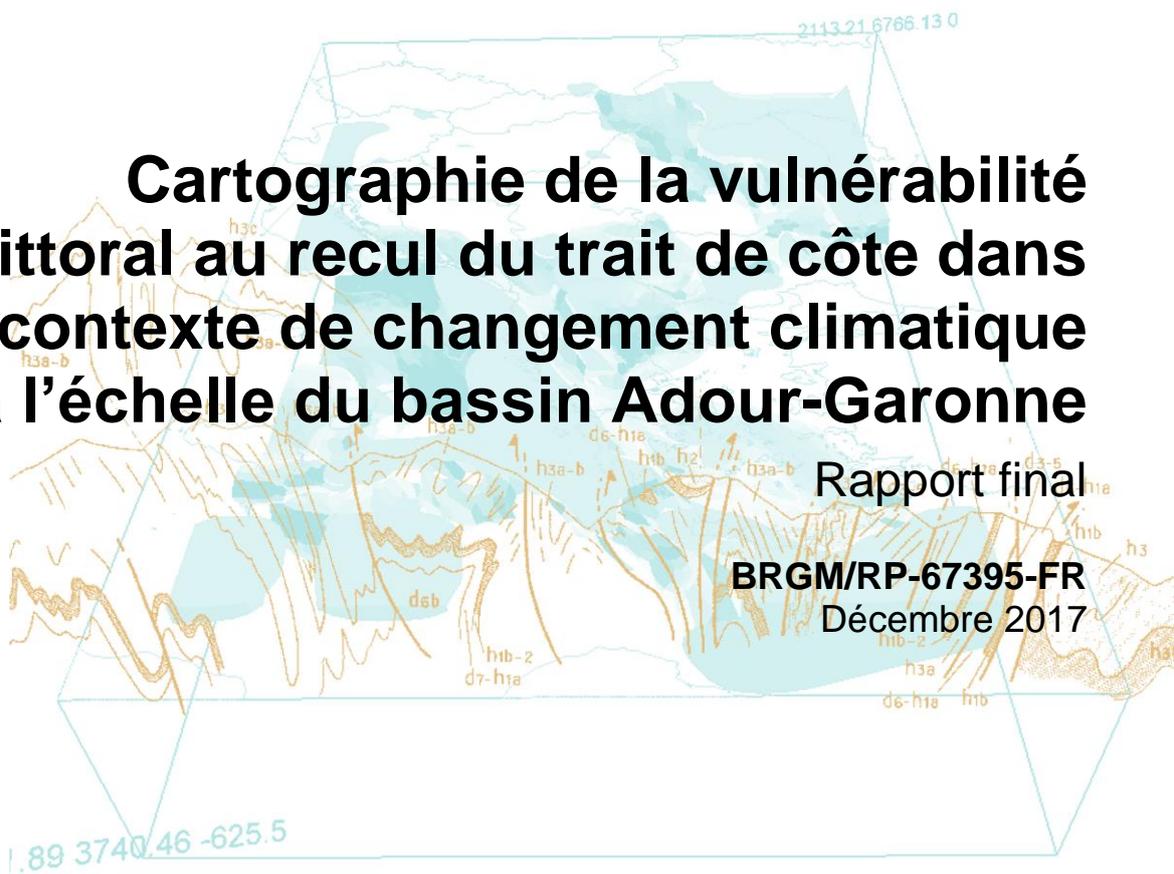


Document public



# Cartographie de la vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte dans un contexte de changement climatique à l'échelle du bassin Adour-Garonne



Rapport final  
**BRGM/RP-67395-FR**  
Décembre 2017



# Cartographie de la vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte dans un contexte de changement climatique à l'échelle du bassin Adour-Garonne

Rapport final

**BRGM/RP-67395-FR**

Décembre 2017

Étude réalisée dans le cadre de l'opération  
de Service public du BRGM AP17AQI029

**N. Bernon, J. Mugica, G. Le Cozannet et A. Maspataud**

**Vérificateur :**

Nom : C. MALLET

Fonction : Responsable scientifique  
de programme OBS07

Date : 01/12/2017



**Approbateur :**

Nom : N. PEDRON

Fonction : Directeur régional du  
BRGM Nouvelle-Aquitaine

Date : 25/01/2018



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

## ***Avertissement***

*La cartographie de l'aléa recul du trait de côte dressée dans cette étude est informative, dans l'état actuel des connaissances. Ces cartes ne peuvent être agrandies à une échelle plus fine. Elles sont indissociables du support sur lequel elles ont été réalisées et inadaptées pour un usage à des fins de zonage réglementaire.*

