estimation de l'évolution du trait de côte sableux (plages) dans le contexte du changement climatique. Ce rapport présente des travaux de recherche transférables vers la sphère des applications opérationnelles, telles qu'attendues dans les travaux de cartographie de l'évolution du trait de côte. Le destinataire de cette étude est la DGPR/SRNH/BRIL (cf. liste des abréviations en page 11).

En premier lieu, une revue d'études portant sur l'aléa « recul du trait de côte » sur les côtes sableuses montre que, dans les rares cas où l'impact de l'élévation du niveau de la mer est traité, différentes méthodes sont appliquées pour estimer ces effets. Il en résulte une hétérogénéité de traitement de l'élévation du niveau de la mer pour l'aléa « recul du trait de côte » dans les études consultées.

Concernant l'élévation du niveau de la mer, différentes équipes de recherche ont produit des résultats qui pourraient être transférables et opérationnels pour les études d'appui aux politiques publiques. Ces résultats concernent :

- (a) la variabilité régionale du niveau de la mer ;
- (b) sa dynamique temporelle, au cours du 21<sup>e</sup> siècle et pour les siècles suivants ;
- (c) les mouvements verticaux du sol ;
- (d) les incertitudes associées.

Afin d'améliorer les projections d'évolution du trait de côte dans le cadre du changement climatique, un inventaire de méthodes mobilisables pour le calcul des taux d'évolution du trait de côte sableux a été réalisé. Il concerne deux aspects :

- (a) les méthodes d'analyse des taux d'évolution passés, pour lesquels des recherches ont porté sur les outils numériques d'interpolation, de filtrage et de classification, afin de traiter simultanément les questions de non-linéarités temporelles et d'hétérogénéités spatiales de l'évolution du trait de côte ;
- (b) les modèles d'impacts de l'élévation du niveau de la mer sur le trait de côte sableux. Différents types de modèles existent, mais ceux qui ont été traités plus en détails dans cette étude peuvent être approchés par le ratio entre l'élévation du niveau de la mer, et la pente de la plage. Selon les auteurs, cette pente n'est pas estimée sur la même portion du profil de plage. Ceci explique les écarts entre les différentes estimations de recul du trait de côte en réponse à l'élévation du niveau de la mer.

Enfin, ce rapport propose une méthode complétée pouvant permettre une prise en compte cohérente de l'élévation du niveau de la mer dans l'évaluation des taux d'évolution du trait de côte, passés et futurs. Elle insiste sur la nécessité de constituer un socle de connaissances, en amont de l'étude, et de définir très tôt le cadre d'incertitudes à appliquer tout le long de cette étude. Elle mentionne également la nécessité d'intervention de l'expertise du géomorphologue côtier au cours de l'étude.

À l'issue de cette étude, les recommandations suivantes sont formulées :

- Prendre en compte l'évolution des connaissances relatives aux scénarios d'élévation du niveau de la mer. Dans le cadre d'études de l'évolution future du trait de côte destinées aux politiques publiques, il s'agit de tester les conséquences de scénarios d'élévation du

niveau de la mer alternatifs aux scénarios usuels ou réglementaires et d'engager, si nécessaire, un processus de révision des scénarios de niveau de la mer préconisés.

- Restituer les incertitudes associées aux scénarios prospectifs lors de l'étude de l'aléa « recul du trait de côte », et détailler l'origine de ces incertitudes (sur les données, les méthodes de projection utilisées, l'évolution du niveau de la mer et ses impacts, sur la variabilité saisonnière à multi-décennale des traits de côte sableux, etc.).
- Examiner les implications de la mise en œuvre d'une méthode probabiliste dans la réalisation de projections futures du trait de côte et de cartographies dans le cadre d'un appui aux politiques publiques.
- Tester l'applicabilité de la méthode proposée pour la prise en compte de l'effet du niveau de la mer sur deux sites métropolitains.
- Examiner le cas d'autres littoraux, notamment lagunes, plages coralliennes et falaises peu consolidées.

# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>13</b>
1.1. CADRE DU SUJET .....	13
1.1.1. L'élévation du niveau de la mer : conséquence du changement climatique .....	13
1.1.2. Effets de l'élévation du niveau de la mer sur le recul du trait de côte .....	14
1.1.3. Submersion permanente et érosion du littoral .....	14
1.1.4. La loi de Bruun .....	14
1.1.5. Évaluation des tendances passées de l'évolution du trait de côte .....	16
1.2. LE REcul DU TRAIT DE COTE DANS LES POLITIQUES PUBLIQUES .....	20
1.2.1. Prise en compte du recul du trait de côte et de l'élévation du niveau de la mer dans les politiques publiques .....	20
1.2.2. L'aléa recul du trait de côte dans les PPRL .....	20
1.3. OBJECTIFS ET CONTENU DU RAPPORT .....	21
<b>2. Pratiques actuelles dans le cadre des PPRL .....</b>	<b>23</b>
2.1. ÉLÉVATION DU NIVEAU DE LA MER .....	23
2.1.1. Scénarios pris en compte dans le calcul de l'aléa submersion marine des PPRL .....	23
2.1.2. Comparaison des scénarios pris en compte dans le calcul de l'aléa submersion marine des PPRL aux projections globales du GIEC .....	23
2.2. ÉVOLUTION DU TRAIT DE COTE .....	25
2.2.1. Approche générale .....	25
2.2.2. Détermination du Tx .....	27
2.2.3. Prise en compte des effets de l'élévation du niveau de la mer .....	28
2.3. ÉTUDE DE CAS .....	30
2.3.1. Vue d'ensemble des études accessibles .....	30
2.3.2. Vendée (85) .....	30
2.3.3. Nord-Pas-de-Calais (58-62) .....	31
2.3.4. Finistère (29) .....	31
2.3.5. La Réunion (974) .....	32
2.3.6. Landes (40) .....	33
2.4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....	34
<b>3. Nouvelles recherches mobilisables concernant l'élévation du niveau de la mer .....</b>	<b>35</b>
3.1. PROJECTIONS DE NIVEAU DE LA MER .....	35
3.1.1. Projections régionales médianes et vraisemblables .....	35
3.1.2. Projections régionales probabilistes .....	37
3.1.3. Projections fondées sur des scénarios définis explicitement .....	38
3.1.4. Projections régionales multi-centennales .....	42

3.2. DONNEES MOBILISABLES POUR ÉVALUER LES EFFETS D'AUTRES MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL .....	42
3.3. RESSOURCES MOBILISABLES ET RECOMMANDATIONS.....	43
<b>4. Nouvelles recherches mobilisables concernant l'évolution du trait de côte .....</b>	<b>47</b>
4.1. ÉTAT DES LIEUX : TYPOLOGIE DES METHODES PERMETTANT D'ÉVALUER L'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE .....	47
4.1.1. Approches de modélisation de l'évolution du trait de côte .....	47
4.1.2. Crédibilité des approches mobilisables : validation et incertitudes.....	48
4.1.3. Types de modélisations mobilisables pour évaluer l'aléa « recul du trait de côte » .....	50
4.2. APPROCHES MOBILISABLES POUR L'ÉTUDE D'ÉVOLUTIONS PASSÉES .....	50
4.2.1. Méthode fondée sur l'expertise géomorphologique.....	50
4.2.2. Approche par segmentation en clusters .....	50
4.2.3. Méthodes d'analyse simultanée des évolutions spatio-temporelle du trait de côte.....	52
4.3. MÉTHODES MOBILISABLES POUR LA PRISE EN COMPTE DE L'ÉLÉVATION DU NIVEAU DE LA MER DANS LES PROJECTIONS DU TRAIT DE CÔTE .....	53
4.3.1. Approches uniquement fondées sur des données .....	53
4.3.2. Approches de complexité réduite .....	54
4.4. GESTION DES INCERTITUDES.....	56
4.4.1. Utilisation des lois de complexité réduites en mode probabiliste .....	56
4.4.2. Exemple d'application : loi de Bruun en mode probabiliste sur la côte aquitaine (site du Truc Vert) .....	57
4.4.3. Exemple d'application : émulation du modèle de Ranasinghe <i>et al.</i> (2012) sur la côte aquitaine (site du Truc Vert).....	60
4.4.4. Prise en compte de modèles multiples.....	61
4.5. RESSOURCES MOBILISABLES ET RECOMMANDATIONS.....	61
<b>5. Proposition de méthode .....</b>	<b>63</b>
5.1. NOUVELLE APPROCHE PROPOSEE .....	63
5.1.1. Proposition d'une équation de projection de la position du trait de côte .....	63
5.1.2. Proposition d'une méthode complétée pour la caractérisation de l'aléa « recul du trait de côte » prenant en compte la montée du niveau de la mer....	64
5.2. SOCLE DE CONNAISSANCE .....	64
5.2.1. Analyse du fonctionnement général du littoral.....	64
5.2.2. Scénarios de changement climatique et d'élévation du niveau de la mer.....	66
5.2.3. Données sur les mouvements verticaux du sol .....	66
5.2.4. Évolution du niveau marin passé.....	66
5.2.5. Estimation des incertitudes dans le cadre d'une étude de l'aléa de recul du trait de côte.....	66



5.3. ANALYSE DES ÉVOLUTIONS PASSÉES DU TRAIT DE COTE .....	67
5.3.1. Cadre général et objectifs de l'analyse des évolutions passées .....	67
5.3.2. Segmentation de premier niveau.....	68
5.3.3. Calcul des taux d'évolution bruts.....	68
5.3.4. Analyse diachronique de l'évolution du trait de côte .....	68
5.3.5. Bilan détaillé et révisé du fonctionnement hydro-sédimentaire .....	69
5.4. PROJECTIONS FUTURES D'ÉVOLUTION DU TRAIT DE COTE.....	69
5.4.1. Réalisation de projections rétrospectives .....	69
5.4.2. Réalisation des projections à échéance 2100 .....	69
5.4.3. Prise en compte des contraintes et caractéristiques locales du site d'étude ....	70
5.4.4. Réalisation de projections à échéance 2050 et au-delà de 2100.....	70
5.4.5. Analyse des sources d'incertitudes .....	70
<b>6. Conclusion.....</b>	<b>71</b>
<b>7. Bibliographie .....</b>	<b>73</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 :	Causes des variations du niveau marin relatif (adapté d'après Cazenave et Le Cozannet, 2014).....	13
Illustration 2 :	Règle d'érosion de Bruun dans des bassins sédimentaires. a) Cas d'un bassin fermé b) Cas d'un large plateau continental marin. Modifié d'après Bruun (1983). ....	15
Illustration 3 :	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. D'après Bruun (1983). ....	15
Illustration 4 :	Exemple de variabilité saisonnière et interannuelle sur la côte aquitaine (D'après Robinet et al., 2016). Les points en gris indiquent les positions observées du trait de côte. ....	17
Illustration 5 :	Représentation de positions du trait de côte sur un site d'étude en Aquitaine entre 1985 et 2014 (Source : Bernon et al., 2016). ....	18
Illustration 6 :	Exemple de suivi de l'évolution du trait de côte entre 1957 et 2010 (de l'échelle pluriannuelle à pluridécennale) dans les Hauts-de-France. ....	19
Illustration 7 :	Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer dans le cadre de l'évaluation de l'aléa « submersion marines » des plans de prévention des risques littoraux (Source : circulaire du 27 juillet 2011). ....	23
Illustration 8 :	Comparaison des scénarios de niveau de la mer des PPRL (à court terme +20cm et +60cm en 2100) aux observations et aux projections de l'élévation du niveau de la mer présentées dans le 6 <sup>ème</sup> rapport du GIEC (Données : Church et White, 2011 ; Church et al., 2013). ....	24
Illustration 9 :	Méthode adaptée de l'approche générale des PPRL lors de la mise à jour du PPRL de Mimizan (d'après Bernon et al., 2016).....	26
Illustration 10 :	Exemples de méthodes appliquées dans le cadre des PPRL.....	28
Illustration 11 :	Identification des études recensées et méthodes utilisées pour prendre en compte le changement climatique dans l'estimation de l'aléa de recul du trait de côte.....	30
Illustration 12 :	Extrait des tableaux dressant un bilan des évolutions du trait de côte à 100 ans pour des zones homogènes, avec prise en compte du changement climatique selon les 3 méthodes du rapport DGPR (2011). Source : Egis Eau (2016). ....	31
Illustration 13 :	Cartographie de la zone d'aléa de recul du trait de côte intégrant le changement climatique pour la plage des Sables Blanc à Loctudy. Source : Egis Eau (2016).....	32
Illustration 14 :	Exemple de représentation du zonage de l'aléa « recul du trait de côte » et de la prise en compte du changement climatique pour le secteur Nord-est de La Réunion (rapport BRGM/RP- 64088-FR). ....	32
Illustration 15 :	Localisation des profils utilisés pour l'application de la méthode de Bruun sur la commune de Mimizan (fond cartographique : Scan25 ©IGN) et exemple de représentation cartographique (Source : Bernon et al., 2016). ....	33
Illustration 16 :	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 (Données : GIEC ; Carson et al., 2015). ....	36
Illustration 17 :	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) (Figure préparée par Aimée Slangen pour l'article Le Cozannet et al., 2017). ....	37

Illustration 18 : Projections probabilistes de l'élévation du niveau de la mer, en 2100, pour le scénario RCP 4.5, pour des marégraphes situés en Métropole, dans les collectivités d'outre mer françaises ou à proximité (Données : Kopp et al., 2014).....	38
Illustration 19 : Contraintes globales (rouge) et implications régionales (noir) de chaque contribution à l'élévation du niveau de la mer, pour le scénario RCP 8.5 en 2100, le long de la façade Atlantique métropolitaine.....	40
Illustration 20 : Scénarios d'élévation du niveau de la mer pour les différentes régions françaises en 2100 pour le scénario RCP 8.5.....	41
Illustration 21 : Scénarios d'élévation du niveau de la mer pour les différentes régions françaises en 2100 pour le scénario RCP 2.6.....	41
Illustration 22 : Projections multicentennales d'élévation du niveau de la mer entre -21 000 ans (dernier maximum glaciaire) et +10 000 ans pour quatre scénarios d'émission de carbone, correspondant à la poursuite d'émissions (5120Gt), leur limitation drastique (1280Gt) et des scénarios intermédiaires (Données : Clark et al., 2016). ...	42
Illustration 23 : Sélection de données potentiellement mobilisables immédiatement pour affiner les scénarios de niveau de la mer des PPRL.....	44
Illustration 24 : Différents modèles d'évolution côtière.....	48
Illustration 25 : Approches mobilisables pour simuler l'évolution du trait de côte à long-terme (> 10 ans). ....	49
Illustration 26 : Approche de Burningham et French (2017) par Cluster-based segmentation. La classification est obtenue en regroupant les différentes sections du trait de côte par régimes d'évolution similaires au cours des périodes suivantes : 1881-2015 ; 1881-1990 et 1990-2015. Pour chaque période, l'évolution du trait de côte est estimée, pour chaque transect, par la régression linéaire aux moindres carrés (LRR), ou d'autres méthodes (LRR, cf. illustration 10).....	52
Illustration 27 : Modèles de complexité réduite alternatifs à la loi de Bruun. ....	55
Illustration 28 : Illustration du modèle d'érosion dunaire de Larson et al. (2004), utilisé par Ranasinghe et al. (2012) pour estimer l'effet de l'élévation du niveau de la mer sur le recul du pied de dune (Source : Larson et al., 2004).....	55
Illustration 29 : Exemple de choix de paramètres incertains intégrables dans l'équation d'évolution du trait de côte (2). ....	57
Illustration 30 : Simulations rétrospectives et projections d'évolution du trait de côte entre 1807 et 2200, selon le schéma de modélisation utilisant la loi de Bruun en mode probabiliste et combinant effets de l'élévation du niveau de la mer (loi de Bruun) et variabilité naturelle de l'évolution du trait de côte (modèle empirique), sur un site défini par les paramètres de l'illustration 29.....	59
Illustration 31 : Simulations rétrospectives et projections d'évolution du trait de côte selon le schéma de modélisation utilisant le modèle émulé de Ranasinghe et al. (2012) en mode probabiliste et combinant effets de l'élévation du niveau de la mer (Ranasinghe et al., 2012) et variabilité naturelle de l'évolution du trait de côte (modèle empirique), sur un site défini par les paramètres de l'illustration 29. ....	60
Illustration 32 : Méthode complétée pour la caractérisation de l'aléa « recul du trait de côte » prenant en compte l'effet de la montée du niveau de la mer sur une côte sableuse. Les zones ombrées indiquent les évolutions méthodologiques proposées par rapport au guide PPRL (DGPR, 2014). ....	65



## Liste des abréviations

BRIL : Bureau des Risques d’Inondation et Littoraux

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

DEB : Direction de l’Eau et de la Biodiversité

DGALN : Direction Générale de l’Aménagement, du Logement et de la Nature

DGEC : Direction Générale de l’Énergie et du Climat

DGPR : Direction Générale de la Prévention des Risques

GIEC : Groupe d’Experts Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat

MTES : Ministère de la Transition Écologique et Solidaire

ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique

PPRL : Plans de Prévention des Risques Littoraux

RCP : *Representative Concentration Pathways*

SCEE : Service Climat et Efficacité Énergétique

SIG : Système d’Information Géographique

SRNH : Service des Risques Naturels et Hydrauliques

TDC : Trait de Côte

## Remerciements

Les auteurs remercient le comité de pilotage de l’étude, constitué de Julie Solignac (DGPR/SRNH/BRIL), Bérangère Basin (DGPR/SRNH/BRIL), Stéphane Costa (Université de Caen), Benoit Meyssignac (CNRS/LEGOS), Hélène Montelly (DGALN/DEB/ELM2), Sabine Moraud (DGALN/DEB/ELM2), Marie Banâtre (DGALN/DEB/ELM2), Yann Deniaud (Cerema), Eric Brun (DGECC/SCEE/ONERC) et Agathe Roulle (BRGM).

Pour le chapitre 3 de ce rapport, les auteurs remercient Catherine Ritz, Gael Durand (CNRS), David Salas-y-Mélia (Météo-France), Angélique Melet (Mercator Ocean) et Benoit Meyssignac (LEGOS-CNES) pour leurs contributions à travers le projet CNRS – IMPHALA financé par le programme national inter-organismes LEFE. Aimée Slangen (NIOZ), Mark Carson (Université de Hambourg) et Robert Kopp (Rutgers University) sont également remerciés pour la mise à disposition de leurs données.



# 1. Introduction

## 1.1. CADRE DU SUJET

### 1.1.1. L'élévation du niveau de la mer : conséquence du changement climatique

Depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, le changement climatique a entraîné une élévation du niveau marin global de l'ordre de 20 cm (Dangendorf *et al.*, 2017). L'analyse des observations marégraphiques et altimétriques a montré que ce processus s'était accéléré, non seulement au cours du 20<sup>ème</sup> siècle (Church et White, 2006), mais aussi au cours des deux dernières décennies (Dieng *et al.*, 2017). Néanmoins, le taux actuel d'élévation du niveau de la mer, d'environ 3 mm/an (Cazenave *et al.*, 2014), demeure d'un ordre de grandeur inférieur à ce qui a été observé après la dernière glaciation (20 000 ans BP). En revanche, il est très supérieur aux variations estimées pour les deux derniers millénaires (Lambeck *et al.*, 2010).

L'élévation du niveau de la mer s'explique, pour une large part, par les effets du réchauffement climatique d'origine anthropogénique (Church *et al.*, 2013 ; Slangen *et al.*, 2014b ; Dangendorf *et al.*, 2015). D'une part, le réchauffement des océans cause une dilatation thermique des masses d'eau ; d'autre part le réchauffement climatique cause une fonte accélérée des glaciers de montagne, tandis que la perte de masse des calottes antarctique et groenlandaise s'amorce. Par ailleurs, les variations des stocks d'eau continentales (accumulation d'eau dans des réservoirs naturels ou artificiels) jouent également un rôle (Illustration 1).

Dans un contexte d'accentuation du réchauffement climatique au 21<sup>ème</sup> siècle, l'élévation du niveau de la mer se poursuivra, vraisemblablement en s'accroissant si l'objectif de limiter le réchauffement à 2 °C au-dessus de la période pré-industrielle n'est pas atteint (Church *et al.*, 2013).

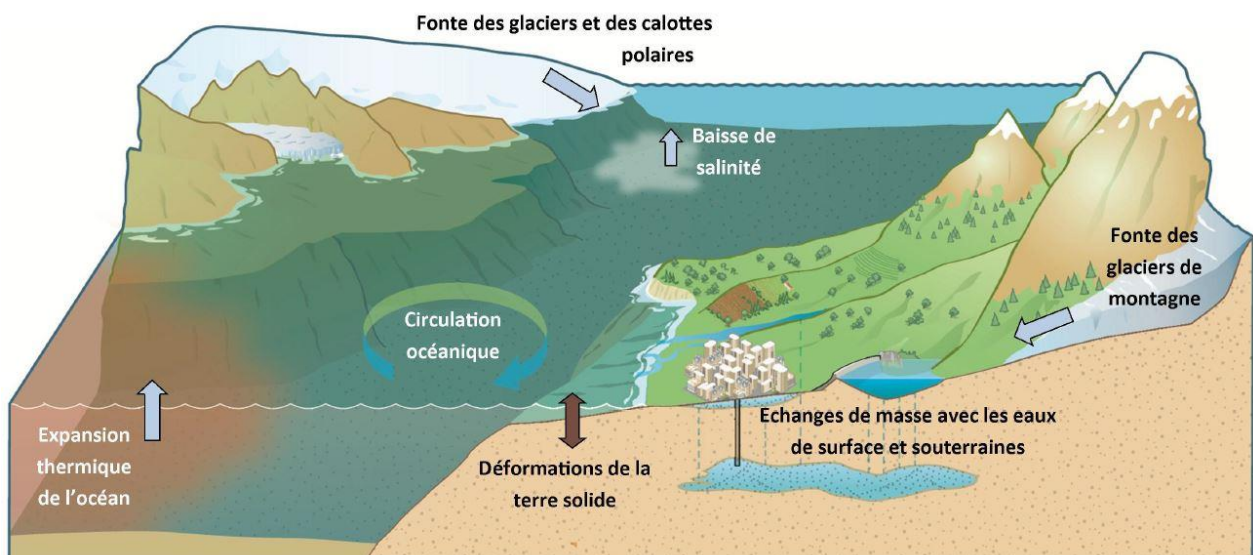


Illustration 1 : Causes des variations du niveau marin relatif (adapté d'après Cazenave et Le Cozannet, 2014).

### **1.1.2. Effets de l'élévation du niveau de la mer sur le recul du trait de côte**

### **1.1.3. Submersion permanente et érosion du littoral**

Le 5<sup>ème</sup> rapport de la mission Jouzel (Planton *et al.*, 2015) rappelle que les conséquences de l'élévation du niveau de la mer pour l'érosion côtière et le recul du trait de côte pourraient être très importantes.

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

- la submersion permanente de zones basses ;
- l'érosion du littoral, définie comme un transport de matériaux (sable, galets, vase, roches), et pouvant se traduire, ou non, par un recul ou une avancée d'un ou plusieurs marqueurs du trait de côte (ex : pied de dune, intersection de la plage et du niveau des plus hautes mers astronomiques).

Des deux processus, l'érosion du littoral est le plus complexe. Il affecte principalement les côtes sédimentaires meubles, notamment sableuses, reconnues particulièrement sensibles à l'élévation du niveau de la mer. Aujourd'hui, la plus grande partie des études modélisent ce processus en utilisant la loi de Bruun.

### **1.1.4. La loi de Bruun**

La règle d'érosion de Bruun a été publiée en 1962 (Bruun, 1962). Elle a été dénommée ainsi par des géomorphologues côtiers américains qui l'ont utilisée pour évaluer l'érosion du domaine littoral (Schwartz, 1967). Cette règle traite du budget sédimentaire à long terme et des échanges de matériaux entre le domaine côtier et le large. Elle repose sur l'hypothèse selon laquelle l'élévation du niveau de la mer se traduit par un dépôt plus au large de sédiments prélevés sur la partie haute de la plage, ce qui a pour effet l'érosion du littoral et le recul du trait de côte. À partir de cette hypothèse initiale, Bruun (1983) considère que la majorité de ces sédiments érodés peut rester au sein du domaine pré-littoral, secteur sous-marin situé dans le prolongement de la plage (domaine littoral) et dont la morphologie est directement influencée par l'action des vagues sur le fond. Il admet aussi que les sédiments érodés peuvent également être transportés plus au large.

L'illustration 2a présente le cas d'un bassin sédimentaire fermé (cas des Grands Lacs américains) qui voit ses rivages érodés avec la montée du niveau d'eau. Le bilan sédimentaire est équilibré par l'accrétion du fond du bassin. L'illustration 2b correspond au profil morphologique d'une plage et d'un large plateau continental où les sédiments érodés dans le secteur littoral sont déposés sur le domaine pré-littoral influencé par les vagues, mais aussi plus au large, sur le plateau continental. Ce second cas pourrait s'apparenter aux golfes de Gascogne ou du Lion pour les façades métropolitaines.

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 l'illustration 3 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 l'illustration 3.



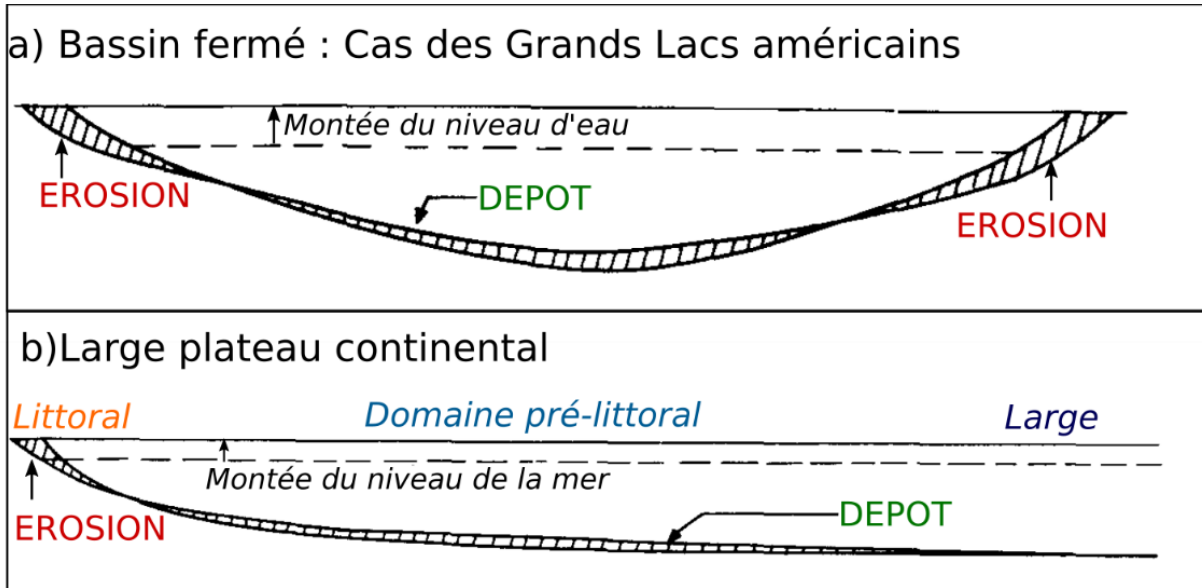


Illustration 2 : Règle d'érosion de Bruun dans des bassins sédimentaires. a) Cas d'un bassin fermé  
b) Cas d'un large plateau continental marin. Modifié d'après Bruun (1983).

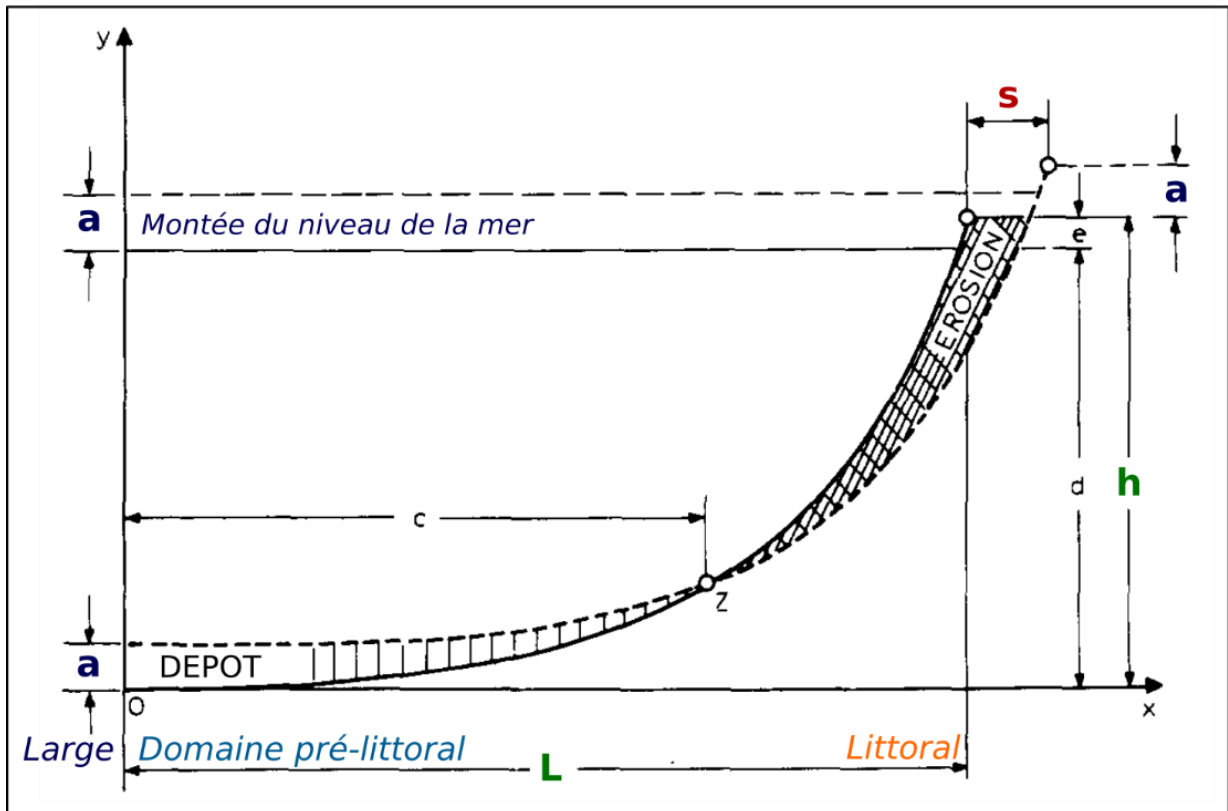


Illustration 3 : Règle d'érosion de Bruun. Hypothèse d'évolution du profil de plage et principaux paramètres descriptifs : a, montée du niveau de la mer ; L, longueur du profil de plage soumis à l'influence de vagues ; h, hauteur entre le trait de côte et le bas du domaine pré-littoral. D'après Bruun (1983).

En étudiant ces hypothèses sur un profil de plage théorique, Bruun (1983) montre qu'il n'est pas 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 » (généralement supposée de l'ordre du kilomètre) est très inférieur à 1 ( $s/L \ll 1$ ), ce qui est généralement le cas.