**Mots-clés** : Erosion, trait de côte, changement climatique, Bassin Adour-Garonne, Nouvelle-Aquitaine.

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

**Bernon N., Mugica J., Le Cozannet G. et Maspataud A.** (2017) - Cartographie de la vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte dans un contexte de changement climatique à l'échelle du bassin Adour-Garonne. Rapport final. BRGM/RP-67395-FR, 96 p., 57 ill., 8 tab, 1 ann.

## Synthèse

La disposition A16 du SDAGE Adour-Garonne 2016-2021 prévoit d'établir un plan d'adaptation au changement climatique (PACC) pour le bassin Adour-Garonne. Ce plan rassemble :

- une définition des enjeux et des problématiques à traiter ;
- des cartes de vulnérabilités ;
- la définition d'actions et l'évaluation économique, sociale et environnementale.

La présente étude propose des informations sur la **vulnérabilité du littoral du bassin Adour-Garonne au recul du trait de côte en lien avec le changement climatique**, qui pourront alimenter le volet « Littoral » du PACC. L'emprise géographique étudiée correspond à la façade atlantique du bassin Adour-Garonne, soit de la Baie d'Yves au nord à l'estuaire de la Bidassoa au sud.

Les travaux effectués s'inspirent des études antérieures de l'Observatoire de la Côte Aquitaine, en particulier concernant le volet de caractérisation du recul du trait de côte (Bernon *et al.*, 2016). Les résultats ainsi existants pour l'ex-Région Aquitaine ont été directement réutilisés. Par ailleurs, une analyse détaillée de l'impact du changement climatique sur le littoral est proposée, sur la base des résultats récents sur cette thématique (Le Cozannet *et al.*, 2017c, Le Cozannet et Bulteau, 2017). De cette manière, une cohérence a été garantie entre la présente étude et les études récentes réalisées en Nouvelle-Aquitaine.

Pour ce faire, le trait de côte du bassin Adour-Garonne a été digitalisé sur des supports cartographiques et photographiques récents. En fonction des données existantes et des données disponibles, le travail s'est organisé en distinguant 4 secteurs géographiques : Pertuis-Estuaire, Côte sableuse, Bassin d'Arcachon et Côte rocheuse basque. **Le trait de côte de ces 4 secteurs géographiques, qui s'étend sur 625,0 km, a alors été caractérisé en distinguant neuf types d'environnements géomorphologiques : dunes littorales, cordons sableux, cordons de galets, marais maritimes, falaises rocheuses, plages de poche, petites flèches sableuses, grandes flèches sableuses et environnements artificiels (polders et ports).** Ce découpage du trait de côte se justifie par des dynamiques d'évolution distinctes.

Sur cette base de connaissance établie, la sensibilité du littoral au recul du trait de côte a été définie selon une dynamique d'évolution à long terme (taux d'évolution en m/an) et à court terme (recul lié à un évènement majeur en mètres). Cette quantification du recul, portée à l'échéance 2050, est conforme à la méthodologie nationale recommandée pour les PPRL (Plans de Prévention des Risques Littoraux). **Une distance de recul potentielle du trait de côte à l'horizon 2050 a ainsi été calculée sur chaque portion homogène du littoral et cartographiée.**

**L'exposition du littoral au changement climatique à l'horizon 2050 a été déterminée à partir du calcul de l'élévation du niveau marin attendu à cette échéance.** Spécifiquement mis en œuvre pour cette étude, l'élévation du niveau marin en Nouvelle-Aquitaine à l'horizon 2050 a été estimée à 0,21 m, correspondant à la valeur médiane pour le scénario RCP 4.5 d'émission de gaz à effets de serre défini par le GIEC. L'impact d'une telle élévation du niveau marin sur l'évolution du trait de côte a ensuite été évalué, à partir de méthodes empiriques ou à dire d'expert, traduisant *in fine* l'exposition du littoral au changement climatique dans cette étude.