Ainsi :

$$s \cdot h = a \cdot L$$

Soit:

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

Avec  $\tan(\alpha)$  la « pente de plage », au sens de l'illustration 3 et  $a$  l'élévation du niveau de la mer.

C'est cette extrême simplification de la règle d'érosion de Bruun qui la rend si populaire pour les études de l'évolution du trait de côte sous l'effet de la montée du niveau marin : la loi de Bruun est particulièrement aisée à mettre en œuvre et paraît presque universelle. Mais c'est également cette trop grande simplification des processus guidant le fonctionnement du domaine littoral qui donne corps aux critiques les plus vives (Pilkey et Cooper, 2004 ; Ranasinghe et Stive, 2009).

Ainsi, pour estimer le recul du trait de côte, la pratique actuelle la plus courante consiste à sommer les effets de l'élévation du niveau de la mer (supposés être de l'ordre de la loi de Bruun) avec les effets d'autres processus à l'origine de la mobilité du trait de côte (apports ou perte de sédiments sous les effets des vagues, des courants et de la marée). Ces autres effets sont souvent estimés en évaluant les tendances passées de l'évolution du trait de côte.

#### 1.1.5. Évaluation des tendances passées de l'évolution du trait de côte

##### ***a) Non-linéarités temporelles de l'évolution du trait de côte***

Les côtes sableuses se caractérisent par une mobilité permanente, alternant souvent des phases d'avancée et de recul. L'évolution de la côte n'est donc généralement pas parfaitement linéaire :

- des variations cycliques peuvent être mises en évidence dans l'évolution du trait de côte, à différentes échelles de temps : saisonnières à interannuelles (Illustration 4), pluri-annuelles, multi décennales... Ces oscillations résultent principalement de dynamiques naturelles (conditions météo-océaniques, stocks sédimentaires, phénomènes climatiques, ...), et nécessitent des séries temporelles de données relativement longues pour pouvoir être caractérisées ;
- des évolutions ponctuelles sont fréquemment enregistrées et correspondent aux impacts épisodiques ou successifs d'évènements extrêmes. Non négligeables, ces épisodes érosifs peuvent affecter le calcul des tendances ;
- une modification des tendances peut être liée à des activités anthropiques. Il peut s'agir des conséquences de prélèvements, d'extraction ou de rechargement en sédiment, de la construction d'un ouvrage modifiant la dynamique hydro-sédimentaire locale (épi, brise-lame, ...), de la perméabilisation et/ou fixation du trait de côte, des impacts de la fréquentation et du piétinement, etc.

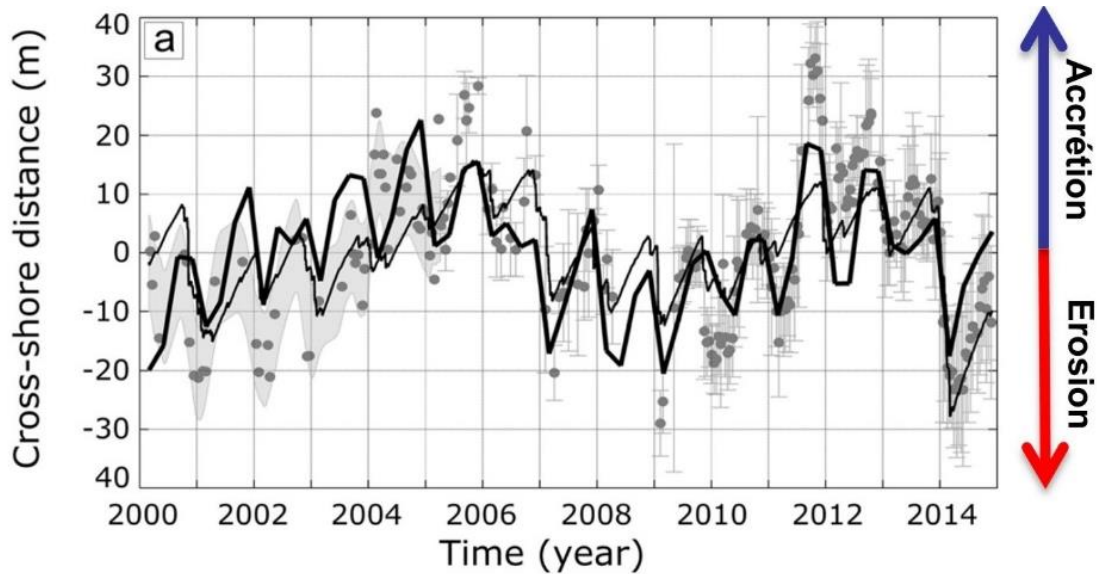
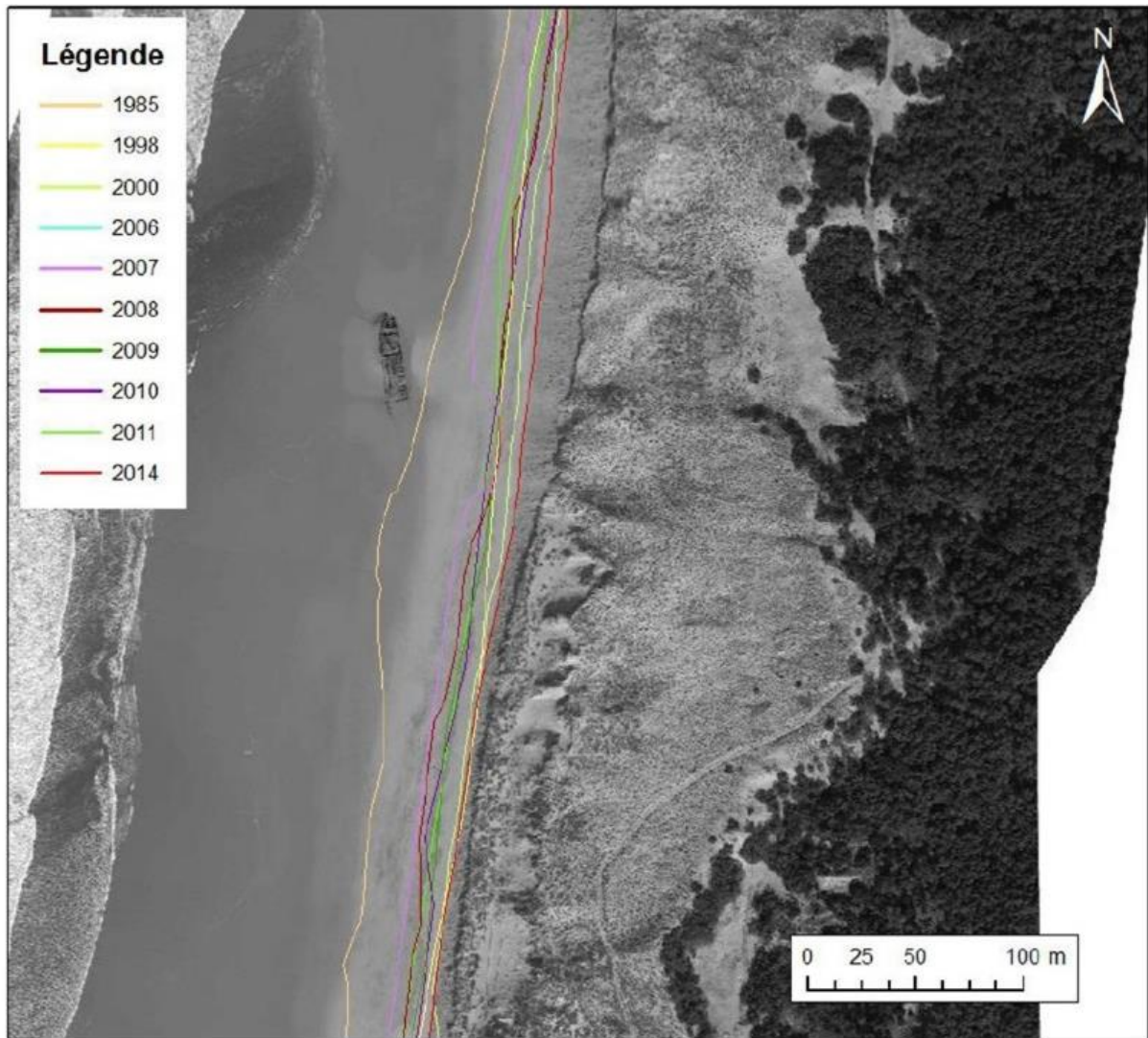


Illustration 4 : Exemple de variabilité saisonnière et interannuelle sur la côte aquitaine (D'après Robinet *et al.*, 2016). Les points en gris indiquent les positions observées du trait de côte.

Quelle que soit la méthode employée pour déterminer la position du trait de côte (suivi DGPS, détermination à partir de séries de photographies aériennes, d'acquisition Lidar, etc.), il existe fréquemment une grande irrégularité des pas de temps entre les différents suivis disponibles. Si les techniques récentes de levé permettent aujourd'hui une fréquence accrue de suivi de la cinématique du trait de côte, les données plus anciennes se révèlent bien souvent plus espacées dans le temps (plusieurs années voire décennies) (Illustration 5 ; Illustration 6 A).

L'hétérogénéité des périodes de référence est un autre enjeu majeur, car les périodes d'observation varient de manière importante selon les façades maritimes, et ce jusqu'à l'échelle locale. Suivant le type d'observatoire (typologie selon Bulteau et Garcin, 2011 ; voir également Suanez *et al.*, 2012), la fréquence mais surtout la pérennité de suivi de la cinématique du trait de côte n'est pas nécessairement la même<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Selon les cas, des logiques d'acquisition différentes peuvent prévaloir : acquisitions ponctuelles, destinées à une gestion à court terme du littoral ; activités de suivi menées dans le cadre d'un projet spécifique (demande sociétale ou projet de recherche), sans périodicité ni pérennité de l'acquisition ; campagnes de mesure périodiques et s'inscrivant dans des projets pérennes.



*Illustration 5 : Représentation de positions du trait de côte sur un site d'étude en Aquitaine entre 1985 et 2014 (Source : Bernon et al., 2016).*

### **b) Hétérogénéités spatiales de l'évolution du trait de côte**

À ces non-linéarités temporelles de l'évolution du trait de côte s'ajoutent des hétérogénéités spatiales. Ces hétérogénéités spatiales se visualisent sous la forme de fortes oscillations dans les taux d'évolution bruts, c'est-à-dire calculés le long du littoral à partir de traits de côte non filtrés (exemple Illustration 6 B). Elles résultent principalement de dynamiques locales, de l'impact d'aménagements ou ouvrages de défense contre la mer, ou des effets de transports sédimentaires longitudinaux. Cette forte variabilité spatiale rend d'autant plus complexe la détermination de secteurs homogènes d'évolution du trait de côte.



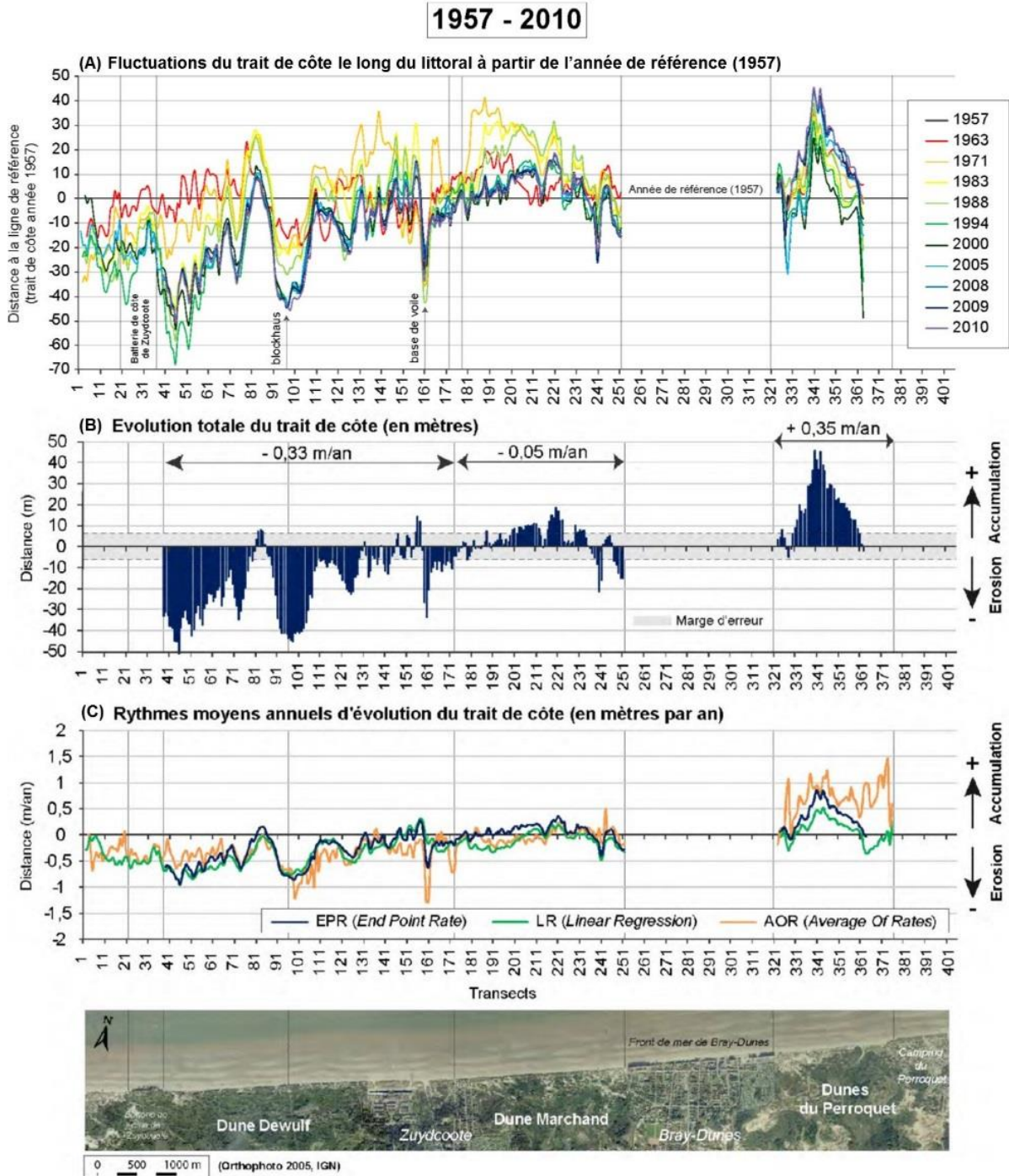


Illustration 6 : Exemple de suivi de l'évolution du trait de côte entre 1957 et 2010 (de l'échelle pluriannuelle à pluridécennale) dans les Hauts-de-France.

- (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).

## **1.2. LE REcul DU TRAIT DE COTE DANS LES POLITIQUES PUBLIQUES**

### **1.2.1. Prise en compte du recul du trait de côte et de l'élévation du niveau de la mer dans les politiques publiques**

Plusieurs actions, pilotées ou accompagnées par le MTES, concernent le phénomène de recul du trait de côte et visent à prendre en considération le contexte de changement climatique :

- la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (SNGITC), notamment au travers du soutien au développement d'un réseau national des observatoires du trait de côte (RNOTC) et le calcul d'un indicateur national d'érosion ;
- la réalisation des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) ;
- les travaux parlementaires, menés depuis 2016, sur l'adaptation des territoires littoraux au phénomène de recul du trait de côte ;
- La mise en place de la 2<sup>e</sup> phase du plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC).

Pour une mise en œuvre cohérente de ces actions, des projections d'élévation du niveau de la mer et d'évolution du trait de côte sont nécessaires. Aujourd'hui, seuls les PPRL sont accompagnés d'un guide méthodologique décrivant une méthode pour estimer des projections d'évolution du trait de côte.

### **1.2.2. L'aléa recul du trait de côte dans les PPRL**

Aujourd'hui, les opérateurs susceptibles d'appuyer les pouvoirs publics pour l'adaptation au changement climatique en zones côtières peuvent se référer au cadre méthodologique des plans de prévention des risques littoraux (PPRL, DGPR, 2014), qui peuvent inclure l'aléa « recul du trait de côte ».

Deux composantes permettent de cartographier les zones soumises au recul du trait de côte :

- l'une est déterminée sur la base de l'évolution historique tendancielle du trait de côte (taux moyen de recul annuel  $T_x$  exprimé en m/an) ;
- l'autre est déterminée par le recul maximal  $L_{max}$  résultant d'un phénomène extrême (reculs dunaires pendant une tempête ou à la suite d'une succession de tempêtes, recul de falaises).

La cartographie de la zone soumise à l'aléa recul du trait de côte est obtenue par projection du trait de côte à échéance 100 ans ( $100 \times T_x$ ) + recul  $L_{max}$ . A noter que cette approche peut induire une difficulté, car l'échéance de 100 ans peut porter au-delà de 2100 si l'on choisit une référence de position du trait de côte ultérieure à 2000. Or, les scénarios d'élévation du niveau marin utilisables dans le cadre des PPRL n'existent que pour 2100.

Les effets du changement climatique en termes d'élévation du niveau de la mer sont désormais pris en compte systématiquement dans les PPRL, lorsqu'il s'agit de caractériser l'aléa submersion marine. Cette prise en compte est facultative lorsqu'il s'agit de caractériser le recul du trait de côte compte tenu des lacunes scientifiques dans le domaine des relations entre niveau de la mer et évolution du trait de côte.

Ainsi, le cadre méthodologique actuel ne permet pas de prendre en compte de manière suffisamment complète les besoins d'évaluation des impacts de l'élévation du niveau de la mer sur le trait de côte. Cependant, dans ce domaine, de nombreux travaux de recherche ont

été publiés depuis l'élaboration du guide méthodologique PPRL (2011-2014). Il reste à faire la démonstration que ces travaux peuvent être transférés vers les applications opérationnelles.

### 1.3. OBJECTIFS ET CONTENU DU RAPPORT

Ce rapport vise à présenter des travaux de recherche, sur l'évolution du trait de côte sableux dans le contexte de l'élévation du niveau de la mer, qui peuvent être transférés vers la sphère des applications opérationnelles.

Ses objectifs détaillés sont les suivants :

- procéder à une revue bibliographique des pratiques actuelles dans les dossiers de détermination de l'aléa «recul du trait de côte » ;
- examiner quelles projections et données d'élévation du niveau de la mer sont disponibles et mobilisables actuellement, et proposer des scénarios d'élévation du niveau de la mer cohérents à l'échelle nationale (métropole et collectivité d'outre-mer), prenant en compte l'état des connaissances sur la variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer, sa dynamique temporelle, les mouvements verticaux du sol, et les incertitudes associées ;
- examiner quelles recherches récentes sur les interactions entre niveau de la mer et évolution des côtes sableuses sont mobilisables pour la caractérisation du recul du trait de côte dans les politiques publiques. Il s'agit en particulier d'examiner comment sont traités les cas dans lesquels le trait de côte évolue de manière non-linéaire dans le temps, ou hétérogène dans l'espace, par exemple sous l'effet de transports sédimentaires longitudinaux. Ce chapitre examine brièvement la question de la transposition vers d'autres milieux côtiers (ex : corallien) ;
- proposer une méthode à visée opérationnelle pour l'évaluation des taux d'évolution du trait de côte passés et futurs intégrant l'élévation du niveau de la mer.

Ce rapport comprend 5 chapitres :

- le présent chapitre 1 introduit le sujet en présentant les difficultés spécifiques à l'estimation des effets de l'élévation du niveau de la mer due au changement climatique sur l'évaluation des taux d'évolutions des plages sableuses, tel que prévu dans les PPRL ;
- le chapitre 2 examine les pratiques actuelles dans les dossiers de détermination de l'aléa « recul du trait de côte » ;
- le chapitre 3 traite de l'élévation du niveau de la mer ;
- le chapitre 4 traite des nouvelles méthodes mobilisables pour l'évaluation du recul du trait de côte ;
- le chapitre 5 propose une méthode complétée pour améliorer la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer dans la caractérisation de l'aléa « recul du trait de côte ».

Chacun des chapitres 2 à 4 est accompagné d'une revue bibliographique.

Ce rapport ne traite pas de la prise en compte d'autres effets du changement climatique dans les projections du trait de côte. De fait, le changement climatique affectera peut-être certains facteurs hydrométéorologiques contribuant à l'évolution du trait de côte, notamment les vagues (Charles *et al.*, 2013 ; Hemer *et al.*, 2013). Cependant, la littérature scientifique suggère que ces effets seront très inférieurs à ceux de l'élévation du niveau de la mer, au moins pour les côtes européennes (Wong *et al.*, 2013).





## 2. Pratiques actuelles dans le cadre des PPRL

Ce chapitre examine les pratiques actuellement mises en œuvre pour évaluer l'effet de l'élévation du niveau de la mer sur l'érosion côtière et le recul du trait de côte dans le cadre des PPRL.

### 2.1. ÉLÉVATION DU NIVEAU DE LA MER

#### 2.1.1. Scénarios pris en compte dans le calcul de l'aléa submersion marine des PPRL

L'élévation du niveau de la mer est prise en compte dans le cadre de la caractérisation de l'aléa « submersion marine » des PPRL, selon des modalités précisées dans la circulaire du 27 juillet 2011 et le guide méthodologique des plans de prévention des risques littoraux (Illustration 7). Deux scénarios sont considérés :

- une élévation du niveau de la mer de 20 cm, qui doit être intégrée à la définition de l'aléa de référence (court terme) ;
- une élévation du niveau de la mer de 60 cm, qui doit être intégrée à la définition de l'aléa à l'horizon 2100 (moyen / long terme).

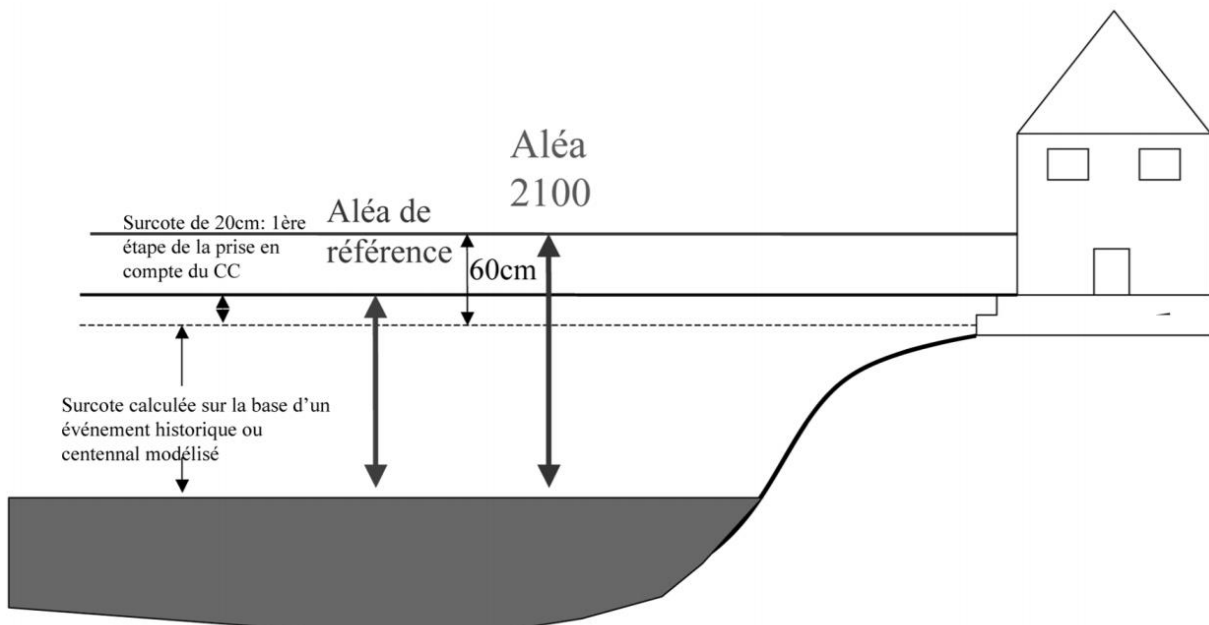


Illustration 7 : Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer dans le cadre de l'évaluation de l'aléa « submersion marines » des plans de prévention des risques littoraux (Source : circulaire du 27 juillet 2011).

#### 2.1.2. Comparaison des scénarios pris en compte dans le calcul de l'aléa submersion marine des PPRL aux projections globales du GIEC

Les scénarios d'élévation du niveau de la mer des PPRL ont été définis avant la parution du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC et du rapport sur le niveau de la mer (Church *et al.*, 2013).

L'illustration 8 compare :

- les reconstructions de niveau marin global basées sur les observations marégraphiques et altimétriques de Church *et al.* (2011), qui étaient la référence en 2013<sup>2</sup> ;
- les scénarios d'élévation du niveau de la mer des PPRL ;
- les projections de niveau de la mer présentées dans le 5<sup>ème</sup> rapport (AR5) du GIEC de 2013 (Church *et al.*, 2013).

Les projections du GIEC sont conditionnées à deux scénarios de changement climatique :

- le RCP 2.6 (projections bleues), dans lequel l'objectif de réchauffement global de 2 °C par rapport à la période préindustrielle serait vraisemblablement atteint ;
- le RCP 8.5 (projections rouges), qui correspond à une poursuite des émissions de gaz à effets de serre.

Les projections de niveau de la mer du GIEC présentent d'une part la médiane des projections (courbe continue rouge ou bleue de l'illustration 8), d'autre part l'intervalle de confiance « vraisemblable » (aires rouges et bleues, légèrement transparentes). Dans la terminologie du GIEC, « vraisemblable » signifie qu'il existe au minimum 2 chances sur 3 de se situer dans cet intervalle de confiance. Le tiers de chances restant correspond à une fonte rapide de la calotte antarctique. Ce phénomène de fonte étant aujourd'hui imparfaitement compris, un indice de confiance « moyen » est associé à ces projections (Church *et al.*, 2013). Ainsi, les projections du GIEC n'excluent donc pas une élévation du niveau de la mer plus rapide que celles présentées dans l'illustration 8.

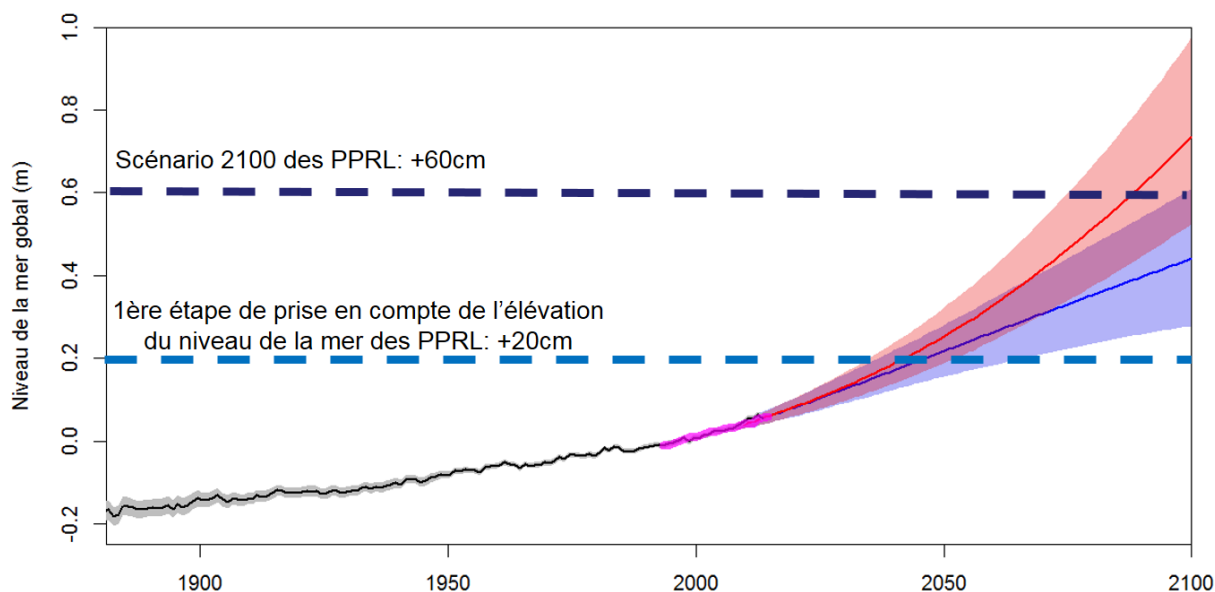


Illustration 8 : Comparaison des scénarios de niveau de la mer des PPRL (à court terme +20cm et +60cm en 2100) aux observations et aux projections de l'élévation du niveau de la mer présentées dans le 6<sup>ème</sup> rapport du GIEC (Données : Church et White, 2011 ; Church *et al.*, 2013).

<sup>2</sup> Des travaux réalisés depuis suggèrent que l'élévation du niveau de la mer a été en réalité moins rapide au début du 20<sup>ème</sup> siècle et s'est davantage accélérée ultérieurement (exemple : Dangendorf *et al.*, 2017 ; Dieng *et al.*, 2017).

La période de référence des scénarios d'élévation du niveau de la mer de +20 cm et +60 cm des PPRL correspond à "la fin du 20<sup>e</sup> siècle"<sup>3</sup>. Sous l'hypothèse qu'elle se rapporte à une moyenne de niveau marin sur la période 1986-2005, il est possible de constater que, selon le 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC :

- le scénario de +20 cm correspond à un niveau marin qui sera vraisemblablement dépassé, en moyenne globale, entre 2030 et 2060 approximativement ;
- dans le cas d'un scénario de poursuite d'émissions de gaz à effets de serre (RCP 8.5), la valeur de 60 cm d'élévation du niveau marin global a une chance sur deux d'être dépassée dès 2080 ;
- le scénario de +60 cm correspond à la borne supérieure de l'intervalle de confiance « vraisemblable » du scénario RCP 2.6, en moyenne globale et en 2100.

En d'autres termes, dans un scénario de changement climatique RCP 2.6, il existe au moins 2 chances sur 3 que le niveau de la mer global se situe en dessous du scénario d'élévation du niveau de la mer à horizon 2100 retenu pour l'aléa submersion marine des PPRL, selon le 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC.

## 2.2. ÉVOLUTION DU TRAIT DE COTE

### 2.2.1. Approche générale

Suite à la tempête Xynthia des 27-28 février 2010 et à la circulaire du 2 août 2011, un grand nombre de Plans de Prévention des Risques Littoraux a été mis en œuvre au cours des cinq dernières années. La réalisation de ces PPRL « nouvelle génération » a été cadrée par la circulaire du 27 juillet 2011 qui traite de la submersion marine et spécifie des éléments pour la prise en compte du changement climatique pour cet aléa. À la suite de cette circulaire, les premiers éléments méthodologiques complémentaires pour l'analyse et la cartographie des aléas littoraux (incluant le recul du trait de côte) ont été proposés par la DGPR dans un rapport daté de novembre 2011, puis mis à disposition des services concernés par la mise à jour des PPRL. En mai 2014, le guide méthodologique « Plan de Prévention des Risques Littoraux » est édité par la DGPR.

Pour l'estimation de la zone d'aléa de recul du trait de côte, la principale évolution est issue du retour d'expérience de la tempête Xynthia et ajoute la prise en compte du recul provoqué par un événement tempétueux majeur<sup>4</sup>.

Ainsi, la largeur de la zone d'aléa « recul du trait de côte »  $L_r$  s'écrit :

$$L_r = 100.T_x + L_{max} \quad (1)$$

Avec  $T_x$ , le taux de recul moyen annuel et  $L_{max}$ , la valeur du recul du trait de côte consécutif à un événement tempétueux majeur pour le cas des côtes basses meubles. La prise en compte de ce dernier paramètre  $L_{max}$  dans l'estimation de la zone d'aléa a donné lieu à plusieurs rapports récents (Desmazes *et al.*, 2014a, 2014b, 2015, 2016).

<sup>3</sup> La circulaire du 21/07/2011 fait référence à la « fin du 20<sup>ème</sup> siècle » mais sans préciser la période exacte.

<sup>4</sup> Le guide méthodologique de 1997 intègre un  $L_{max}$  dans les côtes à falaises, mais ne demande pas d'intégrer les « reculs ponctuels possibles consécutifs à un événement exceptionnel » pour les côtes basses meubles (Garry *et al.*, 1997).

De plus, lorsque c'est possible, le guide PPRL recommande d'intégrer l'impact du changement climatique dans l'aléa de référence (en citant notamment la loi de Bruun). Mais cette détermination reste facultative.

La méthode générale permettant de réaliser des projections de l'évolution du trait de côte dans le cadre des PPRL a été adaptée au contexte local par les différentes études. À titre d'exemple, l'illustration 9 présente la méthode appliquée dans le cadre de l'étude du PPRL de Mimizan (Bernon *et al.*, 2016, cf. section 2.3.6). Cette méthode reprend et détaille la réalisation des différentes étapes de l'évaluation de l'aléa « recul du trait de côte ». Elle comprend une phase d'acquisition d'un socle de connaissances, qui permet d'évaluer les bilans sédimentaires, les effets des interventions humaines, et de réunir les données nécessaires à la quantification des différents modes d'évolutions du trait de côte (y-compris Tx et Lmax). Les étapes suivantes visent à estimer le Tx, le Lmax, l'effet du changement climatique et les incertitudes associées.

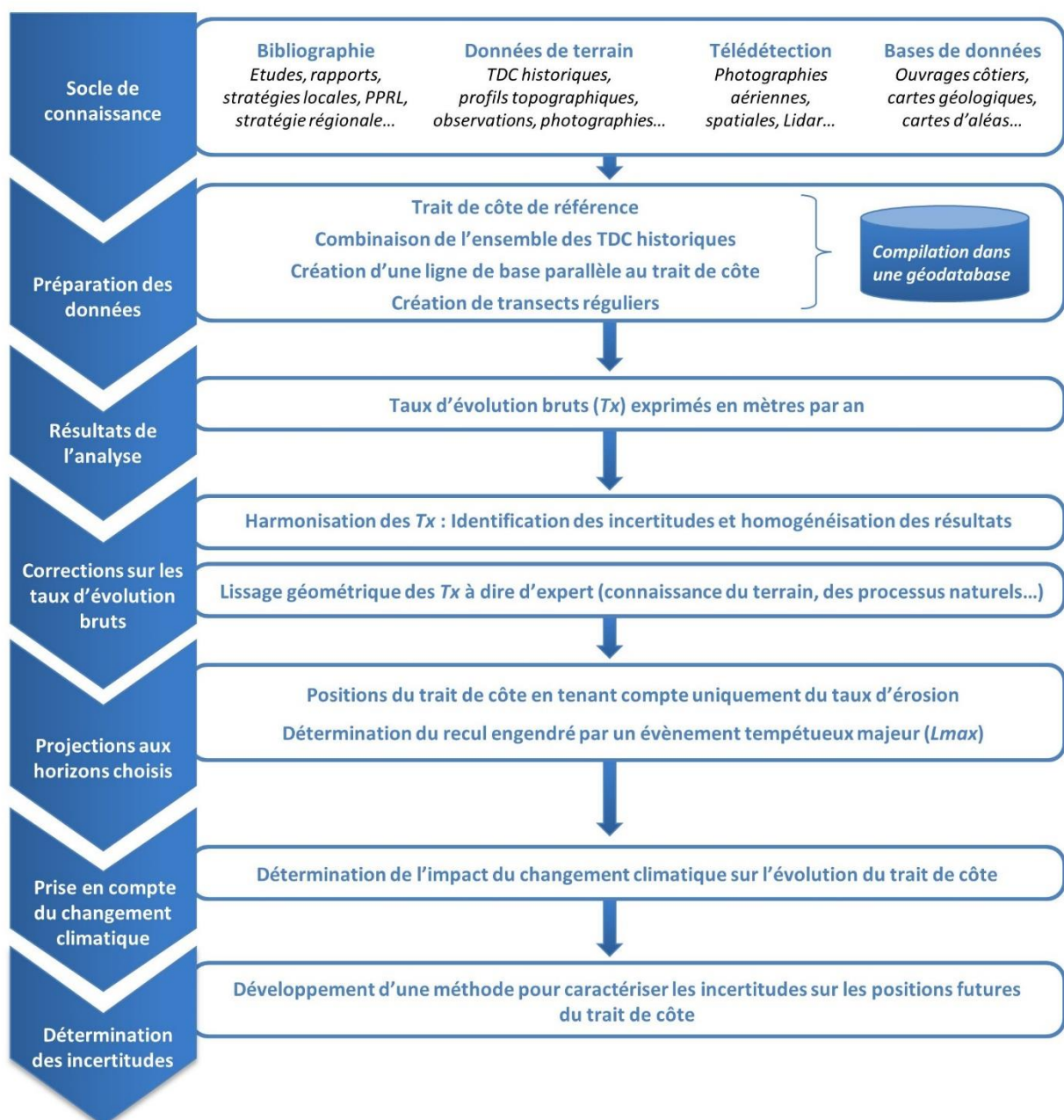


Illustration 9 : Méthode adaptée de l'approche générale des PPRL lors de la mise à jour du PPRL de Mimizan (d'après Bernon *et al.*, 2016).

## 2.2.2. Détermination du Tx

### a) Principe

Dans le cadre des PPRL, les taux d'évolution du littoral à long terme (Tx) sont déterminés à partir de l'analyse des tendances passées. Celle-ci nécessite une analyse statistique de traits de côte identifiables et comparables, c'est-à-dire présentant des indicateurs du trait de côte identiques ou assimilables (Boak et Turner, 2004 ; Mallet *et al.*, 2012). En amont de cette détermination du Tx, il est donc nécessaire de disposer d'un ensemble d'informations contextuelles : évolution du trait de côte sur la zone considérée, sur une période d'observation la plus étendue possible, à partir de tous les suivis de la position du trait de côte existants et valides (digitalisation à partir de photographies aériennes, cadastres, archives, cartes anciennes, mesures topographiques, DGPS, Lidar, etc.), bilans sédimentaires, effets des interventions humaines, apports de sédiments d'origine bio-détritique ou fluviale, etc. Dans le cadre des PPRL, ces informations sont constituées lors de la phase d'étude du fonctionnement du littoral.

Le rapport méthodologique PPRL (DGPR, 2014) indique que « *la détermination d'un taux moyen annuel de recul repose sur l'hypothèse que le recul du trait de côte est linéaire dans le temps* ». Plus précisément, le guide méthodologique formule les préconisations suivantes :

- tester différentes lois statistiques permettant de calculer des tendances linéaires, en comparer les résultats obtenus et les interpréter par une analyse experte ;
- fournir des intervalles de confiance pour valider l'approche suivie, compte tenu de l'étendue temporelle des données disponibles et de leur hétérogénéité ;
- tester une loi polynomiale pour identifier les changements et/ou inversions de tendance et, au besoin, appliquer cette loi sur chacune des périodes d'observations existantes entre les données.

Ainsi, concernant les non-linéarités temporelles, le guide méthodologique PPRL (DGPR, 2014) laisse la possibilité d'utiliser des lois statistiques non linéaires afin de prendre en compte les non linéarités temporelles de l'évolution du trait de côte. De plus, « *si les tendances passées ne sont pas représentatives des tendances à venir [...],* » le guide PPRL laisse la possibilité de proposer une modulation du taux d'évolution passée (Tx).

### b) Méthodes statistiques utilisées pour calculer les taux d'évolution

En 2014, le guide méthodologique d'élaboration des PPRL proposait une synthèse des méthodes statistiques les plus couramment rencontrées dans la littérature scientifique pour déterminer des taux moyens annuels d'évolution du trait de côte. Basée sur les travaux de Genz *et al.* (2007), cette synthèse permet d'identifier les avantages et limites de chacune des méthodes citées, précisant également si la méthode repose sur une hypothèse de tendance linéaire, si elle permet la détermination de l'intervalle de confiance associé, si elle est sensible aux points extrêmes et si elle intègre les incertitudes liées aux données de base. En pratique, les points extrêmes au regard de la tendance majeure d'évolution (horsains) donnent des indications sur les évolutions à court terme, pouvant être utiles dans le cadre de la détermination du recul ponctuel associé à une tempête (Lmax).

De nombreuses lois statistiques sont aujourd'hui référencées (e.g. Dolan *et al.*, 1991 ; Thielier *et al.*, 2009 ; MEDDE, 2014 ; Bernon *et al.*, 2016) et plusieurs d'entre elles sont mises en œuvre dans les dossiers PPRL pour déterminer l'évolution historique du littoral (Illustration 10).

NOM

EPR	Taux des points extrêmes ( <i>End Point Rate</i> )
AOR	Moyenne des taux ( <i>Average of Rates</i> )
JK	Méthode du Jackknife ( <i>Jackknifing</i> )
OLS	Régression linéaire simple aux moindres carrés ( <i>Ordinary Least Squares</i> )
LRR	Régression linéaire aux moindres carrés ( <i>Linear Regression Rate of Change</i> )
WLR	Régression linéaire pondérée ( <i>Weighted Linear Regression</i> )
WLS	Régression aux moindres carrés pondérée ( <i>Weighted Least Squares</i> )
RLS	Régression linéaire aux moindres carrés repondérée ( <i>Reweighted Least Square</i> )
LMS	Régression linéaire à partir de la médiane des carrés résiduels / Moindres carrés médians ( <i>Least Median of Squares</i> )

*Illustration 10 : Exemples de méthodes appliquées dans le cadre des PPRL.*

Au besoin, d'autres paramètres sont fréquemment mobilisés dans le cadre de l'analyse des tendances évolutives du trait de côte. Il s'agit de l'enveloppe totale d'évolution du trait de côte, considérant toutes les positions disponibles sans critère temporel (SCE - *Shoreline Change Envelope*), de la distance entre le plus ancien et le plus récent trait de côte (NSM - *Net Shoreline Movement*), d'une ligne de base (définie arbitrairement ou bien à partir du squelette des enveloppes des différents traits de côte disponibles) ou d'un trait de côte de référence.

### **c) Ressources utilisées pour la spatialisation**

Plusieurs outils permettent d'automatiser le calcul des taux d'évolution du trait de côte et des intervalles de confiance associés, par la mise en œuvre de certaines de ces lois de manière simplifiée. Il s'agit notamment des outils :

- DSAS - *Digital Shoreline Analysis System*, une extension du logiciel SIG ArcMap (®ESRI) (Thieler *et al.*, 2009) ;
- MobiTC - Mobilité du Trait de Côte, développé en Matlab mais permettant des exports sous SIG (CEREMA/DT-Méditerranée) (Pons et Trmal, 2012) ;
- *Ambur R package - Analyzing Moving Boundaries using R*, un package destiné au logiciel R (Jackson, 2010 : Jackson *et al.*, 2012).

Ces outils ont en commun d'analyser les tendances passées du littoral par calcul statistique des taux d'évolution à partir de différents traits de côte. Leur analyse automatique vise aussi à définir des secteurs d'évolution type, et à en calculer les valeurs moyennes ou médianes. Lors de leur mise en œuvre, ces trois approches requièrent l'expertise d'un géomorphologue côtier afin de :

- définir manuellement une ligne de base en mer ou à terre, perpendiculairement à laquelle seront tracés les transects permettant d'évaluer les évolutions du trait de côte ;
- déterminer la longueur, le nombre et la répartition des transects adapté.e.s au littoral concerné ;
- effectuer une correction *in fine* sur certains secteurs nécessitant une étude plus approfondie des dynamiques et tendances évolutives du milieu (Aubié *et al.*, 2011).

Cette analyse permet de déterminer, pour chaque transect, un taux moyen annuel de recul du trait de côte (Tx) exprimé en mètre par an.

## **2.2.3. Prise en compte des effets de l'élévation du niveau de la mer**

### **a) Méthodes proposées dans le rapport DGPR (2011)**

Le rapport DGPR (2011) recommande la prise en compte du changement climatique dans les éléments d'évaluation de l'aléa de recul du trait de côte. Il mentionne explicitement le phénomène d'inondation permanente de zones basses : « *le recul a également pour*

*conséquence l'envahissement durable des zones basses par la mer ou l'eau des lagunes et étangs côtiers par subsidence ou montée du niveau moyen de la mer* ». Cette recommandation porte tout particulièrement sur les zones à forts enjeux ou très sensibles aux phénomènes d'érosion.

En premier lieu, le rapport DGPR (2011) questionne la pertinence de la Loi de Bruun pour estimer un recul à 100 ans. En particulier, le guide méthodologique DGPR (2014) constate que la loi de Bruun est mise en défaut dans de nombreux secteurs actuellement affectés par un recul ou une accrétion rapide. Bien que cet argument soit déjà mentionné dans la littérature scientifique (List *et al.*, 1997 ; Cooper et Pilkey, 2004), il n'invalide pas de manière définitive la loi de Bruun lorsque ses effets sont sommés à ceux des autres processus (Cowell *et al.*, 2003; Rosati *et al.*, 2013 ; Dean et Houston, 2016).

Dans un second temps, le rapport propose une approche strictement linéaire pour le cas particulier dans lequel la récente montée du niveau marin serait la seule cause identifiée pour l'érosion récente ou à venir. Il s'agit d'établir une « règle de trois » entre le taux de recul observé dans le passé, la hausse du niveau marin sur la période d'observation et l'élévation attendue pour le prochain siècle. Un exemple est fourni : pour une hausse observée de 20 cm au siècle dernier et une élévation attendue de 60 cm, un ratio de 3 est appliqué au taux de recul obtenu :

- méthode n°1 : pour les côtes meubles où un recul régulier lié essentiellement à la montée du niveau de la mer a pu être établi, le paramètre Tx est multiplié par le ratio établi ;
- méthode n°2 : pour les côtes meubles sujettes à l'érosion en raison de la montée du niveau de la mer, mais dont le taux de recul régulier n'a pas pu être établi, c'est le paramètre qualifiant l'effet des tempêtes (Lmax) qui est multiplié par le ratio établi ;
- méthode n°3 : distincte des 2 précédentes, elle considère un recul du trait de côte sans remobilisation des sédiments (donc sans érosion) par la submersion progressive et définitive de zones basses. La délimitation est alors faite sur une base altimétrique.

### **b) Guide méthodologique PPRL actuel (DGPR, 2014)**

Le guide méthodologique (DGPR, 2014) décrit la doctrine actuelle pour l'évaluation des aléas littoraux. Cette doctrine actuelle présente des différences importantes avec l'approche proposée dans le rapport DGPR (2011). Tout d'abord, le guide mentionne qu'il n'existe pas, à ce jour, de méthode unique adaptée pour déterminer un recul du trait de côte induit par le changement climatique. Ainsi, il indique que « *la détermination de l'impact du changement climatique sur le recul du trait de côte n'a donc pas un caractère obligatoire* ». Toutefois, il est bien précisé que si des évolutions prévisibles d'une ou plusieurs composantes de l'aléa de référence sont identifiées, il convient d'en tenir compte lors de la cartographie, s'il est possible d'en quantifier les effets.

Au moment de l'édition du guide, il était largement admis que la montée du niveau de la mer aurait des effets sur les différents systèmes littoraux (GIEC, 2007) incluant des impacts importants sur les zones les plus basses ou sur la position du trait de côte des littoraux meubles. Bien que la quantification de ces effets reste problématique, le guide méthodologique (DGPR, 2014) propose un encart spécifique qui présente des pistes de méthodes. Les méthodes de « règle de 3 » ou de recul « altimétrique » présentées dans le rapport DGPR (2011) n'y sont pas mentionnées. De même, la notion liée à la submersion durable des zones basses (méthode 3) du rapport DGPR (2011) n'y apparaît plus. La règle de Bruun (1962) est discutée sans être réfutée. Il est précisé que cette approche peut être utilisée pour fournir de premiers ordres de grandeur de recul du trait de côte sableux liés à la montée du niveau marin à l'échelle régionale.

## 2.3. ÉTUDE DE CAS

### 2.3.1. Vue d'ensemble des études accessibles

Les travaux de Desmazes *et al.* (2016) réalisés dans le cadre de la convention de partenariat DGPR-BRGM 2016 ont permis de faire un inventaire non exhaustif de différentes études devant prendre en compte l'aléa de recul du trait de côte pour l'élaboration de PPRL. 17 études ont été consultées pour ce travail. Parmi ces études, 7 prennent en compte la question du changement climatique dans les rapports qui traitent de l'estimation de l'aléa de recul du trait de côte (Illustration 11).

Il faut noter que la prise en compte du changement climatique dans les rapports étudiés ne préjuge pas de son report dans le PPRL finalisé. Aussi, ce rapport n'examine que les méthodes appliquées pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'évolution du trait de côte.

Méthode	Détail	Secteur	Étude
Guide PPRL 2014	Bruun	Landes (40)	Bernon <i>et al.</i> (2016) - Caractérisation de l'aléa recul du trait de côte sur la commune de Mimizan. Rapport final. BRGM/RP-66122-FR. 69p
DGPR 2011	3 méthodes : 3.Tx ou 3.Lmax ou inondation	Finistère (29)	EGIS-EAU (2016) PPRN-L1 Phase 2 : Caractérisation des aléas. 315 p. (Ouest-Odet)
			EGIS-EAU (2016) PPRN-L2 Phase 2 : Caractérisation des aléas. 229 p. (Est-Odet)
	2 méthodes : 3.Tx ou 3.Lmax	La Réunion (974)	Chateauminois E. <i>et al.</i> (2014) – Caractérisation et cartographie des aléas côtiers pour l'élaboration du PPRL des communes du Nord-Est de la Réunion. Rapport final. BRGM/RP-64088-FR, 69 p.
			De la Torre Y. <i>et al.</i> (2012) Caractérisation et cartographie des aléas côtiers pour l'élaboration du PPRN de la commune de Saint-Paul. Rapport final. BRGM/RP-61189-FR, 73 p
Autres	Inondation sur une pente régionale moyenne	Nord-Pas-de-Calais (59 - 62)	DHI (2013) Détermination de l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique en région Nord-Pas-de-Calais. Etape 2-3-1. 75p
	Forfait 9m	Vendée (85)	ISL (2009) PPRN Île de Noirmoutier-Baie de Bourgneuf, Etude des aléas - aléa érosion littoral, 56p.

Illustration 11 : Identification des études recensées et méthodes utilisées pour prendre en compte le changement climatique dans l'estimation de l'aléa de recul du trait de côte.

### 2.3.2. Vendée (85)

Lors de la phase d'étude des aléas du PPRL de Noirmoutier et de la Baie de Bourgneuf, les travaux ont été effectués par ISL (2009). Ces travaux ont été menés en amont du rapport DGPR (2011) et du guide PPRL (DGPR, 2014). Le document produit lors de la phase d'étude (ISL, 2009) transmis par la DGPR en 2016 mentionne la prise en compte d'un recul forfaitaire de 9 m pour intégrer les conséquences de l'élévation du niveau de la mer sur l'érosion des



côtes meubles. Le choix de cette valeur de recul lié au changement climatique n'est pas explicité dans le document consulté.

### 2.3.3. Nord-Pas-de-Calais (58-62)

Le rapport DHI (2013) est une étude régionale des aléas littoraux du Nord et du Pas-de-Calais. Dans un paragraphe méthodologique consacré aux incertitudes, DHI (2013) propose une évaluation de cette incertitude liée au niveau de la mer. En estimant une pente moyenne du haut estran de l'ordre de 1/20 à l'échelle régionale et une montée du niveau marin comprise entre 0,3 et 0,45 m à 100 ans, DHI estime un recul du trait de côte lié à la montée de la mer de l'ordre de 6 à 9 m, quelle que soit la tendance à l'érosion ou à l'accrétion de la zone littorale.

Cette approche correspond aux éléments du rapport DGPR (2011) concernant l'estimation du recul du trait de côte lié à « *la submersion permanente sous l'effet de la remontée du niveau de la mer à échéance 100 ans* ».

### 2.3.4. Finistère (29)

Les études d'aléa entreprises par Egis Eau (2016) pour les deux PPRL Ouest et Est de l'Odette prennent en compte les éléments du rapport DGPR (2011) pour estimer l'effet du changement climatique en termes de zonage de l'aléa de recul du trait de côte. Pour chaque portion homogène de côte et en fonction de ses tendances évolutives, l'une des 3 méthodes proposées par le rapport DGPR (2011) est sélectionnée et mise en œuvre pour estimer le recul du trait de côte lié à la montée du niveau de la mer. L'ensemble des choix de méthodes et des résultats obtenus sont présentés clairement dans les tableaux de synthèse des études (Illustration 12 ; Egis Eau, 2016), puis cartographiés dans un atlas (Illustration 13). Les choix de méthodes sont dépendants de la classification du type de côte. Cependant, les rapports et les tableaux consultés dans ces études ne fournissent pas d'explication pour distinguer une côte meuble pouvant subir un/des reculs ponctuels (méthode 2) d'une côte ne subissant pas d'érosion sur le long terme (méthode 3).

Recul du trait de côte à 100 ans en prenant en compte le changement climatique						
Communes	Plages	N° Profils de l'analyse passée du trait de côte	Types de littoral	Méthode considérée	Recul du trait de côte avec changement climatique	Enveloppe maximale du recul du trait de côte avec changement climatique
Loctudy	Cosquer - Sables blancs	P10 à 11	côte basse meuble	1	-185	-195
Loctudy	Cosquer - Sables blancs	P12 à 22	côte basse meuble	1	-40	-50
Loctudy	Cosquer - Sables blancs	P23 à 39	côte basse meuble	1	-130	-140
Loctudy	Cosquer - Sables blancs	P40 à 44	côte basse meuble	1	-190	-200
Lesconil	Lesconil - Port (Nord)		côte basse meuble	3	-10	-20
Lesconil	Lesconil - Port (Sud)		côte basse meuble	2	-8	-18

Illustration 12 : Extrait des tableaux dressant un bilan des évolutions du trait de côte à 100 ans pour des zones homogènes, avec prise en compte du changement climatique selon les 3 méthodes du rapport DGPR (2011). Source : Egis Eau (2016).

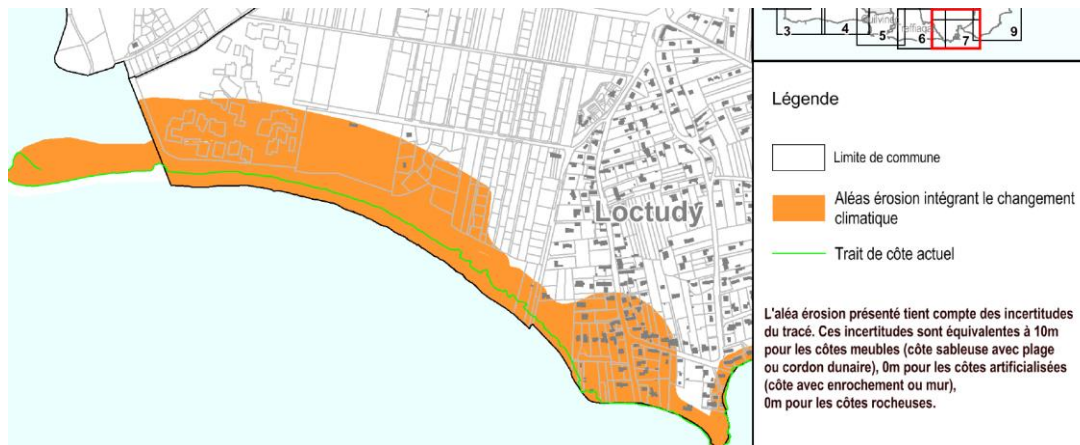


Illustration 13 : Cartographie de la zone d'aléa de recul du trait de côte intégrant le changement climatique pour la plage des Sables Blanc à Loctudy. Source : Egis Eau (2016).

### 2.3.5. La Réunion (974)

Les rapports BRGM consultés (De la Torre *et al.*, 2012 ; Chateauminois *et al.*, 2014) qui traitent de l'aléa de recul du trait de côte des PPRL de l'île de la Réunion proposent également une prise en compte du changement climatique basée sur le rapport DGPR (2011) (Illustration 14). Les méthodes 1 et 2 ont été appliquées pour l'ensemble des communes. Les éléments d'information contenus dans ces rapports ne détaillent pas la méthode choisie et la valeur de recul par secteur homogène. En revanche, le paragraphe méthodologique précise que la nature du terrain est prise en compte dans l'étape de cartographie. Si le recul du trait de côte meuble lié au changement climatique atteint une falaise ou un massif montagneux situé en amont, la zone d'aléa est alors limitée par cette frontière géomorphologique.

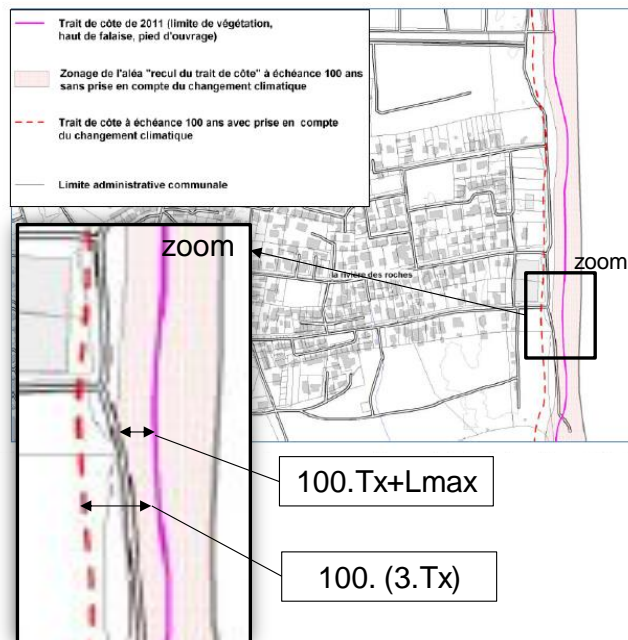


Illustration 14 : Exemple de représentation du zonage de l'aléa « recul du trait de côte » et de la prise en compte du changement climatique pour le secteur Nord-est de La Réunion (rapport BRGM/RP- 64088-FR).

### 2.3.6. Landes (40)

Dans le cadre des études réalisées pour l'élaboration du PPRL de Mimizan, le rapport de caractérisation de l'aléa recul du trait de côte sur la commune (Bernon *et al.*, 2016) mobilise la loi de Bruun pour établir un premier ordre de grandeur des reculs envisageables.

Cette formule a été appliquée pour 4 profils de la zone côtière de Mimizan (Illustration 15). La longueur du domaine littoral et pré-littoral (« L », cf. illustration 3) est estimée entre le trait de côte 2014 (identifié comme le pied de la dune) et la position des isobathes 10 et 20 m. L'altitude du trait de côte a été levée en 2014 par GPS, ce qui permet de connaître la hauteur à introduire dans la formule. Des tests ont été effectués pour une montée du niveau marin de 0,5, 1 et 2 m, pour un choix final portant sur 1 m. La valeur minimale de recul est de 32,5 m pour le profil le plus au sud débutant à 10 m de profondeur, et la valeur maximale est de 87,5 m pour les profils centraux débutant à 20 m. Les valeurs de recul ont été moyennées pour les 4 profils et les 2 profondeurs choisies afin de proposer une valeur de recul représentative de la zone. La valeur moyenne et arrondie d'impact de l'élévation du niveau de la mer est de 70 m. Le rapport précise bien qu'il s'agit d'une quantification en première approche qui est sujette à de nombreuses incertitudes.

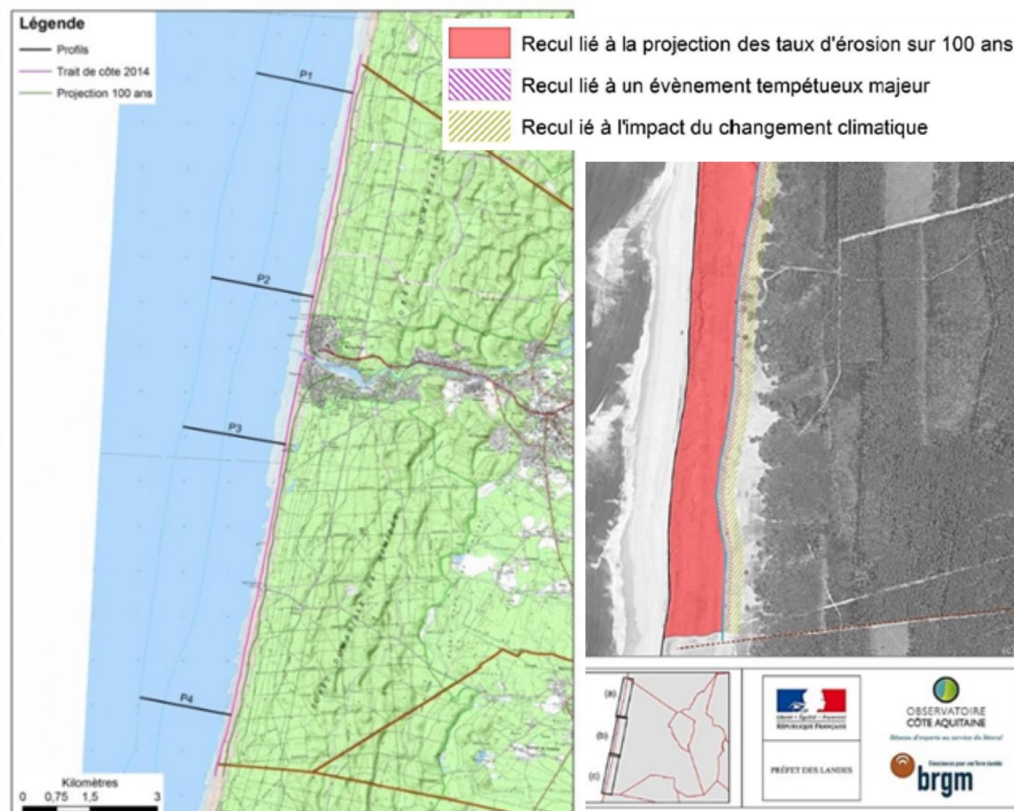


Illustration 15 : Localisation des profils utilisés pour l'application de la méthode de Bruun sur la commune de Mimizan (fond cartographique : Scan25 ©IGN) et exemple de représentation cartographique (Source : Bernon *et al.*, 2016).

Dans le cas de Mimizan, la forte hétérogénéité spatiale des Tx obtenus par les méthodes semi-automatiques a conduit les auteurs à harmoniser les taux obtenus a posteriori, sur des critères fondés sur l'expertise de géomorphologues côtiers. Cette question est abordée plus précisément dans le chapitre 4.

## 2.4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce chapitre montre que les valeurs de montée du niveau de la mer définies pour la partie submersion des PPRL sont cohérentes avec certaines projections du GIEC (Church *et al.*, 2013). Néanmoins, l'utilisation simplifiée de deux valeurs (+20 cm et +60 cm) ne permet pas de prendre en compte les différents scénarios vraisemblables pour des travaux spécifiques sur le recul du trait de côte. De plus, le manque de précisions sur la période de temps à laquelle est rattachée ces éléments apparaît préjudiciable pour l'analyse temporelle de l'évolution du trait de côte.

Ainsi, sur la question de l'élévation du niveau de la mer, le chapitre 2 permet de formuler les recommandations suivantes :

- préciser les périodes de références applicables pour l'élévation du niveau de la mer ;
- utiliser des données d'élévation du niveau de la mer plus complètes que celles préconisées pour la submersion marine dans le cadre des PPRL.

Sur la question de la prise en compte de la montée du niveau de la mer pour évaluer le recul du trait de côte dans les études PPRL, ce chapitre a montré que le cadre méthodologique a évolué entre 2011 et 2014, sans permettre de proposer une approche complètement applicable à l'heure actuelle.

Actuellement, le traitement des données mobilisables ne permet pas d'évaluer l'effet récent de la montée du niveau de la mer sur le trait de côte des secteurs étudiés. Ce point a d'ailleurs rendu caduque l'approche basée sur « la règle de trois » proposée en 2011 dans les travaux préalables au guide méthodologique PPRL.

Ainsi, le recueil des quelques informations disponibles traitant de l'effet du changement climatique sur le trait de côte dans les études d'aléa des PPRL, permet de formuler deux besoins :

- Un besoin de recherche, de données et de méthodes, pour évaluer l'implication actuelle de la montée du niveau de la mer sur le recul du trait de côte observé.
- Un besoin de proposition d'éléments méthodologiques nouveaux, suffisamment aboutis et opérationnels pour permettre une prise en compte plus systématique de la montée du niveau de la mer dans la mise au point de projections de recul du trait de côte pour les politiques publiques.

### 3. Nouvelles recherches mobilisables concernant l'élévation du niveau de la mer

La section précédente compare les projections globales de niveau de la mer du GIEC aux scénarios utilisés pour l'aléa de submersion marine des PPRL. Or, l'élévation relative du niveau de la mer, telle qu'elle pourrait être mesurée localement par un marégraphe, peut s'écarter significativement de la tendance globale (Meyssignac et Cazenave, 2012 ; Stammer *et al.*, 2013). Les résultats scientifiques de ces dernières années peuvent être mobilisés pour améliorer la qualité de ce paramètre dans les études d'aléa littoraux nécessaires aux politiques publiques. Ils concernent :

- la variabilité régionale du niveau de la mer ;
- la dynamique temporelle du phénomène ;
- les mouvements verticaux du sol ;
- les incertitudes associées.

Les sections suivantes présentent successivement :

- les projections de niveau de la mer disponibles actuellement et potentiellement mobilisables pour des besoins opérationnels, ainsi que leurs limites ;
- un premier ensemble de projections de niveau de la mer pour la France métropolitaine et des collectivités d'Outre-Mer ;
- des sources de données permettant d'apprécier la contribution potentielle des mouvements verticaux du sol ;
- des recommandations concernant de futures acquisitions de données.

#### 3.1. PROJECTIONS DE NIVEAU DE LA MER

Plusieurs projections de niveau de la mer régionales sont actuellement disponibles. Elles se distinguent par les échéances de temps considérées, et leur manière de décrire les incertitudes :

- projections régionales médianes et vraisemblables (Church *et al.*, 2013) ;
- projections probabilistes (Kopp *et al.*, 2013) ;
- projections multi-centennales, excédant l'échéance de 2100 (Clark *et al.*, 2016) ;
- projections fondées sur des scénarios (NRC, 1987).

##### 3.1.1. Projections régionales médianes et vraisemblables

En 2013, le GIEC a publié non seulement des scénarios globaux d'élévation du niveau de la mer, mais également des scénarios régionaux (Illustration 16). Ces projections sont construites en sommant les effets régionaux de chaque contribution à l'élévation du niveau de la mer (Slangen *et al.*, 2012) :

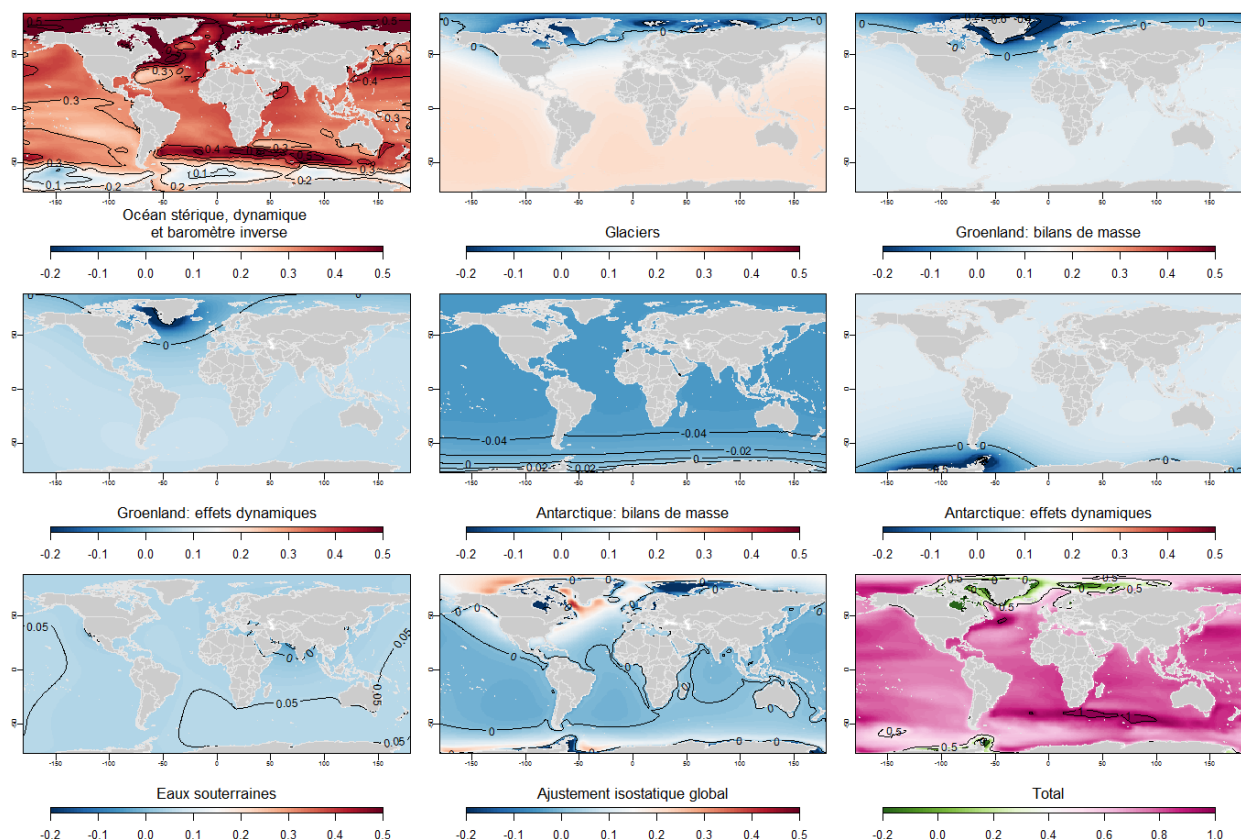
- expansion thermique des océans (effets stériques) et les effets de changements de circulation océanique et de pression atmosphérique ;
- pertes de masses des glaciers de montagne ;



- pertes de masses des calottes de glace antarctique et groenlandaises ;
- extractions d'eaux souterraines ;
- réponse de la terre solide à la dernière déglaciation (ajustement isostatique global).

Les disparités régionales s'expliquent tout d'abord par le réchauffement non homogène de l'océan. En outre, la terre solide se déforme non seulement en réponse aux redistributions de masses induites par les déglaciations passées (ajustement isostatique global), mais aussi en réponse à la déglaciation actuelle (Stammer *et al.*, 2013). Ces effets gravitationnels sont importants : schématiquement, la fonte de glace au Groenland se traduit localement et jusqu'à 2 500 km de la source par une baisse du niveau de la mer, par une hausse du niveau marin moins importante que la moyenne globale jusqu'à 7 500 km de la source, et plus importante que la moyenne globale au-delà. Tous ces processus sont pris en compte dans les projections présentées dans l'illustration 16. L'illustration 17 présente par ailleurs l'élévation du niveau de la mer totale et les incertitudes associées pour deux scénarios de changement climatique (RCP 8.5 et 2.6).

Ces projections médianes et vraisemblables régionales n'excluent pas des scénarios d'élévation du niveau de la mer plus rapide : selon la terminologie du GIEC, il existe au minimum 2/3 de chances que le niveau de la mer se situe dans l'intervalle vraisemblable. Aussi, il faut avoir recours à d'autres types de projections pour obtenir une information sur les possibilités d'élévation du niveau de la mer plus rapides que dans le cas des scénarios vraisemblables.



**Illustration 16 : 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 (Données : GIEC ; Carson *et al.*, 2015).**

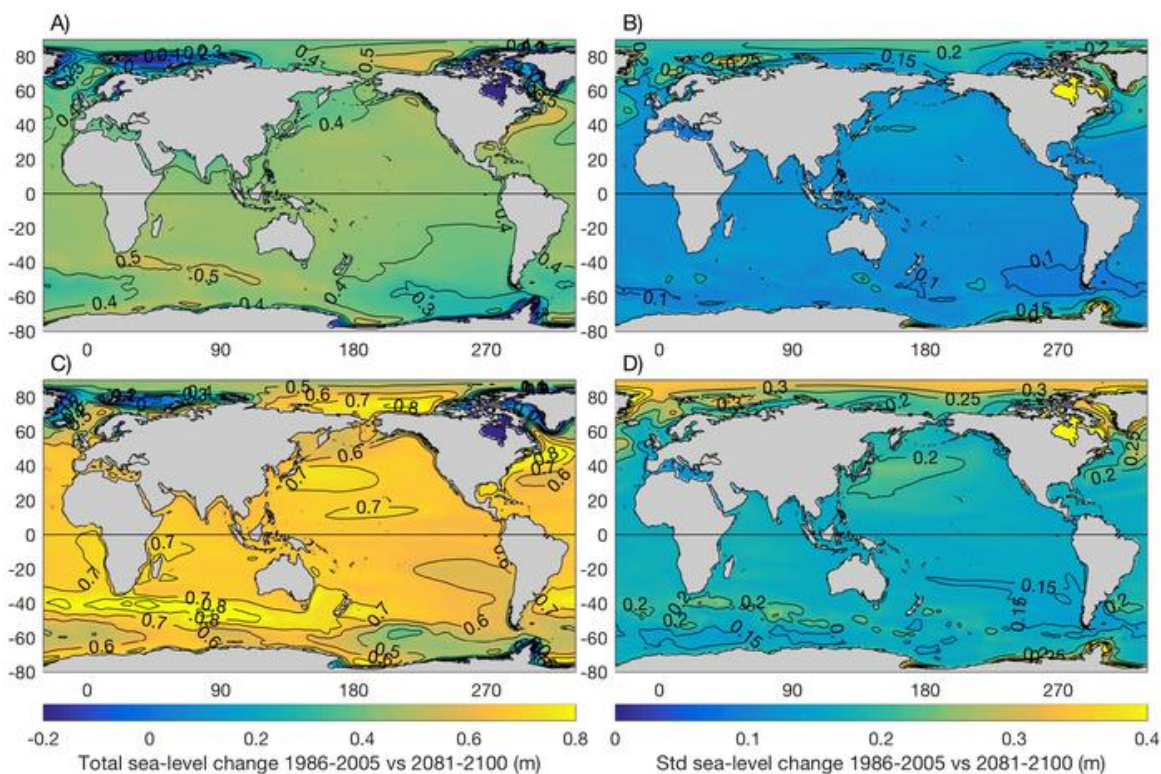


Illustration 17 : Variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer et ses incertitudes (1 écart type, indiqué Std dans la figure) dans le cas des scénarios RCP 2.6 (A et B) et RCP 8.5 (C et D) (Figure préparée par Aimée Slangen pour l'article Le Cozannet et al., 2017).

### 3.1.2. Projections régionales probabilistes

Les projections probabilistes d'élévation du niveau de la mer se présentent sous la forme de densités de probabilité, et sont conditionnées à un scénario de changement climatique et à une date considérée. Les projections de Kopp *et al.* (2014) présentées dans l'illustration 18, ont été reprises dans plusieurs rapports de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA ; Sweet *et al.*, 2017). Ces projections probabilistes sont conditionnées à trois scénarios de changement climatique (RCP 2.6, 4.5 ou 8.5) et produites pour des échéances de temps comprises entre 2000 et 2200.

Ces projections sont mises à disposition pour un certain nombre de marégraphes présentant suffisamment de données pour estimer les contributions des mouvements verticaux du sol par analyse des séries temporelles marégraphiques (Kopp *et al.*, 2014). En pratique, l'estimation qui est faite des mouvements verticaux du sol est correcte lorsque ceux-ci sont importants (exemple : cas de Manille aux Philippines) mais introduit parfois un biais (exemple : cas de La Rochelle, que Kopp *et al.* (2014) estiment en subsidence tandis que les données de GPS permanent de l'université de La Rochelle montrent une remarquable stabilité (Wöppelmann *et al.*, communication personnelle).

L'illustration 18 montre des projections probabilistes de Kopp *et al.* (2014) pour le scénario RCP 4.5 (correspondant approximativement aux émissions de gaz à effet de serre qui seraient induites par le respect des engagements des États lors de la signature de l'accord de Paris). Cette figure montre que :

- en métropole, Kopp *et al.* (2014) estiment que l'élévation du niveau marin sera probablement moins élevée qu'au niveau global ; ceci s'explique par les effets gravitationnels induits par la fonte des glaciers arctiques et de la calotte du Groenland : l'Europe étant relativement proche de ces sources, elle est plus faiblement affectée par la fonte de ces masses de glace que d'autres régions comme les tropiques ; ces effets peuvent être identifiés dans l'illustration 16 ;
- à Nouméa (Nouvelle Calédonie) et à Papeete (Polynésie), la densité de probabilité représentant l'incertitude de l'élévation du niveau de la mer est légèrement plus incertaine (plate) que la distribution globale ;
- à Papeete (Polynésie), et à Port-Louis (Île Maurice, marégraphe utilisable le plus proche de La Réunion) et à Pointe-à-Pitre (Guadeloupe), les projections sont sensiblement plus incertaines que pour les autres sites.

Dans les deux derniers cas, ces incertitudes plus importantes sont liées au caractère très incertain de la fonte des calottes groenlandaises et antarctiques. En effet, ces territoires sont situés en zones tropicales. Ils sont donc parmi les plus éloignés des masses de glace situées aux pôles, qui constituent la contribution la plus incertaine à l'élévation du niveau de la mer future. Or, les effets gravitationnels induits par les redistributions de masses associées à la fonte des glaces impliquent que ces territoires sont particulièrement affectés par les incertitudes pesant sur ces sources éloignées.

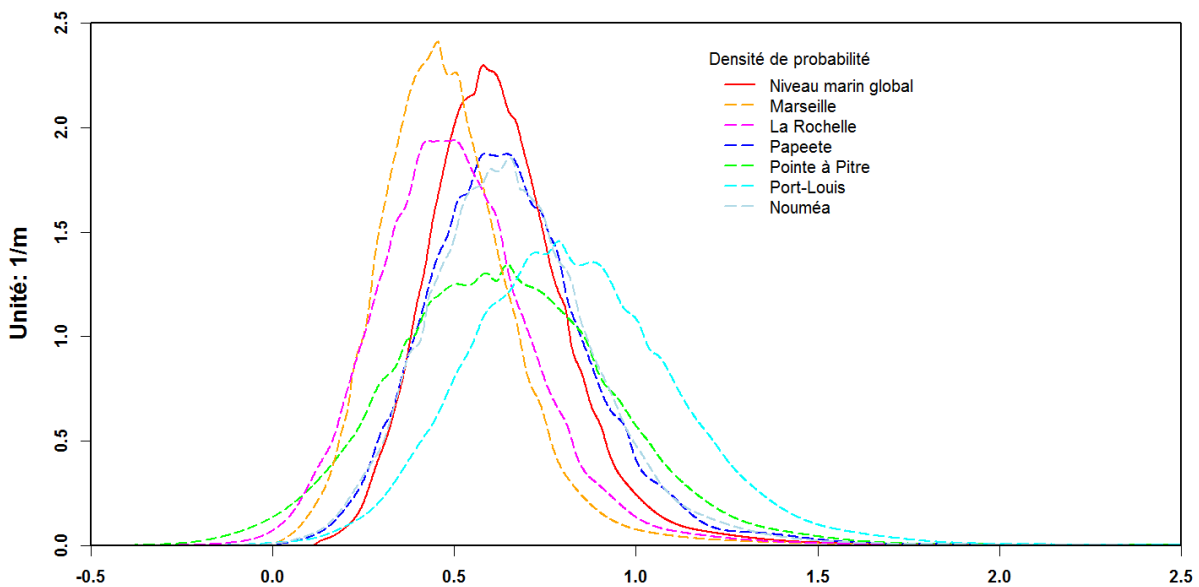


Illustration 18 : Projections probabilistes de l'élévation du niveau de la mer, en 2100, pour le scénario RCP 4.5, pour des marégraphes situés en Métropole, dans les collectivités d'outre mer françaises ou à proximité (Données : Kopp *et al.*, 2014).

### 3.1.3. Projections fondées sur des scénarios définis explicitement

#### a) Motivation

Les projections probabilistes posent une difficulté importante : elles ne communiquent que partiellement les conditions qui ont mené à obtenir une simulation particulière : par exemple les simulations de Kopp *et al.* (2014) estiment que la probabilité de dépasser 2,5 m en 2100 est de 0,5 %. Les hypothèses qui ont conduit à cette élévation du niveau de la mer ne sont pas précisées clairement, il est alors difficile d'évaluer si une telle augmentation du niveau de la mer nécessite d'être prise en compte dans une étude d'aléa de recul du trait de côte. Plus généralement, la



communauté scientifique constate qu'il existe une incertitude sur la forme exacte de la distribution de probabilité représentant les projections de l'élévation du niveau de la mer (de Vries et van de Wal, 2015). Les scénarios dans lesquels le niveau de la mer s'écarterait sensiblement des valeurs vraisemblables du GIEC restent donc mal décrits par les projections existantes.

### **b) Principe**

Pour lever ces difficultés, des méthodes mathématiques issues des théories dites « extra-probabilistes » de l'incertain ont été proposées (NRC, 1987 ; Ben Abdallah *et al.*, 2013 ; Bakker *et al.*, 2017 ; Le Cozannet *et al.*, 2017 ; Stephens *et al.*, 2017 ; Hinkel *et al.*, *in prep.*). Pour l'utilisateur, ces projections de l'élévation du niveau de la mer prennent la forme de scénarios décrits explicitement, en termes de contribution des différentes sources d'élévation du niveau de la mer.

L'illustration 19 illustre l'approche générale permettant de générer de tels scénarios : cette figure présente la médiane et l'intervalle vraisemblable de chaque contribution. De plus, elle indique les contributions maximales et minimales de chacune des sources (pointes supérieures et inférieures des triangles). Les contributions rouges sont les contraintes globales. Elles sont fondées sur :

- les valeurs indiquées dans le chapitre niveau de la mer du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC (Church *et al.*, 2013) pour les valeurs médianes et vraisemblables ;
- les articles de Jackson et Jevrejeva (2016) et Marzeion *et al.* (2012) pour les valeurs extrêmes de chacune des contributions<sup>5</sup>.

Les carrés et triangles noirs indiquent les implications régionales de la contrainte globale indiquée en rouge. Dans le cas présenté dans l'illustration 19, les écarts les plus significatifs avec la moyenne globale se situent au niveau des contributions des glaciers de montagne et du Groenland.

---

<sup>5</sup> D'une manière générale, le manque de données concernant les valeurs extrêmes possibles conduit à considérer des valeurs similaires pour différents scénarios. Par exemple, la contribution maximale de l'Antarctique n'est pas conditionnée à un scénario de changement climatique (RCP 2.6, 4.5 ou 8.5).

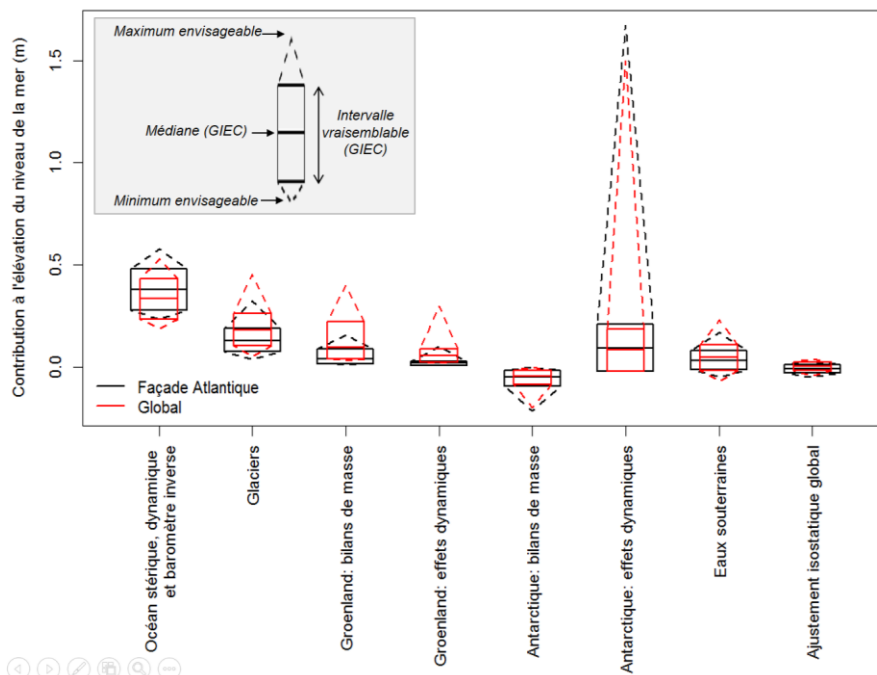


Illustration 19 : Contraintes globales (rouge) et implications régionales (noir) de chaque contribution à l'élévation du niveau de la mer, pour le scénario RCP 8.5 en 2100, le long de la façade Atlantique métropolitaine.

### c) Scénarios pour la France métropolitaine et outre-mer

Dans les résultats qui suivent, les projections issues de la contrainte globale de l'illustration 19 sont présentées pour différents territoires français, à l'échéance 2100 et pour les scénarios de changement climatique RCP 8.5 (Illustration 20) et RCP 2.6 (Illustration 21). Elles sont présentées sous la forme d'intervalles de confiance, indiquant les valeurs minimales et maximales possibles de l'élévation du niveau de la mer régionale, prenant en compte toutes les contributions de l'illustration 19, et excluant donc des mouvements verticaux locaux. Ces projections prennent en compte le fait que les précipitations en Antarctique (bilans de masse de surface) devraient être d'autant plus fortes que le changement climatique sera intense (Favier *et al.*, 2017). Elles sont compatibles avec l'ensemble des résultats sur l'élévation du niveau de la mer parus depuis le 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC, à l'exception de la projection la plus forte d'une étude portant sur l'Antarctique<sup>6</sup> (De Conto et Pollard, 2016), qui est incompatible avec l'intervalle vraisemblable du GIEC (Le Bars *et al.*, 2017).

Les projections des Illustration 20 et Illustration 21 prennent bien en compte les processus globaux à l'origine de la hausse du niveau de la mer. En revanche, elles ne considèrent pas les mouvements verticaux du sol locaux autres que ceux liés à l'ajustement isostatique global (sismicité, tectonique ou volcanisme local, effets anthropiques ou naturels sur les nappes souterraines, etc.). Par ailleurs, elles ne prennent pas en compte les effets liés à la circulation océanique de méso-échelle, telles que les incertitudes liées aux processus au niveau du détroit

<sup>6</sup> Le GIEC indique qu'au moment de la rédaction de son 5<sup>ème</sup> rapport, les scénarios d'élévation du niveau de la mer plus rapides pourraient conduire à une élévation du niveau de la mer située quelques dizaines de centimètres au-dessus de l'intervalle vraisemblable, soit une élévation du niveau marin global d'au plus 1.5 m au-dessus de la moyenne globale. L'article publié depuis par De Conto et Pollard (2016) revoit à la hausse ces scénarios, tandis que d'autres les confirment (Ritz *et al.*, 2015).

de Gibraltar ou les effets de l'élévation du niveau de la mer sur la marée (Idier *et al.*, 2017). Ces effets sont actuellement des sujets de recherches.

Région	Minimum (m)	Médiane (m)	Maximum (m)
Façade Atlantique	Entre 0.16 et 0.22m	0.63m	Entre 1.1 et 2.8m
Façade Méditerranéenne	Entre 0.27 et 0.30m	0.69m	Entre 1.1 et 2.9m
Manche et Mer du Nord	Entre 0.24 et 0.26m	0.63m	Entre 1.0 et 2.7m
Antilles	Entre 0.20 et 0.27m	0.76m	Entre 1.3 et 3.4m
Guyane	Entre 0.20 et 0.27m	0.77m	Entre 1.3 et 3.4m
La Réunion	Entre 0.20 et 0.29m	0.82m	Entre 1.4 et 3.8m
Mayotte	Entre 0.25 et 0.32m	0.83m	Entre 1.4 et 3.6m
Nouvelle Calédonie	Entre 0.25 et 0.32m	0.81m	Entre 1.4 et 3.6m
Polynésie : îles de la Société	Entre 0.16 et 0.24m	0.75m	Entre 1.3 et 3.5m
Polynésie : îles Australes	Entre 0.15 et 0.25m	0.77m	Entre 1.4 et 3.5m
Polynésie : îles Marquises	Entre 0.16 et 0.24m	0.75m	Entre 1.3 et 3.6m
Polynésie : Tuamotus (Rangiroa)	Entre 0.16 et 0.24m	0.75m	Entre 1.3 et 3.5m
Polynésie : Tamotus Gambier	Entre 0.12 et 0.20m	0.72m	Entre 1.3 et 3.5m
Saint Pierre et Miquelon	Entre 0.26 et 0.37m	0.84m	Entre 1.3 et 3.2m

Illustration 20 : Scénarios d'élévation du niveau de la mer pour les différentes régions françaises en 2100 pour le scénario RCP 8.5.

Région	Minimum (m)	Médiane (m)	Maximum (m)
Façade Atlantique	Entre 0.03 et 0.07m	0.40m	Entre 0.74 et 2.3m
Façade Méditerranéenne	Entre 0.16 et 0.18m	0.49m	Entre 0.8 et 2.4m
Manche et Mer du Nord	Entre 0.13 et 0.15m	0.45m	Entre 0.74 et 2.3m
Antilles	Entre 0.07 et 0.11m	0.50m	Entre 0.9 et 2.7m
Guyane	Entre 0.04 et 0.09m	0.49m	Entre 0.89 et 2.6m
La Réunion	Entre 0.04 et 0.09m	0.50m	Entre 0.93 et 2.8m
Mayotte	Entre 0.09 et 0.13m	0.53m	Entre 0.94 et 2.7m
Nouvelle Calédonie	Entre 0.12 et 0.16m	0.55m	Entre 0.96 et 2.8m
Polynésie : îles de la Société	Entre 0.03 et 0.07m	0.47m	Entre 0.90 et 2.6m
Polynésie : îles Australes	Entre 0.01 et 0.05m	0.46m	Entre 0.88 et 2.6m
Polynésie : îles Marquises	Entre 0.04 et 0.09m	0.49m	Entre 0.91 et 2.7m
Polynésie : Tuamotus (Rangiroa)	Entre 0.04 et 0.08m	0.48m	Entre 0.9 et 2.7m
Polynésie : Tamotus Gambier	Entre 0 et 0.03m	0.44m	Entre 0.86 et 2.6m
Saint Pierre et Miquelon	Entre 0.09 et 0.18m	0.57m	Entre 0.96 et 2.7m

Illustration 21 : Scénarios d'élévation du niveau de la mer pour les différentes régions françaises en 2100 pour le scénario RCP 2.6.

### 3.1.4. Projections régionales multi-centennales

Dans le cas où les décisions d'aménagement concernent des infrastructures à longue durée de vie (exemple : centrales nucléaires, installation portuaires), il peut être utile de disposer de projections de niveau de la mer excédant 2100. Depuis le rapport du GIEC de 2013 (Church *et al.*, 2013), l'étude de Clark *et al.* (2016) a présenté de telles projections (Illustration 22). L'incertitude principale de ces projections concerne la vitesse de la réponse des calottes polaires antarctique et groenlandaise au réchauffement climatique. Dans le cas de faibles émissions (scénario d'émission de 1 280 Gt de carbone), le rythme d'élévation du niveau de la mer pourrait se limiter à 0.5 m par siècle (5 mm/an), alors que pour des scénarios de poursuite des émissions de gaz à effets de serre (scénario d'émission de 5 120 Gt de carbone), des scénarios de 4 m par siècle (4 cm par an) sont obtenus par la modélisation. Si la résolution temporelle de ces projections est limitée, elles permettent d'apprécier l'effet du changement climatique à une échelle de temps pertinente au regard des phénomènes physiques impliqués. Les données de ces projections sont disponibles dans les annexes de l'article de Clark *et al.* (2016).

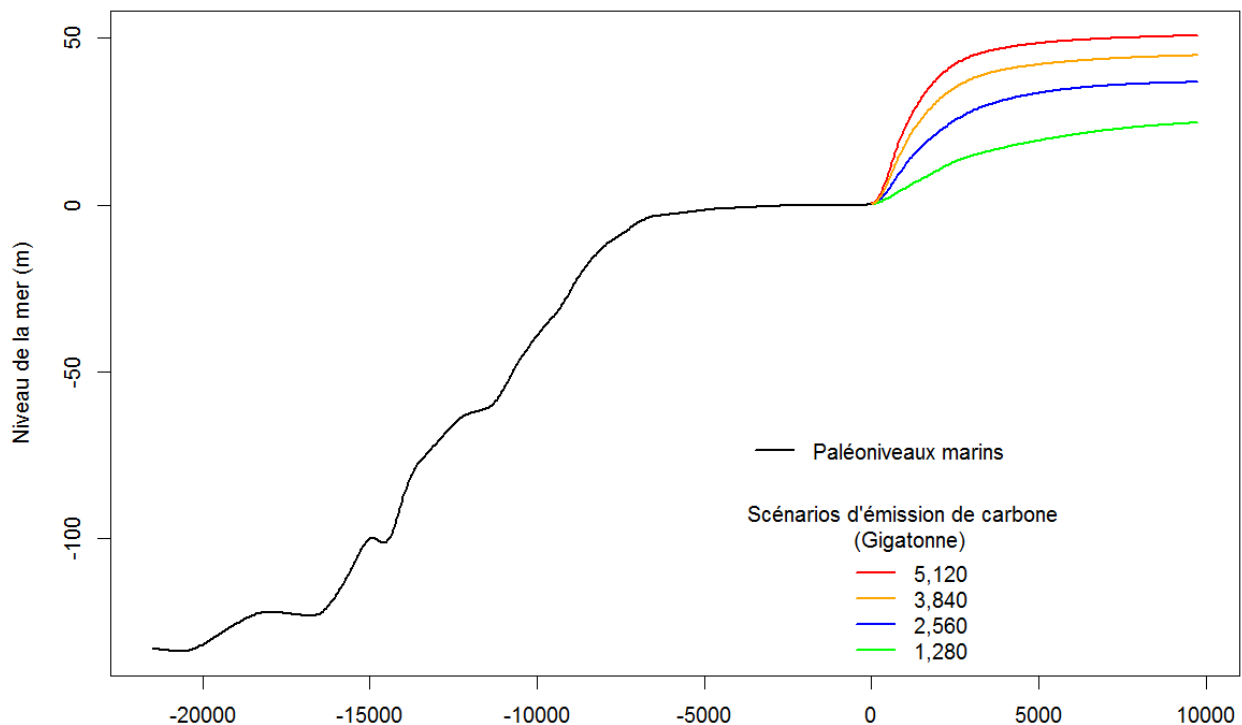


Illustration 22 : Projections multicentennales d'élévation du niveau de la mer entre -21 000 ans (dernier maximum glaciaire) et +10 000 ans pour quatre scénarios d'émission de carbone, correspondant à la poursuite d'émissions (5120Gt), leur limitation drastique (1280Gt) et des scénarios intermédiaires (Données : Clark *et al.*, 2016).

## 3.2. DONNÉES MOBILISABLES POUR ÉVALUER LES EFFETS D'AUTRES MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOL

Les variations du niveau marin relativement à la côte peuvent être affectées par des mouvements du sol d'origine anthropique (extractions d'eaux souterraines, d'hydrocarbures...) ou naturelle (tectonique, volcanisme, autres mouvements de terrain). En général, ces mouvements verticaux du sol demeurent mal connus. La première étape pour les évaluer consiste à analyser des données d'observations géodésiques.

Plusieurs techniques de mesures permettent d'évaluer les mouvements verticaux du sol :

- les séries temporelles de GPS permanents, telles que celles présentes dans la base de données SONEL ([www.sonel.org](http://www.sonel.org) ; Wöppelmann *et al.*, 2007) : ces mesures sont précises (erreurs métrologiques souvent inférieures à 1 mm/an), mais ponctuelles et plusieurs années d'acquisition sont nécessaires pour atteindre de telles précisions. D'autres données de GPS (exemple : réseau de l'IGN) peuvent également être consultées ;
- l'analyse de données marégraphiques, combinée ou non avec l'altimétrie spatiale (Kopp *et al.*, 2014 ; Wöppelmann et Marcos, 2017) : ces techniques ont une précision moindre, mais permettent de valider ou d'invalidier une hypothèse ;
- la comparaison de deux campagnes de nivellement, qui permettent d'atteindre des précisions millimétriques le long du réseau de transport terrestre (Lenôtre *et al.*, 1999), 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 allant de moins d'un millimètre par an à quelques centimètres par an, y-compris lorsqu'il s'agit de mouvements non linéaires ; cette technique s'applique cependant avant tout aux zones peu végétalisées, et est conditionnée à l'existence d'une archive d'images radar ;
- enfin, l'analyse des paléo-niveaux marins peut également donner des renseignements, mais elle doit être entreprise avec précautions car, par exemple, l'ajustement isostatique global est associé à un champ de vitesses verticales qui a varié dans le temps (Leorri *et al.*, 2012).

Dans tous les cas, la méthode pour intégrer les mouvements verticaux du sol dans les projections de niveau de la mer consiste à extrapoler les taux observés (exemple : Kopp *et al.*, 2014). 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.

En France métropolitaine, les données de nivellement ont été analysées (Lenôtre *et al.*, 1999) et un certain nombre de GPS permanents sont accessibles. Quelques études d'interférométrie radar ont également été réalisées, révélant par exemple l'extension et la vitesse de subsidence dans la région de Nice (Cavalié *et al.*, 2015). Outre-mer, des indications de mouvements verticaux du sol plus importants (centimétriques à décimétrique) existent, notamment en Guadeloupe (de Michele, 2010) et à La Réunion (Bulteau *et al.*, 2015). Dans les prochaines années, les données des satellites Sentinel 1 de l'Agence Spatiale Européenne pourraient être utilisées pour produire de cartes de déformations du sol à des échelles spatiales pertinentes pour les études locales.

### 3.3. RESSOURCES MOBILISABLES ET RECOMMANDATIONS

#### a) Ressources mobilisables pour les projections du trait de côte

Ce chapitre montre que des résultats scientifiques récents pourraient être transposés depuis la sphère de la recherche vers celle des politiques publiques. Les projections régionales sont des données nouvelles qui apparaissent particulièrement utiles :

- l'approche générale permettant de générer des projections de niveau de la mer régionales est mobilisable pour des études d'évolution du trait de côte. Il reste des besoins en recherche pour quantifier à l'échelle régionale les effets de changements des courants au niveau du plateau continental, ainsi que les interactions entre la marée et l'élévation du niveau de la mer (Idier *et al.* 2017) ;

- les échéances de temps les mieux décrites actuellement dans la littérature scientifique sont le milieu et la fin du 21<sup>e</sup> siècle, qui correspondent aux échéances de temps des scénarios d'élévation du niveau de la mer actuellement pris en compte pour estimer le recul du trait de côte, notamment dans les PPRL ;
- Des informations existent sur les périodes plus proches (prochaines décennies) et plus lointaines (prochains siècles), mais des recherches sont nécessaires dans ce domaine. Il semble néanmoins important que les acteurs locaux aient accès aux informations disponibles actuellement dans ce domaine (exemple : Illustration 22).

L'illustration 23 résume quelques sources de données qui pourraient être mobilisées pour la réalisation de projection de recul de trait de côte sous l'effet du changement climatique prenant en compte les résultats de la recherche mentionnés ci-dessus.

Type de données	Site de distribution	Lien vers les données
Projections régionales vraisemblables et médianes de l'IPCC	Integrated Climate Data Center at the Hamburg University	<a href="http://icdc.cen.uni-hamburg.de/daten/ocean/ar5-slr.html">http://icdc.cen.uni-hamburg.de/daten/ocean/ar5-slr.html</a>
Projections probabilistes au niveau de marégraphes	Site de la revue « Earth Future »	<a href="http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014EF000239/abstract">http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014EF000239/abstract</a>
Projections multimillénales de Clark et al. (2016)	Site de la revue « Nature Climate Change »	<a href="http://www.nature.com/nclimate/journal/v6/n4/extref/nclimate2923-s2.xlsx">http://www.nature.com/nclimate/journal/v6/n4/extref/nclimate2923-s2.xlsx</a>
Enregistrements de GPS permanents en zones côtières	Site de l'infrastructure de recherche SONEL (Université de La Rochelle)	<a href="http://www.sonel.org">www.sonel.org</a>

*Illustration 23 : Sélection de données potentiellement mobilisables immédiatement pour affiner les scénarios de niveau de la mer des PPRL.*

## **b) Recommandations**

Ce chapitre conclut que les résultats de la recherche récente sur l'élévation du niveau de la mer pourraient aujourd'hui être transférés vers des applications opérationnelles d'appui aux politiques publiques. Plusieurs recommandations sont formulées :

- L'année/période de référence des scénarii d'élévation du niveau de la mer devrait être spécifiée et pourrait être rendue cohérente avec celle choisie par le GIEC, afin de faciliter la comparaison des différents scénarii (voir chapitre 2) ;
- Compte tenu de l'importance des incertitudes des projections de niveau de la mer, il semble que celles-ci doivent être communiquées aux différents acteurs impliqués ; ces incertitudes peuvent être décrites selon l'approche du GIEC (projections médianes et vraisemblables), sous une forme probabiliste (exemple Kopp *et al.*, 2014) ou sous la forme de scénarios décrits explicitement (exemple : pire des cas, meilleur des cas) ;
- Les projections sont actuellement conditionnées à des scénarios de changement climatique RCP 2.6, 4.5 ou 8.5. Cependant, des projections conditionnées à des élévations de température globales (exemple : 1.5 °C ou 2 °C) deviennent peu à peu accessibles. Il pourrait être envisagé de considérer ces projections dans la mesure où les objectifs de limitation du réchauffement climatique de l'accord de Paris s'expriment en degrés au-dessus de la période préindustrielle ;
- Il est recommandé de prévoir une procédure de révision périodique des scénarios d'élévation du niveau de la mer : en effet, les scénarios sont amenés à évoluer avec de nouvelles

connaissances, notamment en glaciologie et en océanographie. À titre d'exemple, en Grande Bretagne, les scénarios de niveau de la mer sont mis à jour périodiquement pour appuyer les politiques d'adaptation au changement climatique (Hulme *et al.*, 2002 ; UKCP, 2018).

- Concernant les mouvements verticaux du sol, il est recommandé d'intégrer une analyse des données disponibles afin de déterminer si cette composante doit être prise en compte pour la réalisation de scénarios d'élévation locales du niveau de la mer. En termes d'acquisition de données, le déploiement de GPS permanents et l'analyse de données InSAR (exploitation des données Sentinel 1 notamment) sont tout particulièrement importants pour cette phase d'étude.





## 4. Nouvelles recherches mobilisables concernant l'évolution du trait de côte

Les recherches portant sur l'évolution du trait de côte dans le contexte de l'élévation du niveau de la mer examinent différents aspects :

- le cadre théorique des modèles d'évolution du trait de côte ;
- l'intégration de données observées ;
- l'évaluation des capacités prédictives des modèles d'évolution du trait de côte ;
- la quantification de la précision et de l'incertitude ;
- la question des ressources informatiques nécessaires.

La question du transfert des méthodes proposées de la sphère de la recherche vers les applications n'est pas centrale dans ces études. La littérature scientifique ne propose donc pas de méthode unique, directement applicable, qu'il serait possible de suggérer comme méthode de référence pour établir des projections de recul du trait de côte. Ce chapitre présente la littérature scientifique sous la forme d'une typologie des différentes approches (section 4.1), les méthodes mobilisables pour estimer les Tx (section 4.2) et pour prendre en compte l'élévation du niveau de la mer dans les projections du trait de côte (section 4.3).

### 4.1. ÉTAT DES LIEUX : TYPOLOGIE DES MÉTHODES PERMETTANT D'ÉVALUER L'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

#### 4.1.1. Approches de modélisation de l'évolution du trait de côte

De nombreux outils de modélisation numérique sont disponibles pour simuler l'évolution du trait de côte, à l'échelle événementielle comme à moyen terme. L'une des limites importantes de ces modèles concerne leur capacité à réaliser des projections multi-décennales de l'évolution du trait de côte en prenant également en compte l'élévation du niveau de la mer.

Dans cette étude, les approches ou types de modèles d'évolution côtière sont classés de la manière suivante (Illustration 24) :

- les modèles physiques 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,...). Ces modèles requièrent souvent une densité spatiale et temporelle de données difficilement disponible. 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 de complexité réduite, en contraste avec les approches basées sur la physique, se concentrent sur les processus dominants. Ces approches sont souvent préférées pour simuler l'évolution à grande emprise et à long terme du littoral. Il s'agit par exemple de modèles de profil de plage à l'équilibre (Bruun, 1962) ou d'équilibre du trait de côte. La justesse de tels modèles peut être localement limitée dès lors que des processus non résolus par le modèle contribuent pourtant significativement à l'évolution du trait de côte, ou bien lorsque les formulations proposées se heurtent à des problèmes de validation (Voir par exemple les réponses à l'article de Leathermann *et al.*, 2000) ;
- 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. Si les données historiques sont communément utilisées pour fournir une information sur l'érosion côtière à long-terme (analyse diachronique), en revanche l'extrapolation de tendances historiques (avec ou sans facteur d'ajustement) n'est pas suffisante au vu des projections de l'accélération de la remontée du niveau marin ;

- des approches combinées, combinant des modèles physiques complexes, des modèles basés sur des données historiques et des synthèses de modèles de complexité réduite, et tirant parti de leurs avantages respectifs. Ces approches peuvent par exemple reposer sur des méthodes d'assimilation de données (Long et Plant, 2012), ou bien combiner des observations et des modèles de complexité réduite (Yates *et al.*, 2010, 2013 ; Davidson *et al.*, 2010, 2013).

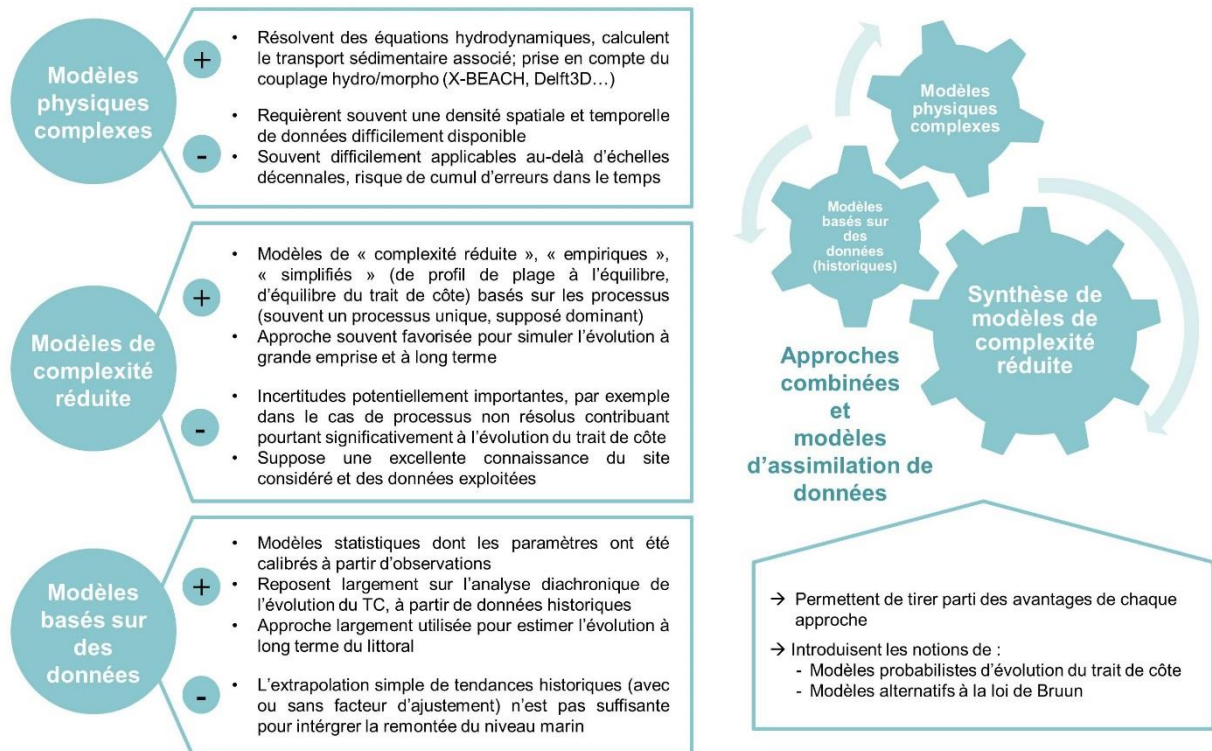


Illustration 24 : Différents modèles d'évolution côtière.

Les modèles physiques complexes d'évolution du trait de côte, résolvant les équations hydrodynamiques et calculant le transport sédimentaire associés, ne sont pas applicables aux échéances temporelles et spatiales considérées pour les projections de recul du trait de côte à long terme, au moins pour ce qui concerne les plages sableuses dominées par les vagues. Ceci conduit à privilégier des modèles de complexité réduite, fondés sur les données ou des approches combinées.

#### 4.1.2. Crédibilité des approches mobilisables : validation et incertitudes

La crédibilité des différentes approches mobilisables pour simuler l'évolution du trait de côte à long terme (> 10 ans) dépend de leur validation et de leur manière de gérer les incertitudes. La synthèse proposée par Vitousek *et al.* (2017a) souligne ainsi la faible crédibilité de projections de l'évolution du trait de côte fondées sur un modèle prédictif, sans données à l'appui, ni pour son étalonnage, ni pour sa validation (Illustration 25 A). Il souligne également la fiabilité limitée d'extrapolations simples, réalisées à partir d'un modèle linéaire basé sur des données (Illustration 25 B). Si la validation du modèle à partir de données historiques (Illustration 25 C) améliore la crédibilité de la prévision, l'assimilation de données (Illustration

25 D) l'augmente d'autant plus lorsque des modèles assimilant des données sont appliqués pour calibrer le modèle (Illustration 25 E) et qu'une période de validation récente est utilisée pour évaluer sa performance avant la prévision. Enfin, la prédiction la plus crédible (Illustration 25 F) repose certainement sur la combinaison de plusieurs approches prédictives, utilisant différentes hypothèses sur le climat océanique futur et l'élévation du niveau de la mer. Dans ce dernier cas, la difficulté est de définir une stratégie d'utilisation de projections plus crédibles, mais également incertaines, surtout aux échéances de temps longues (exemple : 2100).

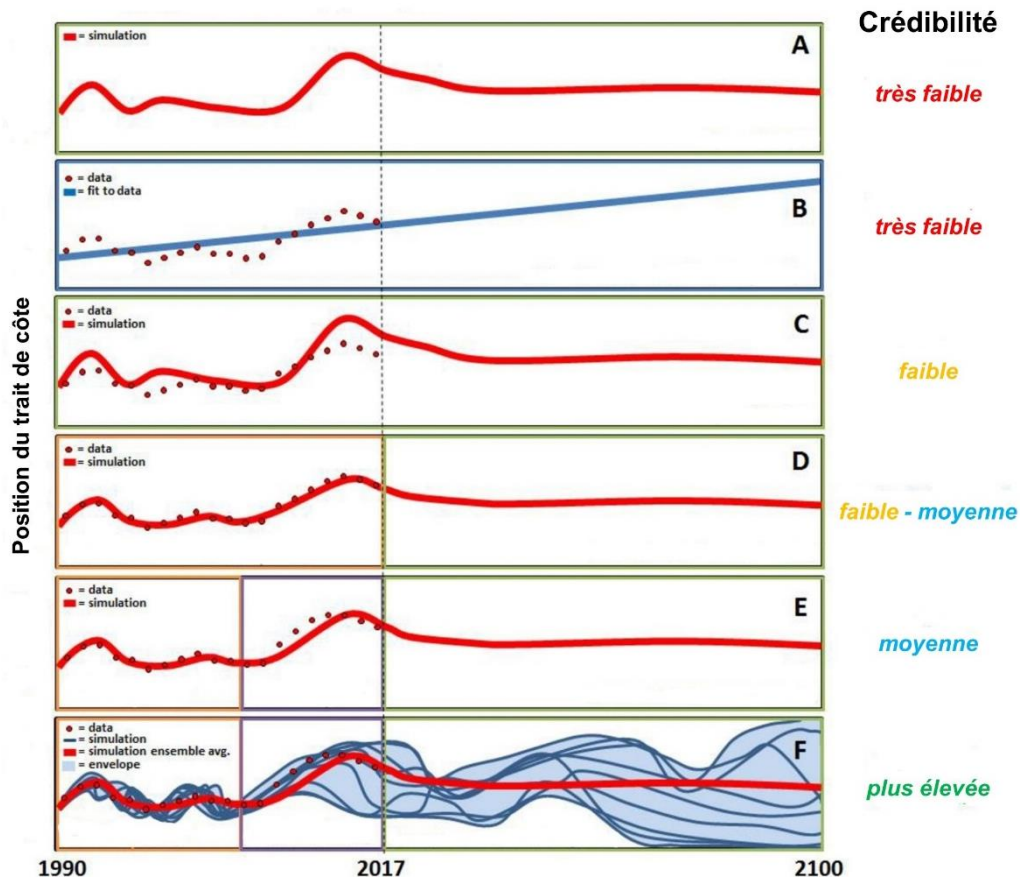


Illustration 25 : Approches mobilisables pour simuler l'évolution du trait de côte à long-terme (> 10 ans).

(A) modèle prédictif (sans données d'étalonnage / validation), (B) modèle linéaire basé sur des données, avec extrapolation (Tx), (C) modèle prédictif comparé à des données, (D) modèle prédictif assimilant des données observées, (E) modèle prédictif validé sur une période récente, (F) ensemble de modèles prédictifs. La crédibilité des approches est ici représentée de manière synthétique, et croissante du haut vers le bas (d'après Vitousek et al., 2017a).

L'amélioration des techniques de modélisation et d'implémentation de modèles combinés supporte désormais la mise en œuvre de méthodes d'assimilation de données conjointement à des modèles complexes basés sur des processus physiques : Kane *et al.* (2012) exploitant les méthodes développées par Genz *et al.* (2009) et Frazer *et al.* (2009), pour définir les zones d'aléa « recul du trait de côte » à 50 et 100 ans et incluant une gamme complète de sources d'incertitudes ; Pereira *et al.* (2013) et Dias *et al.* (2014) par l'application de deux modèles d'évolution du trait de côte GENESIS (*US Army Corps of Engineer*) et LTC (*Long-Term Configuration*), pour la projection de l'évolution du trait de côte entre 2010 et 2100 ; le modèle combiné de Banno et Kuriyama (2014) ; Enriquez *et al.* (2016) pour la combinaison à la fois des codes SWAN et SWASH et de projections régionales du niveau de la mer et des vagues, selon différents scénarios climatiques pour 2100, et utilisant ces scénarios pour réaliser des projections de l'évolution du trait de côte au moyen du modèle PETRA (Gonzalez *et al.*, 2007).

L'utilisation accrue de modèles basés sur des données nécessite une densité de données, spatiale et temporelle, suffisante. Les approches combinées et les modèles d'assimilation de données nécessitent l'existence de jeux de données suffisamment longs et résolus spatialement et temporellement. C'est pourquoi l'intensification des efforts de suivi du trait de côte menés par les observatoires littoraux est un enjeu essentiel dans la capacité de prédiction et d'adaptation de la réponse à long terme des littoraux au changement climatique. Ce besoin est clairement exprimé dans la phase d'étude amont des études d'aléas comme les PPRL.

#### **4.1.3. Types de modélisations mobilisables pour évaluer l'aléa « recul du trait de côte »**

Pour les besoins des politiques publiques, l'échéance temporelle à considérer implique d'avoir recours à des modèles utilisables à des échelles de temps multi-décennales à centennales. Ceci exclut d'une part les modèles physiques complexes (section 4.1.1), et conduit d'autre part à privilégier les méthodes les plus crédibles de la figure 25 (section 4.1.2), c'est-à-dire des méthodes intégrant des données d'observations.

Aussi, ces études peuvent bénéficier de deux types de recherches :

- de méthodes d'analyse des évolutions passées du trait de côte, considérant en particulier les cas où le trait de côte évolue de manière non-linéaire dans le temps ou de façon hétérogène dans l'espace (section 4.2) ;
- de méthodes prenant en compte l'élévation du niveau de la mer (section 4.3).

## **4.2. APPROCHES MOBILISABLES POUR L'ÉTUDE D'ÉVOLUTIONS PASSÉES**

De nouvelles méthodes, dont certaines sont déjà suggérées dans le cadre du guide méthodologique, permettent d'analyser simultanément les difficultés relatives aux hétérogénéités spatiales et aux non-linéarités temporelles de l'évolution du trait de côte. À l'exception de la méthode fondée sur l'expertise géomorphologique, toutes ces méthodes présupposent la disponibilité d'un grand nombre de traits de côte.

### **4.2.1. Méthode fondée sur l'expertise géomorphologique**

La subdivision d'une région d'étude en zones d'évolution du trait de côte homogènes peut se faire à partir de la géomorphologie (unités géomorphologiques) et en se basant sur des caractéristiques morfo-sédimentaires notamment, par la présence d'infrastructures et d'ouvrages de protection côtière, à partir des inversions de tendances calculées dans les taux moyens d'évolution, etc. Ainsi, Bernon *et al.* (2016) comparent des taux d'évolution calculés par les différentes méthodes statistiques, puis proposent une harmonisation des taux bruts d'évolution, afin de calculer des taux d'évolution cohérents par portions homogènes du littoral, déterminées à dire d'expert. Cette approche a donc déjà été mise en œuvre dans le cadre de l'élaboration des PPRL. Aux échelles spatiales considérées par les PPRL, il s'agit d'une approche pragmatique et efficace. Elle est donc recommandée dans les cas où le nombre de traits de côte disponibles pour l'analyse est faible au regard des évolutions réelles du trait de côte.

### **4.2.2. Approche par segmentation en clusters**

Communément, les méthodes d'estimation de l'évolution du trait de côte suivent la méthode du *single-transect* (ST), où chaque transect transversal (défini le long du trait de côte à intervalle régulier) est analysé indépendamment. Simple à mettre en œuvre, cette méthode

peut induire des statistiques d'évolution du trait de côte très variables d'un transect à l'autre, et donc poser des difficultés dans les secteurs affectés par de fortes hétérogénéités spatiales<sup>7</sup>. D'autre part, l'évolution du trait de côte est souvent fortement non-linéaire et peut présenter un comportement complexe avec des inversions de tendances, où des comportements cycliques, non-linéaires et/ou épisodiques sont en jeu.

Afin de s'affranchir des effets localisés de transects (notion de *single-transect* habituelle dans les lois statistiques classiques), des artefacts et fortes disparités parfois constatées d'un profil à l'autre et induisant un trait de côte en dents de scie, une méthode consiste à regrouper ou moyenner les valeurs des taux d'évolution au sein de secteurs au comportement (morphodynamique) homogène. Suivant l'échelle considérée, la segmentation peut se faire :

- par délimitation des cellules hydrosédimentaires, les secteurs homogènes sont définis selon les morphotypes et l'exposition du littoral ;
- par les ouvrages de protection ;
- par les vitesses d'évolution du trait de côte, les reculs moyens par secteurs sont alors classés par gammes de vitesses de recul.

La nouvelle approche de Burningham et French (2017) combine les mesures conventionnelles d'évolution du trait de côte avec une segmentation transversale (*alongshore*) le long du littoral, et permet de détecter les inversions de tendances le long du littoral. Cette méthode de segmentation par *clusters* (dite *cluster-based segmentation*), se base sur la notion de *cluster-analysis* de Hennig *et al.* (2015), pour déterminer des modes de comportement du trait de côte distincts (Illustration 26).

Les unités géographiques de comportement homogène sont ainsi définies à partir de tendances calculées par des lois statistiques classiques (taux exprimés en m/an) et de paramètres dimensionnels (enveloppe totale d'évolution du trait de côte et distance entre le plus ancien et le plus récent trait de côte), tels que ceux déjà mis en œuvre couramment dans les dossiers d'étude d'aléa « recul du trait de côte » présentés dans le chapitre 2.

Utilisée en combinaison avec des paramètres conventionnels de quantification de l'évolution du trait de côte, cette méthode propose une approche plus robuste pour l'analyse du comportement du littoral à grande échelle. Elle fournit une base objective pour la segmentation de la côte et peut venir compléter l'évaluation géomorphologique par expertise pour identifier des unités de gestion appropriées.

Mise en œuvre par Burningham et French sur la côte Est de l'Angleterre, cette approche a permis de distinguer plusieurs modes d'évolution du trait de côte (Illustration 26) : une érosion progressive se traduisant par un recul du trait de côte à long terme ; un comportement cyclique où les inversions de tendance sont évidentes ; un recul (ou avancée) persistant mais non linéaire. L'étude a souligné l'importance du choix des intervalles « d'échantillonnage » le long du littoral pour s'affranchir des influences du forçage océanique, de la géologie et des ouvrages, plus efficacement que par une simple analyse par « unité géomorphologique ». La mise en œuvre de l'approche à l'échelle régionale et à différentes échelles temporelles (périodes de référence entre les suivis disponibles) peut permettre de mettre en évidence des mécanismes majeurs de forçage et l'interaction évolutive de la variabilité et du changement climatique, comme des interventions anthropiques.

---

<sup>7</sup> C'est ce phénomène d'hétérogénéité spatiale qui a conduit Bernon *et al.* (2016) à affecter des taux moyens à des secteurs homogènes, déterminés par dire d'expert.



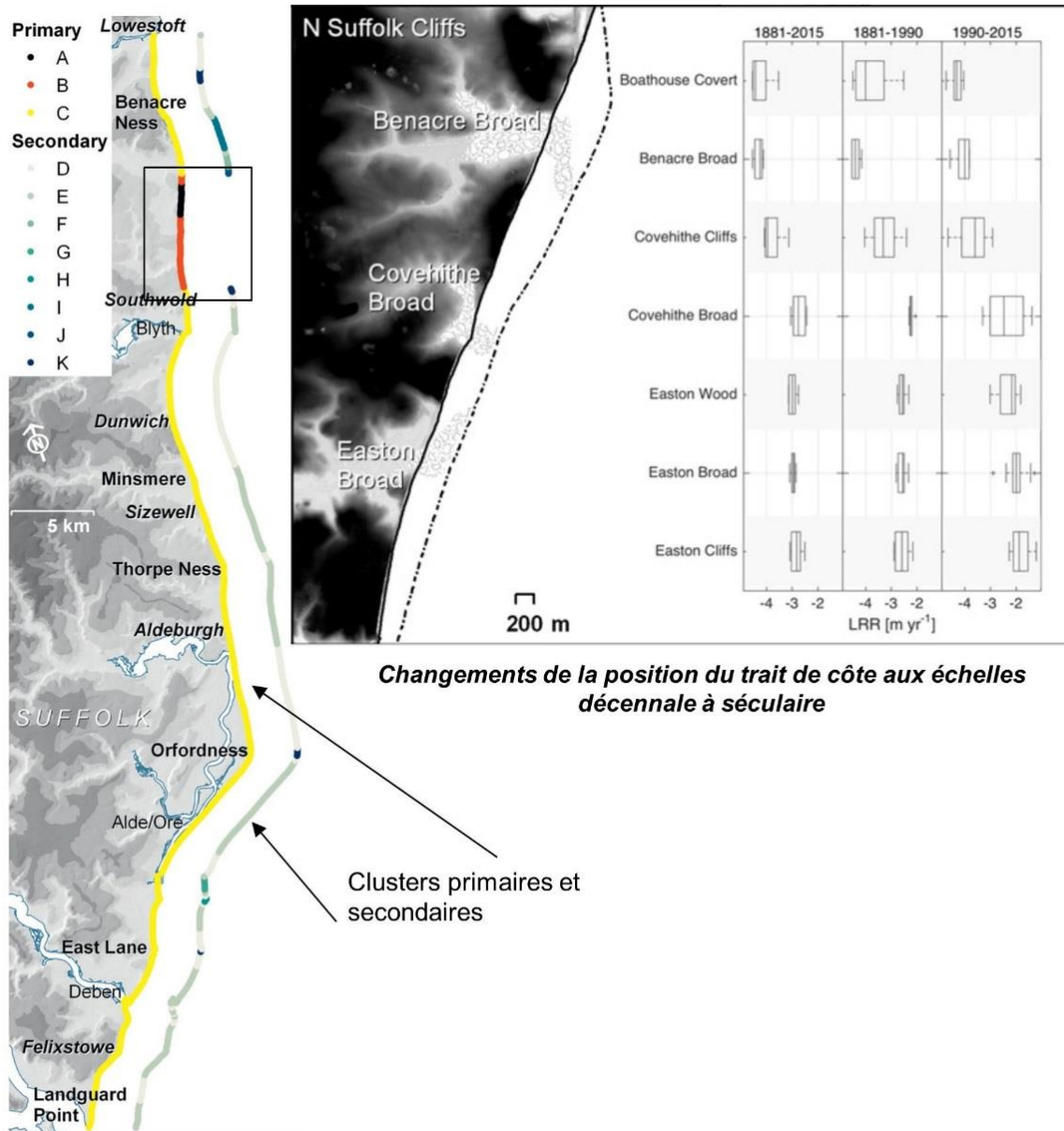


Illustration 26 : Approche de Burningham et French (2017) par Cluster-based segmentation. La classification est obtenue en regroupant les différentes sections du trait de côte par régimes d'évolution similaires au cours des périodes suivantes : 1881-2015 ; 1881-1990 et 1990-2015. Pour chaque période, l'évolution du trait de côte est estimée, pour chaque transect, par la régression linéaire aux moindres carrés (LRR), ou d'autres méthodes (LRR, cf. illustration 10).

#### 4.2.3. Méthodes d'analyse simultanée des évolutions spatio-temporelle du trait de côte

Les travaux de Frazer *et al.* (2009), Genz *et al.* (2009) et Romine *et al.* (2009) ont porté sur le développement de méthodes statistiques avancées pour le calcul de taux d'évolution du trait de côte. L'une des méthodes proposée est une méthode polynomiale, qui prend en compte à la fois l'évolution temporelle du trait de côte (termes en  $t$ , temps d'un polynôme) sur un transect donné et les relations spatiales entre transects adjacents (termes en  $x$  abscisse curviligne le long du trait de côte, d'un polynôme). Dans les cas où les observations d'évolution du trait de côte présentent de fortes discontinuités le long du trait de côte, Anderson et Frazer (2014) proposent de modéliser l'évolution du trait de côte comme une somme linéaire de B-splines.

Cette approche présente l'avantage de supprimer les effets de Gibbs (déformation du signal ou effet de bord à proximité d'une discontinuité) habituels des modèles polynomiaux. Cette méthode est applicable notamment dans le cas de côtes le long desquelles sont installés des ouvrages transversaux : de part et d'autre de ces ouvrages, les taux d'évolution rencontrés sont très différents. Dans ce cas, la méthode des B-splines permet de prendre en compte les discontinuités du Tx qui résultent de ce phénomène. Enfin, une dernière méthode mobilisée dans les travaux de Plant et Long (2012) et récemment de Vitousek *et al.* (2017b) consiste en l'application d'un filtre de Kalman.

Ces modèles doivent être utilisés avec précautions pour des échéances lointaines (exemple 2100). Une étape de validation de l'approche pourrait être effectuée en considérant la crédibilité des résultats des modèles polynomiaux, fondés sur des B-splines, un filtre de Kalman ou autre sur des projections rétrospectives. Idéalement, de telles projections rétrospectives devraient couvrir une période de temps comparable aux projections.

Ces méthodes permettent d'envisager l'intégration des évolutions cycliques ou irrégulières, observées sur de nombreux sites sableux, dans des projections de recul du trait de côte.

### **4.3. MÉTHODES MOBILISABLES POUR LA PRISE EN COMPTE DE L'ÉLEVATION DU NIVEAU DE LA MER DANS LES PROJECTIONS DU TRAIT DE COTE**

#### **4.3.1. Approches uniquement fondées sur des données**

Cette sous-section examine les approches uniquement fondées sur des données, utilisant des observations pour évaluer les effets de l'élévation du niveau de la mer. Ces approches estiment des variables telles que les futures hauteurs de dune, les taux d'évolution et les positions du trait de côte, ainsi que leurs relations statistiques avec d'autres variables (marée, vagues, pente côtière, géomorphologie) au moyen de modèles statistiques tels que des réseaux bayésiens (Passeri *et al.*, 2014 ; Gutierrez *et al.*, 2015 ; Plant *et al.*, 2016). Dans cette approche, le point clé est de disposer d'observations sur des sites côtiers soumis à des vitesses d'élévation du niveau de la mer plus rapides que la moyenne globale (Gutierrez *et al.*, 2011)<sup>8</sup>. Cette condition nécessaire est rencontrée aux États-Unis où les mouvements verticaux du sol sont bien observés et aggravent sensiblement l'augmentation du niveau de la mer d'origine climatique (ex : Baie de Chesapeake).

Cette approche présente plusieurs avantages : elle ne se limite pas aux seules plages sableuses, elle évite les difficultés de la loi de Bruun, et elle permet une gestion transparente des incertitudes. Néanmoins, son application est conditionnée à la disponibilité de données d'évolution du trait de côte pour des sites soumis à des variations du niveau de la mer variées et représentatives des conditions futures. Faute d'observations suffisantes concernant les mouvements verticaux du sol, elle reste donc difficile à mettre en place sur le territoire métropolitain (Yates et Le Cozannet, 2012).

---

<sup>8</sup> Par exemple, si les observations disponibles ne contiennent pas de plages soumises à une élévation du niveau de la mer, la phase d'apprentissage du modèle statistique ne dispose d'aucun élément pour calibrer le modèle. On écrit donc que le modèle est uniquement fondé sur les données (Yates et Le Cozannet, 2012).

#### 4.3.2. Approches de complexité réduite

##### a) Approches fondées sur la loi de Bruun

La règle de Bruun (Bruun, 1962 ; présentée au Chapitre 1) a constitué la principale méthode d'analyse de l'impact de l'élévation du niveau de la mer depuis plusieurs décennies. Bien que les limites de cette loi aient été présentées à plusieurs reprises dans la littérature scientifique (Cooper et Pilkey, 2004 ; Ranasinghe *et al.*, 2007 ; Ranasinghe et Stive, 2009), elle demeure aujourd'hui très utilisée. À titre d'exemple, en 2014, Stevens et Kiem, présentaient encore l'application de la loi de Bruun, toujours pleinement utilisée dans la cartographie du risque en zone côtière et la définition de zones d'aléa en Australie.

Des versions plus généralisées de l'équation de Bruun sont aujourd'hui mobilisées dans les études d'aléa. Ces approches ajoutent, à l'effet de l'élévation du niveau de la mer, les différents effets à l'origine de la mobilité du trait de côte (Cowell *et al.*, 2003). Ainsi, l'équation suivante est utilisée pour évaluer le recul du trait de côte :

$$\Delta L_{total} = L + (\Delta S_{niveau\ de\ la\ mer})/\tan(\alpha) \quad (1)$$

Où :

- $\Delta L_{total}$  est l'évolution complète du trait de côte ;
- $\Delta S_{niveau\ de\ la\ mer}/\tan(\alpha)$  est l'effet de Bruun, quotient des variations du niveau de la mer  $\Delta S_{niveau\ de\ la\ mer}$  et de la pente de Bruun  $\tan(\alpha)$ .
- $L$  correspond aux effets de tous les autres processus à l'origine de la mobilité du trait de côte.

Depuis Cowell *et al.* (2003), de très nombreuses études ont mis en avant des modèles de complexité réduite, tous fondés sur le principe exposé ci-dessus. Dans ces études, le terme  $L$  peut être estimé soit à partir de l'étude des tendances historiques, soit en estimant la contribution de chacun des processus à l'origine de l'évolution du trait de côte : effets longitudinaux et transversaux, apports des rechargements de plage ou pertes liées à des prélèvements (Stive, 2004 ; Yates *et al.*, 2011 ; Rosati *et al.*, 2013 ; Houston et Dean, 2014 ; Dean et Houston, 2016 ; Le Cozannet *et al.*, 2016). Les modèles *ShoreFor* de Davidson *et al.* (2010, 2013) et *CoSMoS-COAST* (*Coastal One-line Assimilated Simulation Tool*) de Vitousek *et al.* (2017a, 2017b) sont basés sur le même principe.

##### b) Variantes de la loi de Bruun

Pour ce qui concerne les plages sableuses, deux approches de complexité modérée ont été proposées :

- le modèle R-DA de Davidson-Arnott (2005) : ce modèle fait l'hypothèse que le long d'un profil entièrement sableux, des sédiments se translatent non plus vers le bas comme dans la loi de Bruun, mais vers le haut du profil. Il considère également une préservation du système dunaire en conditions de remontée du niveau de la mer à l'instar du modèle de *rollover* de Carter (1983). Ce modèle présente l'avantage de décrire des phénomènes physiques effectivement observés sur le littoral ;
- le modèle de Brunel et Sabatier (2009), qui considère un principe dit « d'inondation active » des plages sableuses, et qui se heurte à la question de la définition précise de la pente de plage à considérer.

Ces deux modèles sont similaires à la règle de Bruun dans leur formulation : ils prennent également la forme :  $(\Delta S_{niveau\ de\ la\ mer})/\tan(\alpha)$ . D'autres modèles portant sur d'autres types de littoraux ont été développés (Illustration 27). En pratique, le *Shoreface Translation Model*



et certains modèles développés pour les falaises (Brooks et Spencer, 2012) héritent des concepts de la loi de Bruun en les adaptant au contexte géomorphologique considéré.

Type d'environnement visé	Référence du modèle
Estuaires ou baies semi-fermées méso à macrotidales	ASMITA (Kragtwijk <i>et al.</i> , 2004)
Falaises de sédiments non-cohésifs, fortement érodibles	SCAPE - Ashton <i>et al.</i> , 2011 (voir également la comparaison avec d'autres modèles: Brooks et Spencer, 2012)
Plages coralliennes et/ou plages perchées situées sur une flèche ou un lido sableux	Shoreface translation model (Kench et Cowell, 2011)

Illustration 27 : Modèles de complexité réduite alternatifs à la loi de Bruun.

### c) Modèle de Ranasinghe *et al.* (2012)

Le modèle PCR de Ranasinghe *et al.* (2012) est un modèle probabiliste de recul du trait de côte basé sur les processus physiques, qui fournit des estimations probabilistes basées sur la remontée du niveau de la mer. Le caractère probabiliste du modèle provient de la prise en compte d'une séquence d'événements de tempêtes aléatoires.

Le modèle de Ranasinghe *et al.* (2012) estime que l'essentiel des effets de l'élévation du niveau de la mer sur le trait de côte provient des échanges de sédiments entre la zone intertidale et la dune (Illustration 28). Lorsque les vagues atteignent le pied de dune, des sédiments sont perdus et le trait de côte recule parallèlement à la pente de la zone intertidale (Larson *et al.*, 2004). Par temps calme, les processus éoliens nourrissent la dune. Le modèle de Ranasinghe *et al.* (2012) calcule la position du trait de côte en superposant l'élévation du niveau de la mer aux effets de tempêtes représentatives du climat actuel.

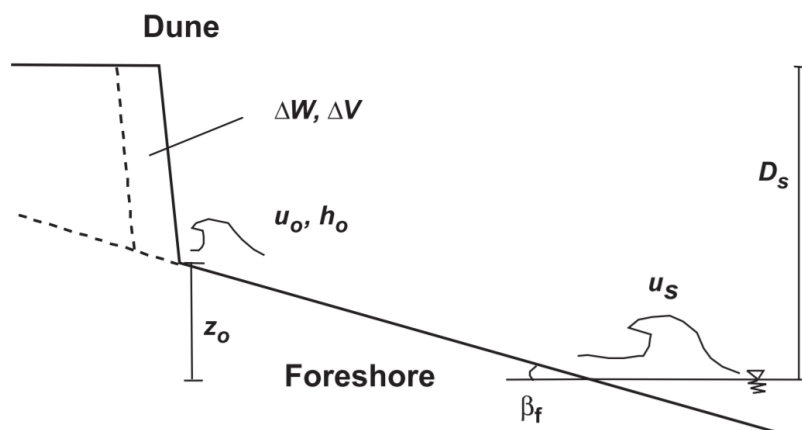


Illustration 28 : Illustration du modèle d'érosion dunaire de Larson *et al.* (2004), utilisé par Ranasinghe *et al.* (2012) pour estimer l'effet de l'élévation du niveau de la mer sur le recul du pied de dune (Source : Larson *et al.*, 2004).

La figure indique les paramètres les plus importants du modèle. Notations utilisées :  $\Delta W$ ,  $\Delta V$  : poids et volume de sable déplacé de la dune vers la plage lors d'événements ;  $u_s$  et  $u_0$  : vitesse initiale et au niveau du pied de dune du jet de rive ;  $h_0$  : hauteur maximale du jet de rive au pied de la dune ;  $z_0$  : altitude du pied de dune, repérée par rapport au niveau moyen de l'eau instantané ;  $D_s$  : altitude moyenne de la crête de dune, repérée par rapport au niveau moyen de l'eau instantané ;  $\beta_f$  : pente de la zone intertidale. « Foreshore » signifie « estran ».

Ce modèle a été mis en œuvre dans le cadre du projet d'accompagnement « Adaptation » de l'Observatoire de la Côte Aquitaine (Le Cozannet et al., 2019). Cette étude a montré que les résultats du modèle de Ranasinghe peuvent être approchés par l'équation de Bruun,  $(\Delta S_{\text{niveau de la mer}})/\tan(\alpha)$  dans laquelle on substitue les pentes de la zone intertidale aux pentes de Bruun. Les pentes des zones intertidales étant généralement plus fortes que les pentes de Bruun, le recul du trait de côte attribuable à l'élévation du niveau de la mer est plus faible avec l'approche fondée sur Ranasinghe *et al.* (2012) qu'avec celle fondée sur la loi de Bruun.

#### **d) Autres approches**

En 2014, le guide méthodologique PPRL proposait déjà quelques méthodes mobilisables pour estimer les évolutions du trait de côte sous l'effet de la remontée du niveau marin (encart n° 11 ; DGPR, 2014). La synthèse de Rollason *et al.* (2010), qui présente une comparaison de méthodes, était ainsi évoquée. Deux modèles étaient suggérés :

- le modèle SEM – *Shoreline Evolution Model* – (aussi nommé EVO) développé par Patterson (2009) de la compagnie privée BMT WBM (University Of Qld, Brisbane), est notamment utilisé pour évaluer le recul du trait de côte dû à l'élévation du niveau de la mer, aux horizons 2050 et 2100 par exemple en Australie, avec une prise en compte des transports sédimentaires transversaux et longitudinaux, de la présence d'ouvrages, récifs, caps, etc. ;
- le modèle SRM – *Shoreline Response Model* – de Huxley (2009, 2010), intègre lui aussi les transports transversaux et longitudinaux et propose d'estimer à 100 ans le recul du trait de côte dû à l'élévation du niveau de la mer et au changement des états de mer (dus au changement climatique), tout en prenant en compte l'érosion épisodique induite par les événements de tempête et l'éventuelle récupération (*recovery*) associée.

Ces deux modèles demeurent aujourd'hui peu utilisés de manière opérationnelle. Faute d'information détaillée sur les processus physiques représentés dans ces modèles, il n'est pas possible de faire des recommandations quant à leur utilisation.

## **4.4. GESTION DES INCERTITUDES**

Finalement, les modélisations réalisées par Le Cozannet et al. (2019) estiment que l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur l'évolution du trait de côte prend la forme :  $(\Delta S_{\text{niveau de la mer}})/\tan(\alpha)$ . L'incertitude du modèle d'impact de montée du niveau de la mer porte ainsi sur la valeur de la pente de plage  $\tan(\alpha)$ .

### **4.4.1. Utilisation des lois de complexité réduites en mode probabiliste**

Les progrès dans l'étude des incertitudes de l'élévation du niveau de la mer (Chapitre 3) permettent aujourd'hui d'utiliser la loi de Bruun ou ses variantes en mode probabiliste (Anderson *et al.*, 2013 ; Le Cozannet *et al.*, 2016). Contrairement aux méthodes déterministes qui prédisent une seule position du trait de côte pour chaque échéance de temps, cette approche présente des projections probabilistes de l'évolution du trait de côte. Au-delà de 2050, ces projections sont conditionnées à des émissions de gaz à effets de serre. Cette approche suppose que le principe de Bruun est vérifié. Elle permet de communiquer une première estimation de l'incertitude de l'évolution du trait de côte aux acteurs impliqués dans la gestion du trait de côte. Cette utilisation de la loi de Bruun en mode probabiliste serait immédiatement mobilisable pour appuyer la réalisation de projections du trait de côte.

#### 4.4.2. Exemple d'application : loi de Bruun en mode probabiliste sur la côte aquitaine (site du Truc Vert)

À titre d'exemple, à l'occasion du projet d'accompagnement de l'Observatoire de la côte Aquitaine pour l'Adaptation, l'évolution du trait de côte a été estimée en sommant les contributions suivantes :

$$L_t = L_{t_0} + T_{\text{multidécennal}} + L_{\text{interannuel}} + (\Delta S_{\text{absolu}} + \Delta S_{\text{mvt sol}})/\tan(\alpha) \quad (2)$$

Où :

- $L_t$  et  $L_{t_0}$  sont les positions du trait de côte, telle qu'elles peuvent être observées aux temps  $t_0$  et  $t$ ; elles s'expriment en m ;
- $T_{\text{multidécennal}}$  est la tendance multidécennale d'évolution du trait de côte ; elle correspond au 100.Tx dans la nomenclature des PPRL; elle s'exprime en m ;
- $L_{\text{interannuel}}$  est la variabilité saisonnière à interannuelle de la position du trait de côte. Il est pris partiellement en compte dans les PPRLi à travers le  $L_{\text{max}}$ ; elle s'exprime en m ;
- $\Delta S/\tan(\alpha)$  est l'effet de Bruun, quotient des variations du niveau de la mer entre  $t_0$  et  $t$  :  $\Delta S = \Delta S_{\text{absolu}} + \Delta S_{\text{mvt sol}}$  et de la pente de Bruun  $\tan(\alpha)$ . Les variations du niveau de la mer, dans un référentiel terrestre, sont elles-mêmes la somme des variations du niveau de la mer absolues (dans un référentiel géocentrique) et des mouvements verticaux du sol.

Dans l'application de la loi de Bruun en mode probabiliste, chacune des contributions à l'évolution du trait de côte est considérée comme une variable aléatoire incertaine (Illustration 29). Pour éviter des choix arbitraires lors de la sélection de la forme exacte de chacune des distributions de probabilité, il est possible d'utiliser le principe d'entropie maximum (Mishra, 2002). Ce principe conduit par exemple à sélectionner une distribution uniforme si seules les bornes de la variable aléatoire sont connues.

Variable aléatoire	Forme de la distribution	Paramètres de la distribution
$T_{\text{multidécennal}} (Tx)$	Gaussienne	Écart type : 0.5 m/an
$L_{\text{interannuel}}$	Gaussienne	Écart type : 10 m
$\Delta S_{\text{absolu}}$	Non paramétrique	Distributions de Kopp <i>et al.</i> (2014) à La Rochelle <sup>9</sup> .
$\Delta S_{\text{mvt sol}}$	Gaussienne	Écart type : 1mm/an
$\tan(\alpha)$	Uniforme	Entre 1.2 % et 1.5 %

Illustration 29 : Exemple de choix de paramètres incertains intégrables dans l'équation d'évolution du trait de côte (2).

Les choix des paramètres de la distribution de l'illustration 29 sont basés sur des observations de la côte aquitaine et sont représentatifs de plages sableuses soumises à un régime de vagues énergétiques, situées loin d'un estuaire et stables à l'échelle de plusieurs décennies

<sup>9</sup> Dans ces projections, les effets de la subsidence estimés à Kopp *et al.* (2014) à partir de l'analyse de la série marégraphique ont été retirés. En effet, il ne sont pas confirmés par les mesures GPS de La Rochelle ([www.sonel.org](http://www.sonel.org))

(exemple : côte aquitaine dans le secteur de la plage du Truc Vert). À titre d'exemple, le Tx proposé pour l'application ci-dessous est supposé suivre une distribution gaussienne de moyenne nulle et d'écart type 0.5 m/an (site stable aux erreurs gaussiennes près).

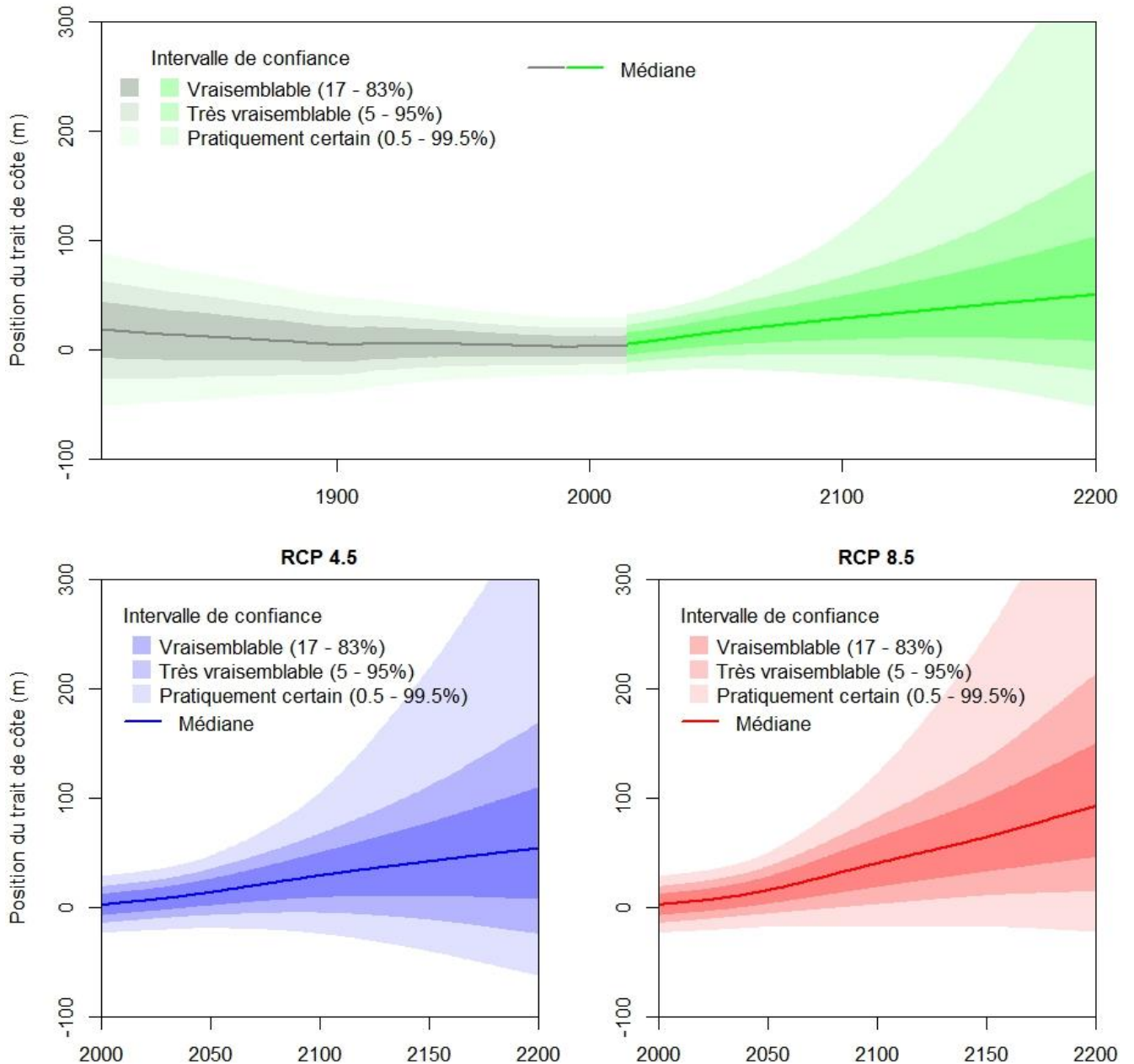
L'illustration 30 présente les projections de recul du trait de côte obtenues lorsque l'équation de l'évolution du trait de côte (équation 2) est utilisée avec les variables aléatoires de l'illustration 29. Elle présente également une simulation rétrospective des positions passées du trait de côte, qui permettent de vérifier le réalisme des paramètres choisis dans l'illustration 29. Pour cet exemple, le trait de côte recule quel que soit le scénario de changement climatique entre 2000 et jusqu'à 2200.

A propos des scénarios d'élévation du niveau de la mer mobilisés pour ce travail :

- en première approximation, les projections de niveau de la mer associées au scénario RCP 2.6 (faible émissions de gaz à effets de serre) correspondent approximativement aux objectifs de l'accord de Paris et celles du RCP 4.5 peuvent être assimilées à l'élévation du niveau de la mer qui correspondrait aux engagements des états ;
- les projections de niveau de la mer associées au scénario RCP 8.5 correspondent à la poursuite des émissions de gaz à effet de serre actuelles. Ce scénario reste réaliste dans la mesure où l'essentiel des mesures de réduction des émissions de gaz à effets de serre qui permettraient d'atteindre les objectifs de l'Accord de Paris ne sont actuellement ni mises en place au niveau international (Rockström *et al.*, 2017), ni au niveau national (MEEM, 2017).

L'illustration 30 présente les projections de trait de côte pour le site d'étude en fonction des 3 scénarios du GIEC. Pour l'utilisation de la loi de Bruun, elle montre que les projections pour les différents scénarios divergent dès 2100.

Cette question du choix d'un scénario RCP et de projections de niveau de la mer associées est un argument pour confirmer l'intérêt d'étudier différents scénarios d'évolution du niveau de la mer.



*Illustration 30 : Simulations rétrospectives et projections d'évolution du trait de côte entre 1807 et 2200, selon le schéma de modélisation utilisant la loi de Bruun en mode probabiliste et combinant effets de l'élévation du niveau de la mer (loi de Bruun) et variabilité naturelle de l'évolution du trait de côte (modèle empirique), sur un site défini par les paramètres de l'illustration 29.*

*Note : La propagation des incertitudes des paramètres à travers l'équation (2) est effectuée par une méthode de quasi-Monte Carlo (10 000 simulations). Dans ce cadre probabiliste, les intervalles de confiance vraisemblables (66 % et plus), extrêmement vraisemblables (90 % et plus) et pratiquement certains (99 % et plus) sont identifiés en sélectionnant les simulations incluses dans les intervalles indiqués en légende dans la figure.*

#### 4.4.3. Exemple d'application : émulation du modèle de Ranasinghe *et al.* (2012) sur la côte aquitaine (site du Truc Vert)

À titre d'exemple, la Figure 4 présente les résultats de l'émulation du modèle de Ranasinghe *et al.* (2012) pour des pentes de zones intertidales variant de 2 % à 4 % (valeurs représentatives du site du Truc Vert). Hormis les pentes de plages, tous les autres paramètres d'entrée de l'équation 2 sont ceux présentés dans l'illustration 29. L'illustration 31 montre que les modélisations reposant sur le modèle de Ranasinghe *et al.* (2012) seront peu sensibles à l'élévation du niveau de la mer. Néanmoins, ces modélisations anticipent le fait qu'un site actuellement considéré comme stable puisse basculer vers un régime d'érosion dans les prochaines décennies.

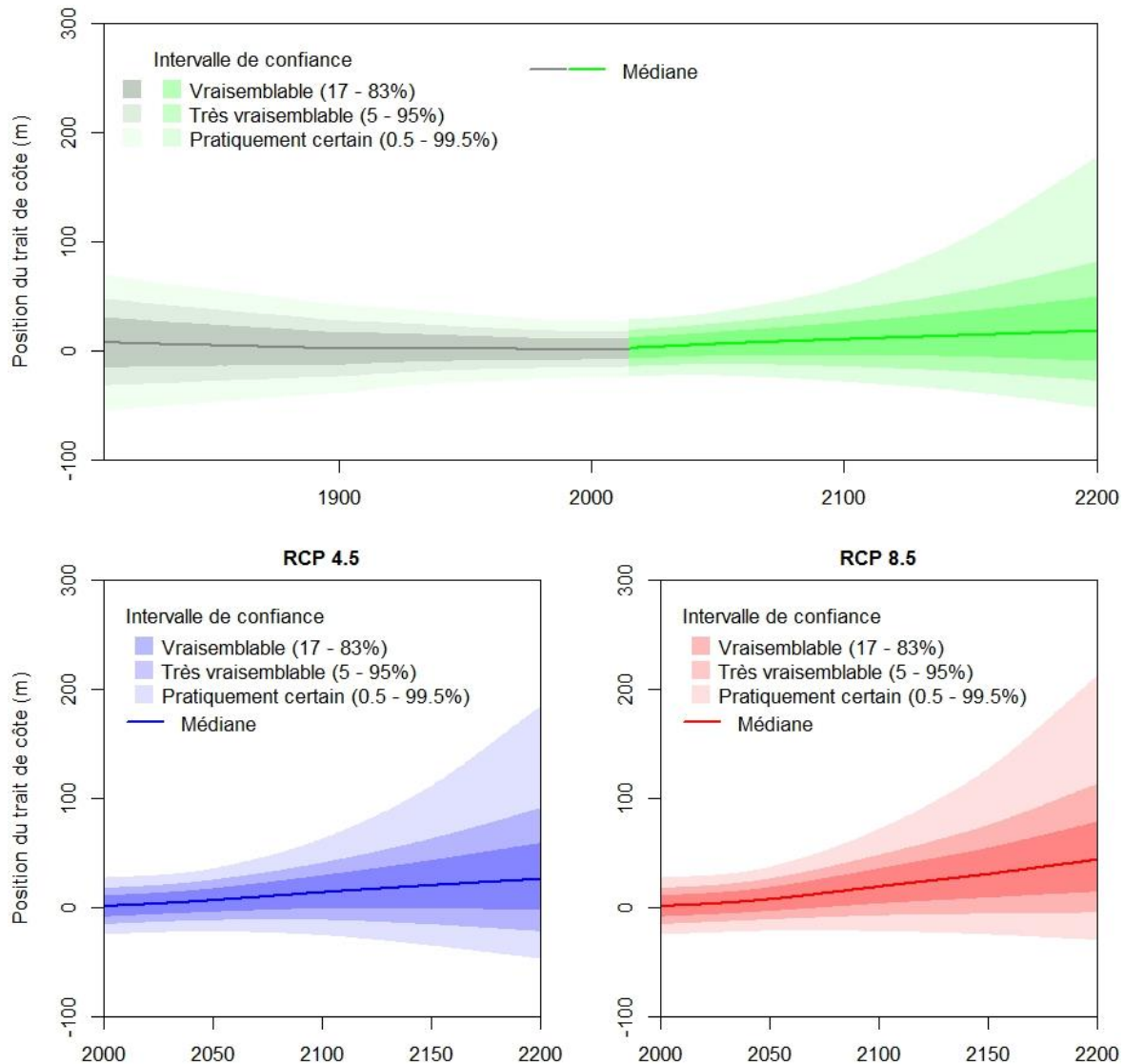


Illustration 31 : Simulations rétrospectives et projections d'évolution du trait de côte selon le schéma de modélisation utilisant le modèle émulé de Ranasinghe *et al.* (2012) en mode probabiliste et combinant effets de l'élévation du niveau de la mer (Ranasinghe *et al.*, 2012) et variabilité naturelle de l'évolution du trait de côte (modèle empirique), sur un site défini par les paramètres de l'illustration 29.

Note : La propagation des incertitudes des paramètres à travers l'équation (2) est effectuée par une méthode de quasi-monte Carlo (10 000 simulations). Les pentes des plages intertidales considérées sont de 2 à 4 %. Dans ce cadre probabiliste, les intervalles de confiance vraisemblables (66 % et plus), extrêmement vraisemblables (90 % et plus) et pratiquement certains (99 % et plus) sont identifiés en sélectionnant les simulations incluses dans les intervalles indiqués en légende dans la figure.

#### 4.4.4. Prise en compte de modèles multiples

En comparant les Illustration 30 et Illustration 31, il est possible d'apprécier l'incertitude induite par le choix d'un modèle d'impact (Bruun ou Ranasinghe *et al.*, 2012) sur les projections de la position du trait de côte dans le cas de la plage du Truc Vert (Aquitaine). Ces incertitudes sont importantes puisque l'effet du niveau de la mer est en moyenne 5 fois plus important lorsque l'on utilise la loi de Bruun par rapport à un résultat fondé sur Ranasinghe *et al.* (2012). Cependant, il convient de relativiser le poids de ces incertitudes liées au choix d'un modèle d'impact : dans le cadre de l'étude de la plage du Truc Vert, une analyse globale de sensibilité montre que l'incertitude liée au choix d'un modèle d'impact a un effet deux fois moindre sur la position du trait de côte que l'incertitude sur l'élévation du niveau de la mer. Cependant, nous recommandons de restituer aussi cette incertitude du choix d'un modèle d'impact aux acteurs impliqués dans la gestion du trait de côte.

### 4.5. RESSOURCES MOBILISABLES ET RECOMMANDATIONS

Les méthodes mobilisables pour le calcul des taux d'évolution du trait de côte sableux traités dans ce rapport concernent deux aspects : (a) l'analyse des taux d'évolution passés et (b) la modélisation des impacts de l'élévation du niveau de la mer.

#### - (a) Analyse des taux d'évolution passés

Les travaux ont porté sur un inventaire des nouvelles méthodes numériques d'interpolation, de filtrage et de classification, permettant de traiter simultanément les questions de non-linéarités temporelles et d'hétérogénéités spatiales de l'évolution du trait de côte. Ces méthodes requièrent des données d'évolution du trait de côte longues, pérennes et fréquentes, qui ne sont pas toujours disponibles en pratique. Aussi, l'utilisation de ce type de méthode ne peut pas être systématique.

La prise en compte de la variabilité saisonnière, interannuelle, multi-décennale de l'évolution du trait de côte reste indispensable et nécessite un socle de connaissances fourni, et une phase préalable d'analyse des processus à l'œuvre.

Malgré l'extension continue des programmes de surveillance saisonniers à pluriannuels et pluri-décennaux, la compréhension des principaux facteurs d'évolution du trait de côte reste un enjeu de recherche, en particulier sur des échelles de temps pertinentes pour la gestion littorale.

**Recommandation** : Parmi l'inventaire des méthodes d'analyse des taux d'évolution passée, nous recommandons de tester la mise en œuvre de nouvelles approches de traitement des données « trait de côte » pour évaluer concrètement leur intérêt et les développements restant pour les rendre opérationnels.

#### - (b) Modélisation des impacts de l'élévation du niveau de la mer

Deux modèles d'impact de l'évolution du trait de côte ont été présentés dans cette étude : la loi de Bruun et le modèle de Ranasinghe. Ces modèles à complexité réduite ont été testés sur une plage sableuse de la côte Aquitaine. Les résultats obtenus montrent qu'ils peuvent être approchés par la formule  $(\Delta S_{\text{niveau de la mer}}) / \tan(\alpha)$  avec  $\Delta S_{\text{niveau de la mer}}$  l'élévation du niveau de la mer et  $\tan(\alpha)$  la pente de la plage. Selon les auteurs, la pente de la plage n'est pas estimée sur la même section du profil de la plage. Ceci explique les différences entre les différentes estimations.

Les incertitudes et la variabilité du système étudié étant fortes, ces travaux montrent l'intérêt de prendre en considération les incertitudes affectant chaque paramètre pris en compte, et de les intégrer dans une approche probabiliste. L'intérêt d'utiliser plusieurs modèles d'impact est également discuté.

**Recommandations** : Pour la réalisation de projection de recul du trait de côte intégrant l'effet de la montée du niveau de la mer, nous recommandons de tester une approche probabiliste, qui prenne en compte l'ensemble des incertitudes déterminées pour les différents paramètres. L'utilisation de plusieurs modèles d'impact de l'élévation du niveau de la mer est également recommandée, dans la mesure du possible, afin de favoriser la discussion des différents résultats obtenus.



## 5. Proposition de méthode

Ce chapitre présente une proposition de méthode pour la caractérisation de l'aléa "recul du trait de côte" pour les côtes sableuses permettant la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer. Cette proposition est basée sur les recherches réalisées par Le Cozannet et al. (2019) dans le cadre des travaux de l'Observatoire de la Côte Aquitaine (voir partie 4.4.2 et 4.4.3) et plus généralement sur l'inventaire des nouvelles recherches mobilisables (chapitre 4). Pour des questions de compatibilité avec les études récentes menées dans le cadre des politiques publiques (présentées au chapitre 2), cette partie reprend pour partie le formalisme méthodologique du guide PPRL (DGPR, 2014).

### 5.1. NOUVELLE APPROCHE PROPOSEE

#### 5.1.1. Proposition d'une équation de projection de la position du trait de côte

Sur la base de l'équation utilisée pour les PPRL (DGPR, 2014), une nouvelle équation complétée est proposée pour projeter la position future du trait de côte et évaluer la largeur de la zone d'aléa recul du trait de côte dans le cas des côtes basses meubles. Cette équation s'écrit :

$$L_r = L_{r0} + n.Tx + Lmax + Lvar + Ecc \quad (3)$$

Avec :

- $L_r$  : la position du trait de côte, au bout de  $n$  années, prenant en compte les effets du changement climatique ; elle s'exprime en m ;
- $L_{r0}$  : la position du trait de côte de l'année de référence, choisie en cohérence avec la période de référence des scénarios d'élévation du niveau de la mer (cf. chapitre 2) ; elle s'exprime en m ;
- $Tx$  : le taux de recul moyen annuel ; il s'exprime en m/an ;
- $n$  : le nombre d'années séparant l'année de référence choisie ( $t_0$ ) de l'échéance choisie pour la projection ;
- $Lmax$  : la valeur du recul du trait de côte consécutif à un événement tempétueux majeur ; il s'exprime en m ;
- $Lvar$  : la valeur de recul ou d'avancée du trait de côte induite par les effets saisonniers, interannuels et multi-décennaux, s'ils ne sont pas pris en compte correctement par le paramètre  $Tx$  ; il s'exprime en m ;
- $Ecc$  : l'effet du changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer sur l'évolution du trait de côte à l'échéance choisie ; il s'exprime en m.

Il faut noter que l'approche méthodologique proposée dans ce rapport implique un travail de détermination des différents termes de l'équation (3) et des incertitudes associées. Cette approche globale est nécessaire pour mettre en œuvre les méthodes probabilistes plus spécifiquement dédiées aux effets de la montée du niveau de la mer (voir parties 4.4.2, 4.4.3).

### **5.1.2. Proposition d'une méthode complétée pour la caractérisation de l'aléa « recul du trait de côte » prenant en compte la montée du niveau de la mer**

La méthode permettant d'estimer chacun des termes de l'équation (3) et les incertitudes associées s'organise en 3 étapes (Illustration 32) :

- la constitution d'un socle de connaissances ;
- l'analyse des évolutions passées du trait de côte ;
- la réalisation de projections futures de l'évolution du trait de côte.

Les sections suivantes examinent chacune de ces étapes. Elles font référence aux recommandations déjà formulées dans le guide méthodologique PPRL (DGPR 2014), aux pratiques actuelles (chapitre 2), et présentent comment les nouvelles approches mobilisables, identifiées dans les chapitres 3 et 4, peuvent être mises en œuvre pour évaluer l'aléa recul du trait de côte.

## **5.2. SOCLE DE CONNAISSANCE**

La première phase de travail préconisée dans le guide DGPR (2014), concerne l'analyse générale du fonctionnement du littoral. Les éléments d'information à collecter pour établir ce socle de connaissances sont détaillés dans le guide et dans le cahier technique (CEREMA, 2015).

Pour la prise en compte du changement climatique dans l'aléa de recul du trait de côte, il apparaît important d'inclure des sujets complémentaires dans le socle de connaissance défini lors de la première phase de travail :

- les scénarios de changement climatique et d'élévation du niveau de la mer ;
- l'évolution du niveau marin passé ;
- le recueil des informations disponibles sur les mouvements verticaux du sol ;
- le cadre de description des incertitudes qui seront utilisées.

### **5.2.1. Analyse du fonctionnement général du littoral**

Dans la documentation technique disponible actuellement (DGPR, 2014 ; CEREMA, 2015), l'analyse du fonctionnement du littoral concerne essentiellement :

- le cadre géomorphologique ;
- les conditions climatiques, météorologiques et hydrodynamiques ;
- le fonctionnement hydro-sédimentaire du littoral ;
- les ouvrages de protection contre les aléas littoraux.

Ces informations sont collectées pour permettre de comprendre le fonctionnement actuel du littoral, mais également pour élaborer une approche historique des aléas rencontrés sur le secteur d'étude. Pour l'aléa de recul du trait de côte, l'approche historique permet de recenser la connaissance sur l'évolution de la morphologie littorale, les événements historiques, la zone d'étude, l'évolution de l'occupation humaine et l'implantation d'ouvrages de défense.

Le Guide PPRL (2014) précise un certain nombre de résultats attendus de cette phase 1, notamment sous forme de cartes de synthèse.

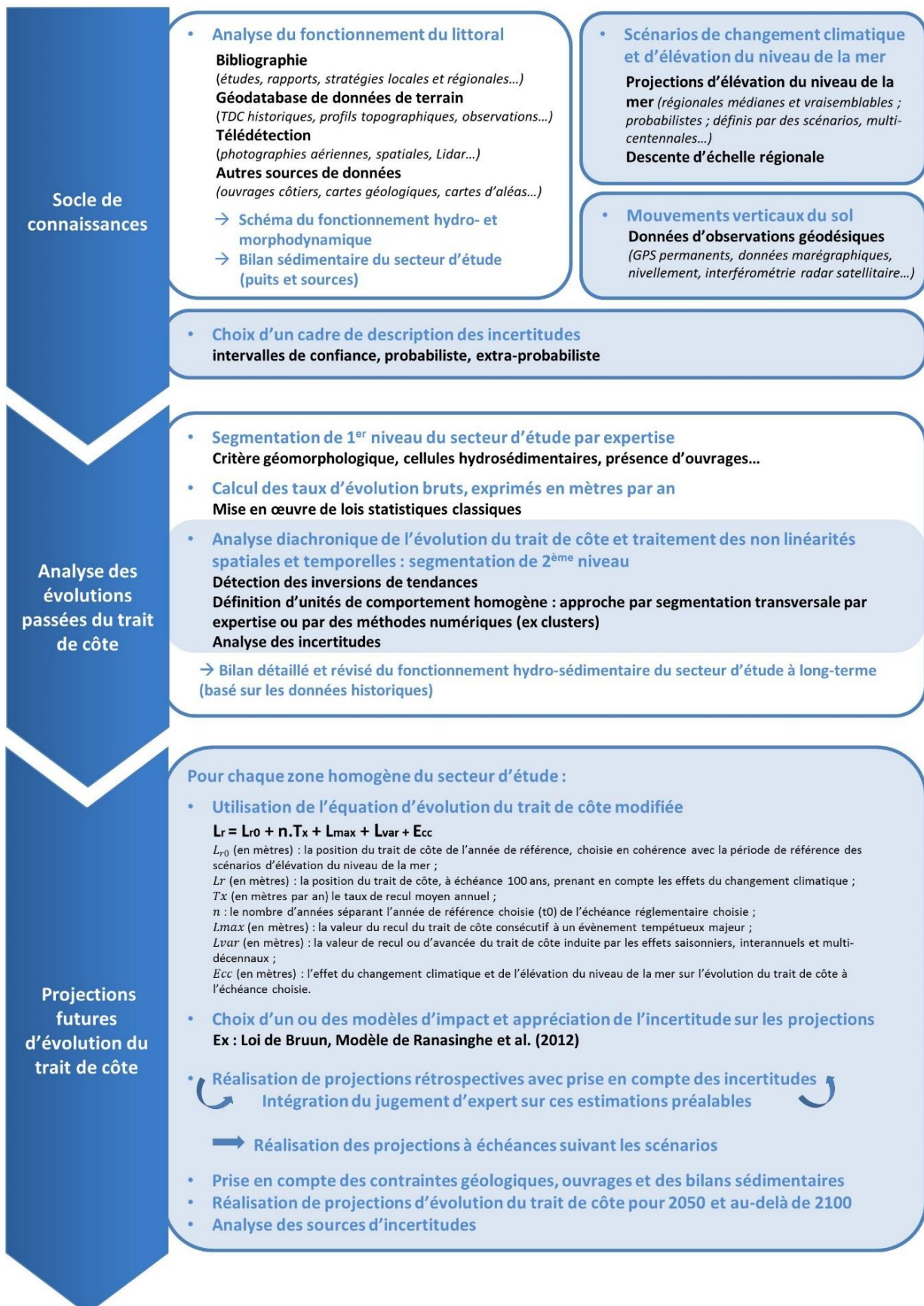


Illustration 32 : Méthode complétée pour la caractérisation de l'aléa « recul du trait de côte » prenant en compte l'effet de la montée du niveau de la mer sur une côte sableuse. Les zones ombrées indiquent les évolutions méthodologiques proposées par rapport au guide PPRL (DGPR, 2014).

Pour les côtes basses sableuses, il convient également de prendre en compte :

- l'analyse des transits sédimentaires en lien avec les facteurs de forçage ;
- la synthèse de la dynamique sédimentaire, y compris l'impact des ouvrages à l'échelle de la cellule sédimentaire et des cellules adjacentes ;
- l'identification des principaux facteurs à l'origine de l'évolution du trait de côte.

Sur ces points particuliers décrivant le fonctionnement des littoraux sableux, nous préconisons l'élaboration de schémas de fonctionnement hydro-sédimentaires et de bilans sédimentaires à l'échelle des cellules sédimentaires étudiées, en plus de cartes de synthèses.

### **5.2.2. Scénarios de changement climatique et d'élévation du niveau de la mer**

Les éléments de connaissance mobilisables sur cette question sont détaillés dans la partie 2 de ce rapport. Les différentes ressources et approches existantes soulignent la possibilité de prendre en compte les différentes contributions de la montée du niveau de la mer pour décrire des probabilités d'évolution à l'échelle régionale. Les travaux de recherche actuels améliorent en permanence les connaissances dans ce domaine et il convient de vérifier que les données régionales d'évolution du niveau de la mer sont à jour et correspondent aux besoins de l'étude des aléas. Cette phase requiert donc une mise à jour périodique des travaux de la communauté scientifique menés sur la question de l'élévation du niveau de la mer pour appuyer les politiques d'adaptation au changement climatique. Elle consiste à justifier le choix d'un ou plusieurs scénarios d'élévation du niveau de la mer.

### **5.2.3. Données sur les mouvements verticaux du sol**

En complément des informations sur l'évolution régionale du niveau de la mer, il convient également de faire l'inventaire des données et des informations existantes décrivant les mouvements verticaux du sol à l'échelle locale ou régionale. Ce point est présenté dans le chapitre 3 du rapport.

### **5.2.4. Évolution du niveau marin passé**

L'évolution du niveau de la mer passée est une donnée essentielle pour réaliser des projections rétrospectives du trait de côte. Pour constituer ce jeu de données, il est possible d'utiliser des données issues de marégraphes situés à proximité du site d'étude. Dans les cas où ces données ne sont pas suffisamment longues (moins d'une cinquantaine d'années) ou lorsque le marégraphe n'est pas représentatif du site d'étude, une reconstruction du niveau de la mer pourra être effectuée. Pour les côtes métropolitaines, les reconstructions portant sur les 50 dernières années sont bien contraintes par les séries marégraphiques. Les données issues des mouvements verticaux du sol au niveau du ou des marégraphes et au niveau du site d'étude seront alors utilisées pour estimer l'élévation relative du niveau marin au niveau du site d'étude.

### **5.2.5. Estimation des incertitudes dans le cadre d'une étude de l'aléa de recul du trait de côte**

#### ***a) Évolution méthodologique proposée***

Le guide PPRL (2014) recommande de déterminer les incertitudes liées aux données initialement utilisées et aux extrapolations réalisées, mais ne préconise pas de méthode particulière. Ceci a conduit les opérateurs techniques en charge de la réalisation des projections d'évolution du trait de côte à ne considérer les incertitudes que comme la dernière

étape de l'étude. Au contraire, pour décrire de manière cohérente les incertitudes affectant les différents processus à l'origine de la mobilité du trait de côte, il est nécessaire de définir le cadre de gestion des incertitudes en amont (Stephens *et al.*, 2017).

La méthode proposée consiste à définir un cadre de gestion des incertitudes en amont de l'étude proprement dite, dès la phase de constitution d'un socle de connaissances.

### **b) Critères de choix d'un cadre de gestion des incertitudes**

La constitution du socle de connaissances permet de choisir un cadre de gestion des incertitudes approprié pour la réalisation de projections du trait de côte. Les méthodes de gestion des incertitudes comprennent des méthodes probabilistes et des méthodes extra-probabilistes. Ces dernières peuvent reposer sur des estimations médianes, vraisemblables ou au contraire explorer des scénarios maximisant (chapitre 4).

La décision portant sur le choix d'un cadre d'analyse des incertitudes pourra être effectuée en fonction des critères de quantités, qualité et pertinence des données disponibles afin de permettre de représenter les différents processus par des fonctions de probabilité. En l'absence de telles informations, il est recommandé de privilégier un cadre de description des incertitudes extra-probabiliste, explorant notamment des scénarios maximisant (scénarios d'élévation du niveau marin rapide et loi d'impact sur le trait de côte qui maximisent les effets) ;

Le choix du cadre de gestion des incertitudes dépend aussi de l'utilisation qui sera faite de l'étude et/ou du degré d'aversion au risque des commanditaires et des acteurs locaux (Hinkel *et al.*, 2019).

- Dans le cas d'acteurs pouvant accepter la possibilité de pertes de terres plus importantes que celles envisagées dans l'étude d'aléa (faible aversion au risque), le cadre de description des incertitudes peut reposer sur des projections médianes, vraisemblables ou sur un cadre probabiliste ;
- En revanche, dans le cas d'acteurs ayant une forte aversion au risque, la délimitation des zones considérées pourra être basée sur des méthodes extraprobabilistes. En explorant des scénarios maximisant, ces méthodes peuvent produire des projections de recul du trait de côte extrêmes, même si elles sont considérées comme très peu probables au moment de l'étude.

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 et en justifiant, de manière transparente, toute réduction des incertitudes justifiée par l'expertise (Oppenheimer *et al.*, 2016).

## **5.3. ANALYSE DES ÉVOLUTIONS PASSÉES DU TRAIT DE COTE**

### **5.3.1. Cadre général et objectifs de l'analyse des évolutions passées**

Sur les côtes meubles, le trait de côte représente une entité particulièrement mobile à différentes échelles spatiales et temporelles. Ce caractère confère une grande complexité à l'analyse de l'évolution du trait de côte. Son étude doit donc être réalisée à différentes échelles, permettant de résoudre les non-linéarités temporelles mais aussi les hétérogénéités spatiales du trait de côte.

Comme rappelé dans le guide méthodologique PPRL de 1997 (Garry *et al.*, 1997), l'observation des tendances passées ne permet pas d'évaluer directement le Tx. En effet, la seule variable observable est le  $L_r$ , c'est-à-dire la position du trait de côte. Or, le niveau marin

s'est élevé de 20 cm en moyenne globale depuis 1870 (Church *et al.*, 2013), ce qui correspond à un recul du trait de côte de 20 m dans les conditions d'application de la loi de Bruun les plus communément retenues (Hinkel *et al.*, 2014).

Ainsi, l'ensemble de l'analyse des évolutions passées du trait de côte consiste à préparer le jeu de données passées afin de permettre l'évaluation des différents termes de l'équation (3). En pratique, lorsque les informations sur les événements historiques sont suffisantes, seul le  $L_{max}$  peut être directement identifié, et le calcul exact de chacun des autres termes présuppose le choix d'un modèle d'impact de l'élévation du niveau de la mer (loi de Bruun ; modèle de Ranasinghe *et al.*, 2012 ; ou autre).

### 5.3.2. Segmentation de premier niveau

La première phase recommandée repose sur une première segmentation du secteur d'étude basée sur l'expertise acquise lors de la phase de recueil des connaissances et d'analyse du fonctionnement du littoral. Cette segmentation de 1<sup>er</sup> niveau peut être définie en se basant sur les grandes cellules hydro-sédimentaires ou à partir de la présence d'ouvrages de défense côtière. Selon l'étendue du secteur d'étude il s'agit ici de pré-sectoriser de grands ensembles, ou portions distinctes du littoral, afin d'adopter pour chacun.es une approche adaptée pour la quantification et l'analyse des tendances d'évolution du trait de côte.

### 5.3.3. Calcul des taux d'évolution bruts

La définition de taux d'évolution annuels bruts, exprimés en mètres par an, constitue l'étape clé dans le choix des valeurs de référence définie dans le Guide PPRL 2014. Cette analyse des données historiques passe par la mise en œuvre de méthodes statistiques pour le calcul (éventuellement automatisé) des tendances passées, telles que préconisées dans le guide méthodologique de 2014.

### 5.3.4. Analyse diachronique<sup>10</sup> de l'évolution du trait de côte

Si la phase 1 a permis de collecter des données de haute résolution spatiale et temporelle, nous préconisons de traiter en détail les non-linéarités.

L'analyse diachronique des taux bruts d'évolution du trait de côte nécessite donc une segmentation dite de 2<sup>ème</sup> niveau, étudiant :

- la détection des inversions de tendances ;
- la définition d'unités de comportement homogène.

L'objectif de cette seconde phase d'analyse des tendances historiques est double. Elle permet d'affiner des zones homogènes d'évolution du trait de côte, à la fois spatialement, le long du littoral, mais aussi à l'égard du comportement passé de ces portions de côte (évolution multi décennale à caractère constant, ou au contraire avec une forte variabilité, tendance à l'accélération ou décélération...).

Dans ce contexte, plusieurs approches citées dans le chapitre 4 sont mobilisables et mériteraient d'être testées pour proposer une analyse approfondie des taux d'évolution annuels. L'approche par segmentation transversale, ou segmentation en clusters, se distingue

---

<sup>10</sup> Noter que le préfixe grec διά signifie « à travers ». Une analyse « diachronique » suppose donc généralement de disposer de nombreuses observations, idéalement bien réparties dans le temps. Au contraire, une analyse fondée sur deux images séparées de plusieurs dizaines d'années permet au mieux de quantifier des pertes ou des gains de surface.

par une analyse multicritères menée à long-terme sur l'ensemble des grands ensembles précédemment identifiés. Elle permet de déterminer la variable  $L_{var}$  de la formule proposée (3), correspondant à la valeur de recul ou d'avancée du trait de côte induite par les effets saisonniers, interannuels et multi-décennaux. Cependant, elle n'est applicable que dans les cas où de nombreuses données sont disponibles.

Cette phase de l'analyse permet idéalement (sous réserve de l'existence de données) la détermination du paramètre  $L_{max}$ . Cette phase n'est pas détaillée dans ce rapport : les méthodes proposées sont décrites dans le guide PPRL (2014) et le rapport BRGM/RP-63157-FR (Desmazes *et al.*, 2014).

### 5.3.5. Bilan détaillé et révisé du fonctionnement hydro-sédimentaire

Il est proposé d'utiliser les résultats de cette deuxième phase d'analyse détaillée (segmentation en clusters, variabilité temporelle,  $L_{max}$ ) afin de mettre à jour le bilan détaillé du fonctionnement hydro-sédimentaire du secteur d'étude à long-terme.

## 5.4. PROJECTIONS FUTURES D'ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

À l'issue de la seconde phase d'analyse des traits de côte passés, les différentes zones homogènes ont été définies finement et sont utilisées pour l'application des projections d'évolution du trait de côte issues de la formule (3).

Pour la détermination de la contribution de l'élévation du niveau de la mer au recul du trait de côte (terme  $E_{cc}$  de l'équation (3)), trois modèles d'impacts sont proposés pour les plages sableuses dominées par les vagues :

- la loi de Bruun (Chapitre 1) ;
- l'émulation du modèle de Ranasinghe *et al.* (2012), pour les secteurs sensibles à l'effet des vagues sur le système dunaire (Chapitre 4) ;
- l'ensemble des modèles prenant la forme  $\Delta S_{niveau\ de\ la\ mer} / \tan(\alpha)$  avec  $\Delta S_{niveau\ de\ la\ mer}$  l'élévation du niveau de la mer et  $\tan(\alpha)$  la pente de la plage, avec des valeurs de  $\tan(\alpha)$  incluses dans les intervalles recommandés dans le chapitre 4.

### 5.4.1. Réalisation de projections rétrospectives

Lorsque le ou les modèles d'impacts sont choisis, une phase de travail préalable consiste à simuler les évolutions passées (projections rétrospectives voir chapitre 4). Ces projections rétrospectives utilisent les données de niveau marin passées acquises lors de la phase de constitution du socle de connaissances, et les combine avec l'un des modèles d'impact de l'évolution du niveau de la mer. Ces premiers résultats sont confrontés au dire d'expert. Idéalement, un processus d'inversion probabiliste est utilisé pour réduire les incertitudes affectées *a priori* aux différentes variables de l'équation (3) (Oppenheimer *et al.*, 2016). Cette intégration du jugement d'expert peut nécessiter plusieurs allers-retours avant validation de l'approche choisie.

### 5.4.2. Réalisation des projections à échéance 2100

Il s'agit de mettre en œuvre le ou les modèles validés pour le ou les différents scénarios d'élévation du niveau de la mer définis lors de la phase 1. Les résultats prennent la forme de valeurs d'évolution du trait de côte, présentés soit sous la forme d'intervalles de confiance, soit

sous la forme de fonctions de probabilité ou sous d'autres formes mathématiques (exemple : distribution de possibilités ou *probability-boxes* ; Le Cozannet *et al.*, 2017).

#### **5.4.3. Prise en compte des contraintes et caractéristiques locales du site d'étude**

Ces tendances d'évolutions futures doivent être confrontés aux schémas de fonctionnement morphodynamique et aux bilans sédimentaires du secteur d'étude pour déterminer si des contraintes ou des caractéristiques locales (non prises en compte par les modèles) peuvent moduler localement l'évolution du trait de côte dans le contexte de changement climatique. Il s'agit de considérer les effets liés aux ouvrages de défense, à la présence d'une discontinuité géologique, à un changement notable dans le stock sédimentaire régional ou local. Ces effets peuvent être évalués à dire d'expert ou par des études complémentaires dédiées, tel que suggéré dans le guide méthodologique 2014.

#### **5.4.4. Réalisation de projections à échéance 2050 et au-delà de 2100**

Comme suggéré dès le premier guide méthodologique PPRL (Garry *et al.*, 1997), nous recommandons de réaliser des projections de recul du trait de côte au-delà de 2100. Les données présentées dans le chapitre 3 permettent de réaliser des projections probabilistes de recul du trait de côte jusqu'à 2200. Au-delà, une approche par scénarios, fondée sur les données de Clark *et al.* (2016) est applicable.

En complément de l'échéance principale à 100 ans, le guide PPRL (DGPR, 2014) propose de préciser les positions du trait de côte à échéance 20 ans et 50 ans, à titre informatif.

Dans le cadre de la proposition de méthode complétée proposée dans ce rapport, il est également envisageable d'intégrer un scénario de recul du trait de côte à l'échéance 2050. En effet, cet horizon temporel est cohérent avec celui de la mise en œuvre de l'adaptation (Hinkel *et al.*, 2019).

Intégrer ces échéances de temps complémentaires dans l'étude de l'aléa « recul du trait de côte » permet d'éviter l'écueil d'une vision statique du trait de côte en 2100 ou à 100 ans, et de restituer la dynamique temporelle globale des phénomènes aux acteurs locaux.

#### **5.4.5. Analyse des sources d'incertitudes**

Chacun des paramètres et des éléments d'analyse de cette méthode, basés ici sur la proposition de formule complétée (voir formule (3), partie 5.1.1) est associé à des incertitudes. Le cadre d'étude de ces incertitudes ayant été défini dès la phase 1 « socle de connaissance », il s'agit ici de proposer une analyse de sensibilité, afin de restituer l'origine des incertitudes des différentes projections d'évolution du trait de côte.

À titre d'exemple, dans le cadre d'une approche probabiliste, une analyse globale de sensibilité sera privilégiée (Le Cozannet *et al.*, 2016).



## 6. Conclusion

Cette étude a proposé une méthode complétée pour la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer dans l'estimation de l'évolution du trait de côte sableux (plages) dans le contexte du changement climatique. Elle présente les travaux de recherche pouvant être transférés vers la sphère des applications opérationnelles de cartographie de l'évolution du trait de côte utiles à la mise en œuvre des politiques publiques.

Une élévation du niveau de la mer globale d'environ 20 cm a été observée depuis 1870. Aujourd'hui, elle atteint 3,4 mm/an environ. Au cours du 21<sup>e</sup> siècle, le niveau de la mer continuera à augmenter : les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre visent à limiter l'ampleur du phénomène (Church *et al.*, 2013). Or, les littoraux bas et meubles sont parmi les plus vulnérables à l'élévation du niveau de la mer, ce qui rend nécessaire de mettre au point des compléments méthodologiques pour prendre en compte le phénomène dans les études d'aléas.

Les résultats et les recommandations de la présente étude sont les suivants :

- Tout d'abord, une revue d'études PPRL portant sur l'aléa « recul du trait de côte » montre que différentes méthodes ont été appliquées pour estimer les taux d'évolution des plages sableuses sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer (Chapitre 2). Des compléments méthodologiques s'avèrent désormais nécessaires justifiant les travaux initiés dans cette étude.
- La prise en compte du changement climatique dans les études d'aléa de recul du trait de côte est essentiellement basée sur l'évaluation de l'impact de la montée du niveau de la mer. Sur la question des projections futures du niveau de la mer, la connaissance scientifique progresse rapidement avec les efforts de la recherche internationale. Différentes équipes de recherche ont produit récemment des résultats mobilisables pour des applications opérationnelles en lien avec les politiques publiques (Chapitre 3). Ces résultats concernent :
  - (a) la variabilité régionale du niveau de la mer ;
  - (b) sa dynamique temporelle, au cours du 21<sup>ème</sup> siècle et pour les siècles suivants ;
  - (c) les mouvements verticaux du sol ;
  - (d) les incertitudes associées.

**Recommandation n°1 :** Au regard des progrès scientifiques et de l'importance de ce paramètre pour l'aléa de recul du trait de côte, nous recommandons de prendre en compte régulièrement l'évolution des connaissances pour construire des scénarios d'élévation du niveau de la mer. Dans le cadre des études de projection d'évolution du trait de côte sur lesquelles les politiques publiques vont s'appuyer, il s'agit d'étudier des scénarios d'élévation du niveau de la mer alternatifs aux scénarios usuels ou réglementaires, puis d'engager, si cela s'avère nécessaire, une révision des scénarios de niveau de la mer préconisés.

- les méthodes mobilisables pour le calcul des taux d'évolution du trait de côte sableux concernent deux aspects (Chapitre 4) :
  - l'analyse des taux d'évolution passés, pour lesquels des recherches ont porté sur l'inventaire de méthodes numériques d'interpolation, de filtrage et de classification, afin de traiter simultanément les questions de non-linéarités temporelles et d'hétérogénéités spatiales de l'évolution du trait de côte,

**Recommandation n°2** : Parmi l'inventaire des méthodes d'analyse des taux d'évolution passée, nous recommandons de tester la mise en œuvre de nouvelles approches de traitement des données « trait de côte » pour évaluer concrètement leur intérêt et les développements restant pour les rendre opérationnelles.

- les modèles d'impacts de l'élévation du niveau de la mer sur le trait de côte sableux : différents modèles existent, mais ceux qui ont été présentés et testés dans cette étude sur une plage de la côte Aquitaine peuvent être approchés par le ratio entre  $\Delta S_{\text{niveau de la mer}}$ , l'élévation du niveau de la mer, et  $\tan(\alpha)$ , la pente de la plage.
- Ce rapport met en évidence les incertitudes pesant sur les scénarios prospectifs d'évolution du trait de côte : ces incertitudes sont non seulement liées à l'élévation du niveau de la mer, mais aussi à d'autres processus côtiers affectant le niveau marin moyen (mouvements verticaux du sol), à la dynamique sédimentaire (effets des vagues et des courants, apports de sédiments (exemple : fleuves, coraux), aux interventions humaines ou aux limites intrinsèques des méthodes permettant d'établir les projections du trait de côte.

**Recommandation n°3** : Pour la réalisation de projections de recul du trait de côte intégrant l'effet de la montée du niveau de la mer, nous recommandons donc de tester une approche qui prenne en compte l'ensemble des incertitudes déterminées pour les différents paramètres (par exemple l'approche probabiliste). Il s'agit de restituer les incertitudes associées aux scénarios prospectifs lors de l'étude de l'aléa « recul du trait de côte », et de détailler l'origine de ces incertitudes (sur les données, les méthodes de projection utilisées, l'évolution du niveau de la mer et ses impacts, sur la variabilité saisonnière à multi-décennale des traits de côte sableux, etc.).

L'utilisation de plusieurs modèles d'impact de l'élévation du niveau de la mer est également recommandée, dans la mesure du possible, afin de favoriser la discussion des différents résultats obtenus.

- Sur la base du guide méthodologique PPRL (DPGR, 2014), une méthode complétée pour permettre la prise en compte de l'élévation du niveau de la mer dans l'évaluation des taux d'évolution du trait de côte passés et futurs est proposée dans ce rapport (Chapitre 5 et Illustration 32). Dans la proposition d'équation de projection future du trait de côte, deux termes nouveaux sont ajoutés : l'un concerne la prise en compte de l'impact du niveau de la mer, l'autre, complémentaire au taux de recul régulier (Tx), fournit -si nécessaire- une valeur de recul ou d'avancée du trait de côte induite par les effets saisonniers, interannuels et multi-décennaux. La mise en œuvre de cette méthode nécessite de définir très tôt le cadre d'incertitudes à appliquer tout le long de l'étude. Le rapport précise aussi les modalités d'intervention de l'expertise du géomorphologue côtier au cours de l'étude.

En termes de perspectives et compte tenu des résultats précédents, les recommandations suivantes sont également formulées :

**Recommandation n°4** : Tester l'applicabilité de la méthode proposée pour la prise en compte de l'effet du niveau de la mer sur deux sites métropolitains ; il s'agit notamment d'examiner les implications de la mise en œuvre d'une méthode probabiliste dans la réalisation de projections futures du trait de côte et de cartographies dans le cadre d'un appui aux politiques publiques.

**Recommandation n°5** : Examiner le cas d'autres littoraux, notamment lagunes, plages coralliennes et falaises peu consolidées.

## 7. Bibliographie

- Anderson T.R., Fletcher C.H., Barbee M.M., Frazer L.N., Romine B.M. (2015) - Doubling of coastal erosion under rising sea level by mid-century in Hawaii. *Natural Hazards*, 78, pp 75-103.
- Anderson T.R., Frazer L.N. (2014) - Toward parsimony in shoreline change prediction (III): B-Splines and noise handling. *Journal of Coastal Research*, 30, 4, pp 729-742.
- Ashton A. D., Walkden M. J., Dickson M. E. (2011) - Equilibrium responses of cliffed coasts to changes in the rate of sea level rise. *Marine Geology*, 284(1), pp 217-229.
- Aubié S., Mallet C., Favennec J., en collaboration avec Hoareau A. (2011) - Caractérisation de l'aléa érosion (2020-2040) de la côte Aquitaine dans le cadre de l'étude stratégique de gestion du trait de côte. Observatoire de la Côte Aquitaine, rapport BRGM/RP-59095-FR, 59 illus., 97 p., 2 ann.
- Bakker A. M., Louchard D., Keller K. (2017) - Sources and implications of deep uncertainties surrounding sea-level projections. *Climatic Change*, 140(3-4), pp 339-347.
- Banno M., Kuriyama Y. (2014) - Prediction of future shoreline change with sea-level rise and wave climate change at Hasaki, Japan. *Coastal Engineering*, 10 p.
- Baudrit C., Dubois D., Guyonnet D. (2006) - Joint propagation and exploitation of probabilistic and possibilistic information in risk assessment. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 14(5), 593-608.
- Ben Abdallah N., Mouhous-Voyneau N., Denoeux T. (2014) - Combining statistical and expert evidence using belief functions: Application to centennial sea level estimation taking into account climate change. *International Journal of Approximate Reasoning*, 55(1), pp 341-354.
- Bernon N., Mallet C. et collaboration de Bulteau T. (2016) - Caractérisation de l'aléa recul du trait de côte sur la commune de Mimizan. Rapport provisoire. BRGM/RP-66122-FR, . 69 p, 33 ill., 9 tab., 6 cartes hors texte.
- Boak E. H., Turner I. L. (2005) - Shoreline definition and detection: a review. *Journal of coastal research*, pp 688-703.
- Brooks S. M., Spencer T. (2012) - Shoreline retreat and sediment release in response to accelerating sea level rise: Measuring and modelling cliffline dynamics on the Suffolk Coast, UK. *Global and Planetary Change*, 80, pp 165-179.
- Brunel C., Sabatier F. (2009) - Potential influence of sea-level rise in controlling shoreline position on the French Mediterranean Coast. *Geomorphology*, 107(1), pp 47-57.
- Bruun P. (1962) - Sea-level rise as a cause of shore erosion. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. *Journal of the Waterways and Harbors Division* 88, pp 117-130.
- Bruun P. (1983) - Review of conditions for uses of the Bruun rule of erosion. *Coastal Engineering*, 7, p. 77-89.

Bulteau T., Baills A., Petitjean L., Garcin M., Palanisamy H., Le Cozannet G. (2015) - Gaining insight into regional coastal changes on La Réunion island through a Bayesian data mining approach. *Geomorphology*, 228, pp 134-146.

Bulteau T. et Garcin M. (2011) - Synthèse des travaux menés sur l'observation de l'évolution du trait de côte. Rapport BRGM/RP-59396-FR. 152 p., 27 fig., 5 tab., 1 ann.

Burningham H., French J. (2017) - Understanding coastal change using shoreline trend analysis supported by cluster-based segmentation. *Geomorphology*, 282, pp 131-149.

Carter R.W.G. (1988) - Coastal Environments; Academic Press: London, UK, p. 609.

Cavalié O., Sladen A., Kelner M. (2015) - Detailed quantification of delta subsidence, compaction and interaction with man-made structures: the case of the NCA airport, France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(9), 1973-1984.

Cazenave A., Dieng H.-B., Meyssignac B., von Schuckmann K., Decharme B., Berthier E. (2014) - The rate of sea-level rise. *Nature Climate Change*, vol. 4, no 5, p. 358–361.

Cazenave A., Le Cozannet G. (2014) - Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2(2), 15-34.

Cazenave A., Llovel W. (2010) - *Contemporary Sea Level Rise, Annual Review of Marine Science*, vol. 2, Annual Reviews, Palo Alto, ISBN 1941-1405978-0-8243-4502-0, p. 145– 173, doi:10.1146/annurev-marine-120308-081105.

Charles, E., Idier, D., Delecluse, P., Déqué, M., Le Cozannet, G. (2012). Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France. *Ocean Dynamics*, 62(6), 831-848.

Chateauminos E., Thirard G., Pedreros R., Longueville F. (2014) - Caractérisation et cartographie des aléas côtiers pour l'élaboration du Plan de Prévention des Risques Littoraux des communes du Nord-Est de la Réunion. Rapport final. BRGM/RP-64088-FR, 69 p et 4 annexes hors-texte.

Church J., Clark P., Cazenave A., Gregory J., Jevrejeva S., Merrifield M., Milne G., Nerem R., Nunn P., Payne A., Pfeffer W., Stammer D., U. A.S. (2013) - *Sea Level Change*, Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1137–1216, doi:10.1017/CBO9781107415324.026.

Church J.A., White N.J. (2006) - A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical research letters*, 33(1).

Church J.A., White N.J. (2011) - Sea-level rise from the late 19th to the early 21<sup>st</sup> century. *Surveys in Geophysics*, vol. 32, no 4-5, doi: 10.1007/s10712-011-9119-1, p. 585–602, ISSN 0169-3298.

Cooper J. A. G. et Pilkey O. H. (2004) - Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change*, 43, p. 157–171.

Cowell P. J., et al. (2003) - The Coastal-Tract (part 2): Applications of Aggregated Modeling of Lower-order Coastal Change. *Journal of Coastal Research*, 19, p. 828–848.

Cramer W., Yohe G., Auffhammer M., Huggel C., Molau U., Silva Dias M., Solow A., Stone D., Tibig L. (2014) - Detection and attribution of observed impacts. *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 979–1037.

Dangendorf S., Marcos M., Müller A., Zorita E., Riva R., Berk K., Jensen J. (2015) - Detecting anthropogenic footprints in sea level rise. *Nature communications*, vol. 6.

Dangendorf S., Marcos M., Wöppelmann G., Conrad C. P., Frederikse T., Riva R. (2017) - Reassessment of 20th century global mean sea level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201616007.

Davidson M.A., Lewis R.P., Turner I.L. (2010) - Forecasting seasonal to multi-year shoreline change. *Coastal Engineering*, 57, pp 620-629.

Davidson M.A., Turner I.L., Splinter K.D. (2013) - Predicting shoreline response to cross-shore processes in a changing wave climate. *Coastal Dynamics*, pp 431-442.

Davidson-Arnott R.G.D. (2005) - Conceptual Model of the Effects of Sea Level Rise on Sandy Coasts. *Journal of Coastal Research*, 21(6), pp 1166-1193.

Dean R.G., Houston J.R. (2016) - Determining shoreline response to sea level rise. *Coastal Engineering*, 114, pp 1-8.

DeConto R.M., Pollard D. (2016) - Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* 2016, 531, pp 591-597.

De La Torre Y., Alami S., Leroy S., Pedreros R. et Druon J. (2012) - Caractérisation et cartographie des aléas côtiers pour l'élaboration du Plan de Prévention des Risques Littoraux de la commune de Saint-Paul à La Réunion. Rapport final. BRGM/RP-61189-FR. 73p. 4 annexes hors-texte.

De Michele M. (2010) – Interférométrie radar sur la Gaudeloupe 2003-2010 (champ géothermique de Bouillante). Rapport BRGM/RP-59247-FR, 23 p., 15 fig.

Desmazes F., Muller H., Garcin M., Belon R., Baudouin V. (2014a) - Méthodologie de détermination du recul maximal des dunes pour les événements extrêmes. Rapport final. BRGM/RP-63157-FR. 131 p., 97 fig., 13 tabl.

Desmazes F., Muller H. et Nicolae Lerma A. (2014) - Méthodologie de détermination du recul maximal des dunes pour les événements extrêmes. Phase 2/A. BRGM/RP-64184-FR. 58 p.

Desmazes F., Muller H., Nicolae Lerma A., Bulteau T. et avec la collaboration de Balouin Y. (2015) - Méthodologie de détermination et d'estimation du recul maximal des dunes lors d'événements extrêmes Phase 2 – Année 2. Rapport final. BRGM/RP-65439-FR. 94 p.

Desmazes F. et la collaboration de Oliveros C. (2017) - Retour d'expérience sur la détermination et la prise en compte de Lmax dans les PPRL (aléa de recul de trait de côte sableux). Rapport final. BRGM/RP-66881-FR, . 86 p., 44 ill., 2 ann.

De Vries H., van de Wal R. S. (2015) - How to interpret expert judgment assessments of 21st century sea-level rise. *Climatic Change*, 130(2), pp 87-100.

DGPR (2011) - Premiers éléments méthodologiques pour l'élaboration des PPRL. Analyse et cartographie des aléas littoraux. 90 p.

DGPR (2014) - Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux. 169p.

DHI (2013) - Détermination de l'aléa de submersion marine intégrant les conséquences du changement climatique en région Nord-Pas de Calais. Étape 2-3-1 : Caractérisation des aléas submersions marines et érosion côtière intégrant des scénarios climatiques de référence - Évolution du trait de côte. Dreal NPC. 59-62. 75 p.

Dias J.M., Lopes C.L., Coelho C., Pereira C., Alves F.L., Sousa L.P., Antunes I.C., Fernandes M. da L., Phillips M.R. (2014) - Influence of mean sea level rise on Ria de Aveiro littoral: adaptation strategies for flooding events and shoreline retreat. In: Green, A.N. and Cooper, J.A.G. (eds.), Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa), *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 70, pp. 320-325, ISSN 0749-0208

Dubois D., Prade H. (1988) - *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty* (New York: Plenum)

EGIS EAU (2016) - Plan de Prévention des Risques Naturels Littoraux, Département du Finistère, PPRN-L 2 (Est-Odet), Phase 2 : Caractérisation des aléas, Rapport – Version définitive (fév. 2016), 209p

EGIS EAU (2016) - Plan de Prévention des Risques Naturels Littoraux, Département du Finistère, PPRN-L 1 (Ouest-Odet), Phase 2 : Caractérisation des aléas, Rapport – Version définitive (juil. 2016), 315p

EGIS EAU (2016) - Plan de Prévention des Risques Naturels Littoraux, Département du Finistère, PPRN-L 1 (Ouest-Odet), Phase 2 : Caractérisation des aléas, Atlas cartographique (janv. 2016), 113 p

EGIS EAU (2016) - Plan de Prévention des Risques Naturels Littoraux, Département du Finistère, PPRN-L 2 (Est-Odet), Phase 2 : Caractérisation des aléas, Atlas cartographique (fév. 2016), 86 p

EGIS EAU (2016) - Réponse étude CASAGEC, rapport N° HYN21668L, juin 2016, 75 p

Enriquez A.R., Marcos M., Alvarez-Ellacuria A., Orfila A., Gomis D. (2016) – Changes in beach shoreline due to sea level rise and waves under climate change scenarios: application to the Balearic Islands (Western Mediterranean). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, doi:10.5194/nhess-2016-361

Favier V., Krinner G., Amory C., Gallée H., Beaumet J., Agosta C. (2017) - Antarctica-Regional Climate and Surface Mass Budget. *Current Climate Change Reports*, pp 1-13.

Frazer L.N., Genz A.S., Fletcher C.H. (2009) - Toward parsimony in shoreline change prediction (I): Basis function methods. *Journal of Coastal Research*, 25, 2, pp 366-379.

Garry, G., Graszka, E., Toulemont, M. (1997). *Plans de prévention des risques littoraux (PPR): guide méthodologique*. Documentation française. ISBN 2-11-003883-7.

Genz A.S., Frazer L.N., Fletcher C.H. (2009) - Toward parsimony in shoreline change prediction (II): Applying basis function methods to real and synthetic data. *Journal of Coastal Research*, 25, 2, pp 380-392.

GIEC (2007) - Résumé à l'intention des décideurs. In: Bilan 2007 des changements climatiques: Impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation. Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.

Gonzalez M., Medina R., Gonzalez-Ondina J., Osorio A., Mendez F.J., Garcia E. (2007) – An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, *SMC. Computers & Geosciences*, 33, pp 916-931.

Gutierrez B.T., Plant N.G., Thieler E.R. (2011) – A Bayesian network to predict coastal vulnerability to sea level rise. *J. Geophys. Res.*, 116, F02009, doi:10.1029/2010JF001891.

Gutierrez B. T., Plant N. G., Thieler, E. R., Turecek A. (2015) - Using a Bayesian network to predict barrier island geomorphologic characteristics, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 120, 2452–2475, doi:10.1002/2015JF003671.

Hemer, M. A., Fan, Y., Mori, N., Semedo, A., Wang, X. L. (2013). Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble. *Nature climate change*, 3(5), 471-476.

Hennig C., Meila M., Murtagh F., Rocci R. (2015) - Handbook of Cluster Analysis. Chapman and Hall/CRC, 753 p.

Hinkel J., Church J., Gregory J., Lambert E., Le Cozannet G., et al.. Meeting User Needs for Sea Level Rise Information: A Decision Analysis Perspective. *Earth's Future*, American Geophysical Union, 2019, 7 (3), pp.320-337. ff10.1029/2018EF001071ff. fahal-02182684f

Houston J.R., Dean R.G. (2014) - Shoreline change on the east coast of Florida. *J. Coast. Res.* 30 (4), 647–660.

Hulme M., Jenkins G.J., Lu X., Tumpenny J.R., Mitchell T.D., Jones R.G., Lowe J., Murphy J.M., Hassell D.C. (2002) - Climate Change Scenarios for the United Kingdom: The UKCIP02 Scientific Report; Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia: Norwich, UK, 120p.

Huxley C. (2009) - Shoreline Response Modelling Assessing the Impacts of Climate Change, *Proceedings of the 18th NSW Coastal Conference*, 3 – 6 November 2009, Ballina.

Huxley C. (2010) - *Quantification of the Physical Impacts of Climate Change on Beach Shoreline Response*, Master of Philosophy, School of Engineering, Civil Engineering University of Queensland.

Idier D., Paris F., Le Cozannet G., Boulahya F., Dumas F. (2017) - Sea-level rise impacts on the tides of the European Shelf. *Continental Shelf Research*, 137, 56-71.

ISL (2009) - Plan de prévention des risques naturels Île de Noirmoutier/Baie de Bourgneuf, phase 1, étude des aléas, aléa érosion littorale, DDEA85. 56 p

Kane H.H., Fletcher C.H., Romine B.M., Anderson T.R., Frazer N.L., Barbee M.M. (2012) – Vulnerability assessment of Hawai'i's cultural assets attribute to erosion using shoreline trend analysis techniques. *Journal of Coastal Research*, 7 p.

- Kench P. S., Cowell P. J. (2001) - The morphological response of atoll islands to sea-level rise. Part 2: application of the modified shoreface translation model (STM). *Journal of Coastal Research*, pp 645-656.
- Kragtwijk N. G., Zitman T. J., Stive M. J. F., Wang Z. B. (2004) - Morphological response of tidal basins to human interventions. *Coastal engineering*, 51(3), pp 207-221.
- Lambeck K., Woodroffe C. D., Antonioli F., Anzidei M., Gehrels W. R., Laborel J., Wright A. J. (2010) - Paleoenvironmental records, geophysical modelling, and reconstruction of sea level trends and variability on centennial and longer timescales. Chap. 4, 61-121. In: *Church et al., 2010 (Editors). Understanding Sea-Level Rise and Variability, Blackwell Publishing Ltd.*
- Larson M., Erikson L., Hanson H. (2004) – An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. *Coastal Engineering*, 51, pp 675-696.
- Leatherman S. P., Zhang K., Douglas B. C. (2000) - Sea level rise shown to drive coastal erosion. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 81(6), pp 55-57.
- Le Bars D., Drijfhout S., de Vries H. (2017) - A high-end sea level rise probabilistic projection including rapid Antarctic ice sheet mass loss. *Environmental Research Letters*, 12(4), 044013.
- Le Cozannet G., Bulteau T., Castelle C., Ranasinghe R., Woppelmann G., et al.. Quantifying uncertainties of sandy shoreline change projections as sea level rises. *Scientific Reports, Nature Publishing Group*, 2019, 9 (1), (10.1038/s41598-018-37017-4). (hal-02182686)
- Le Cozannet G., Nicholls R.J., Hinkel J., Sweet W.V., McInnes K.L., Van de Wal S.W., Slangen A.B.A., Lowe J.A., White K. (2017) - Sea level change and coastal climate services: the way forward. *Journal of Marine Science and Engineering*, 33 p.
- Le Cozannet G., Oliveros C., Castelle B., Garcin M., Idier D., Pedreros R., Rohmer J. (2016) - Uncertainties in sandy shorelines evolution under the Bruun rule assumption. *Frontiers in Marine Science*, 3, 49.
- Leorri E., Cearreta A., Milne G. (2012) - Field observations and modelling of Holocene sea-level changes in the southern Bay of Biscay: implication for understanding current rates of relative sea-level change and vertical land motion along the Atlantic coast of SW Europe. *Quaternary Science Reviews*, 42, pp 59-73.
- List J. H., Sallenger A. H., Hansen M. E., Jaffe B. E. (1997) - Accelerated relative sea-level rise rapid coastal erosion: testing a causal relationship for the Louisiana barrier islands. *Marine Geology*, 140, (3–4), pp 347–365.
- Long J.W., Plant N.G. (2012) - Extended Kalman Filter framework for forecasting shoreline evolution. *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L13603, 6 p.
- Mallet C., Michot A., avec la collaboration de De la Torre Y., Lafon V., Robin M., Prevotaux B. (2012) - Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte. Rapport BRGM/RP-60616-FR, 226 p., 101 fig., 7 ann.
- Maspataud A. (2001) – *Impacts des tempêtes sur la morphodynamique du profil côtier en milieu macrotidal*. Thèse de Géosciences, Géologie, Paléontologie, Océanographie, Université du Littoral Côte d'Opale, 470 p.



McGranahan G., Balk D., Anderson B. (2007) - The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, vol. 19, no 1, doi :10.1177/0956247807076960, ISSN 0956-2478.

MEEM (Aubert M.H., Corrèze-Lénée P., Mouchard A., Perret B., Lefèvre M. (2017) - *Contribution à la transparence prévue par l'article 13 de l'accord de Paris sur le Climat (COP21). Etude des outils de mesure et d'analyse de l'impact carbone des projets et des politiques publics ?* Rapport n°010521-01.

Meysignac B., Cazenave A. (2012) - Sea level: a review of present-day and recent-past changes and variability. *Journal of Geodynamics*, 58, pp 96-109.

Mishra S. (2002) - *Assigning Probability Distributions to Input Parameters of Performance Assessment Models*. Stockholm: SKB.

Nicholls, R. J. (1998). Assessing erosion of sandy beaches due to sea-level rise. *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, 15(1), 71-76.

NRC (1987) - National Research Council; *Committee on Engineering Implications of Changes in Relative Mean Sea Level; Marine Board; Commission on Engineering and Technical Systems. Responding to Changes in Sea Level, Engineering Implications*; National Academy Press: Washington, DC, USA, 1987.

Passeri D. L., Hagen S. C., Irish J. L. (2014) - Comparison of shoreline change rates along the South Atlantic Bight and Northern Gulf of Mexico coasts for better evaluation of future shoreline positions under sea-level rise, *J. Coastal Res.*, SI-68, 20–26, doi:10.2112/si68-003.1.

Patterson D. (2009) - Modelling the Shoreline Impacts of Richmond River Training Walls, Proceedings of the 18th NSW Coastal Conference, 3 – 6 November 2009, Ballina.

Pereira C., Coelho C., Ribeiro A., Fortunato A., Lopes C.L., Dias J.M. (2013) - Numerical modelling of shoreline evolution in the Aveiro coast, Portugal – climate change scenarios, Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 2161-2166, ISSN 0749-0208.

Pilkey O. H., Cooper J. A. G. (2004) - Society and sea level rise. *Science*, 303, pp 1781-1785.

Plant N.G., Thieler E.R., Passeri D.L. (2016) – Coupling centennial-scale shoreline change to sea-level rise and coastal morphology in the Gulf of Mexico using a Bayesian network. *Earth's Future*, 4, pp 143–158, doi:10.1002/2015EF000331.

Planton S., Le Cozannet G., Cazenave A., Costa S., Douez O., Gaufrès P., Hissel F., Idier D., Laborie V., Petit V., Sergent P. (2015) - *Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises*, Rapport DGEC sous la direction de Jean Jouzel, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Mars 2015 ; <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/154000211.pdf>

Pons F., Trmal C. (2012) - MobiTC. Wikhydro. CETE Méditerranée/DREC/SRILH, PCI Inondations et Aléas Côtiers.

Préfet de la Vendée (2015) - Plan de prévention des risques de l'île de Noirmoutier, notice de présentation, approbation – octobre 2015, 51 p.

Ranasinghe R., Callaghan D., Stive M. J. F. (2012) - Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule. *Climatic Change*, 110, pp 561–574.

Ranasinghe R, Stive MJF (2009) - Rising seas and retreating coastlines. *Clim Change* (Editorial Commentary) 97:465–468. doi:10.1007/s10584-009-9593-3

Ranasinghe R., Watson P., Lord D., Hanslow D., Cowell P. (2007) – Sea level rise, coastal recession and the Bruun rule. *Proceedings of Coasts and Ports '07, Melbourne, VIC, Australia. On CD Rom produced by Engineers Australia*

Ritz C., Edwards T.L., Durand G., Payne A.J., Peyaud V., Hindmarsh R.C.A. (2015) - Potential sea-level rise from antarctic ice-sheet instability constrained by observations. *Nature*, 528, pp 115-118.

Robinet A., Castelle B., Idier D., Le Cozannet G., Déqué M., Charles E. (2016) – Statistical modeling of interannual shoreline change driven by North Atlantic climate variability spanning 2000-2014 in the Bay of Biscay. *Geo-Mar Lett*, 36, pp 479-490.

Rockström J., Gaffney O., Rogelj J., Meinshausen M., Nakicenovic N., Schellnhuber H. J. (2017) - A roadmap for rapid decarbonization. *Science*, 355(6331), pp 1269-1271.

Rollason V., Patterson D., Huxley C. (2010) – Assessing shoreline response to sea level rise: an alternative to the Bruun rule. *Coastal Conference*, 20 p.

Romine B.M., Fletcher C.H., Frazer L.N., Genz A.S., Barbee M.M., Lim S-C. (2009) - Historical shoreline change, Southeast Oahu, Hawaiï: Applying polynomial models to calculate shoreline change rates. *Journal of Coastal Research*, 25, 6, pp 1236-1253.

Rosati J. D., Dean R. G., Walton T. L. (2013) - The modified Bruun rule extended for landward transport. *Marine Geology*, 340, pp 71–81.

Schwartz M. L. (1967) - The Bruun theory of sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Geology*, 75, pp 76–92.

Slangen A., Church J. A., Zhang X., Monselesan D. (2014b) - Detection and attribution of global mean thermohaline sea level change. *Geophysical Research Letters*, vol. 41, no 16, p. 5951–5959.

Stammer D., Cazenave A., Ponte R. M., Tamisiea M. E. (2013) - Causes for contemporary regional sea level changes. *Annual review of marine science*, vol. 5, doi: 10.1146/annurev-marine-121211-172406, p. 21–46, ISSN 1941-1405.

Stevens H.R., Kiem A.S. (2014) – Developing hazard lines in response to coastal flooding and sea level change. *Urban policy and research*, 20 p.

Stephens, S. A., Bell, R. G., Lawrence, J. (2017). Applying principles of uncertainty within coastal hazard assessments to better support coastal adaptation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 5(3), 40.

Stive M. J. (2004) - How important is global warming for coastal erosion?. *Climatic Change*, 64(1-2), pp 27-39.

Suanez S., Garcin M., Bulteau T., Rouan M., Lagadec L., David L. (2012) - Les observatoires du trait de côte en France métropolitaine et dans les DOM. *EchoGéo*. URL : <http://echogeo.revues.org/12942> ; DOI : 10.4000/echogeo.12942

Sweet W. V., Kopp R. E., Weaver C. P., Obeysekera J., Thieler E. R., Zervas C. (2017) - Global and Regional Sea Level Scenarios for the United States. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 083. 2017. Available online: [https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/techrpt83\\_Global\\_and\\_Regional\\_SLR\\_Scenarios\\_for\\_the\\_US\\_final.pdf](https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/techrpt83_Global_and_Regional_SLR_Scenarios_for_the_US_final.pdf)

UKCP18 (à venir). Disponible en ligne : <http://ukclimateprojections.metoffice.gov.uk/24125> (consulté le 5 Mai 2017).

Vitousek S., Barnard P.L., Limber P. (2017a) - Can beaches survive climate change? *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 122, pp 1060–1067, doi:10.1002/2017JF004308.

Vitousek S., Barnard P.L., Limber P., Erikson L., Cole B. (2017b) - A model integrating longshore and cross-shore processes for predicting long-term shoreline response to climate change. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 122, 25 p. doi:10.1002/2016JF004065.

Wong P.P.; Losada I.J.; Gattuso J.-P.; Hinkel J.; Khattabi A.; McInnes K.L.; Saito Y.; Sallenger, A. (2014) - Coastal systems and low-lying areas. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability; Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Field, B.C., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., et al., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA ; pp 361–409.

Wöppelmann G., Miguez B. M., Bouin M. N., Altamimi Z. (2007) - Geocentric sea-level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges world-wide. *Global and Planetary Change*, vol. 57, no 3-4, doi:10.1016/j.gloplacha.2007.02.002, p. 396–406, ISSN 0921-8181.

Zhang K., Douglas B. C., Leatherman S. P. (2004) - Global warming and coastal erosion. *Climatic Change*, 64(1), pp 41-58.



**Centre scientifique et technique**  
**Direction des risques et de la prévention**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34  
[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)