La combinaison de ces deux paramètres - sensibilité du littoral au recul du trait de côte et exposition à l'élévation du niveau marin - pour l'échéance 2050, constitue alors le résultat final de cette étude. **La cartographie de la vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte en lien avec une élévation du niveau marin de 0,21 m à l'échéance 2050 révèle, sur les 625,0 km de linéaire côtier, des littoraux :**

- **faiblement vulnérables sur 63,2 km soit 10,1 % du littoral**, correspondant à plus de 80 % à des zones de falaises rocheuses ;
- **modérément vulnérables sur 179,8 km soit 28,8 % du littoral**, dont  $\frac{3}{4}$  sont des cordons dunaires situés sur l'île d'Oléron, la presqu'île d'Arvert, le sud du département de la Gironde et le littoral landais ;
- **fortement vulnérables sur 268,0 km soit 42,9 % du littoral**, regroupant pour l'essentiel des environnements de dunes littorales (40,2 %), de ports (25,4 %) et de polders (13,4 %) ;
- **très fortement vulnérables sur 114,0 km soit 18,2 % du littoral**, où près des  $\frac{3}{4}$  du linéaire concerné sont formés par les dunes littorales et les flèches sableuses indifférenciées situées aux embouchures fluviales/estuariennes du bassin, où la dynamique d'évolution du trait de côte est particulièrement active.

La méthode développée par le BRGM dans cette étude constitue une approche innovante visant à intégrer le changement climatique dans l'évolution des littoraux du bassin Adour-Garonne. Elle propose une cartographie de la vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte dans un contexte de changement climatique. Elle pourra participer à la réalisation de documents d'orientation des politiques publiques relatives à la gestion des risques littoraux et au développement de stratégies d'adaptation du territoire et de la société au changement global.

# Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Contexte de l'étude .....</b>	<b>13</b>
2.1. CADRE ET OBJECTIFS .....	13
2.2. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE .....	13
2.2.1. Secteur d'étude.....	13
2.2.2. Environnements littoraux et contextes géomorphologiques associés à l'évolution du trait de côte .....	19
<b>3. Caractérisation de la sensibilité du littoral du bassin Adour-Garonne au recul du trait de côte à l'horizon 2050 .....</b>	<b>31</b>
3.1. DEFINITION DU TRAIT DE COTE.....	31
3.2. TRAIT DE COTE DE REFERENCE .....	33
3.3. CAS DES ESTUAIRES .....	33
3.4. CONSIDERATION DES OUVRAGES COTIERS .....	35
3.4.1. Types d'ouvrages .....	35
3.4.2. Hypothèses relatives aux traits de côte de référence et leurs évolutions.....	40
3.5. DETERMINATION DE LA SENSIBILITE DU LITTORAL AU REcul DU TRAIT DE COTE.....	42
3.5.1. Définition et caractérisation de l'aléa recul du trait de côte.....	42
3.5.2. Détermination des taux d'évolution du trait de côte et des valeurs de recul lié à un évènement majeur .....	43
3.6. CARACTERISATION DE LA SENSIBILITE DU LITTORAL ADOUR-GARONNE AU REcul DU TRAIT DE COTE A L'HORIZON 2050 .....	54
<b>4. Impact du changement climatique sur le littoral à l'horizon 2050 .....</b>	<b>57</b>
4.1. IMPACTS PREVISIBLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'HORIZON 2050 : PROJECTIONS DU NIVEAU DE LA MER POUR LA NOUVELLE-AQUITAINE .....	57
4.1.1. Introduction .....	58
4.1.2. Méthode.....	62
4.1.3. Données et hypothèses .....	67
4.1.4. Résultats.....	71
4.1.5. Conclusion .....	76
4.2. DEVELOPPEMENT D'UN INDICATEUR D'EXPOSITION DU TRAIT DE COTE A L'ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER.....	77
4.2.1. Dune littorale.....	77
4.2.2. Falaise rocheuse .....	80
4.2.3. Plage de poche.....	80

4.2.4. Cordon de galets et cordons sableux.....	80
4.2.5. Flèches sableuses.....	81
4.2.6. Grandes flèches sableuses.....	82
4.2.7. Marais maritime.....	82
4.2.8. Polder.....	82
4.2.9. Port.....	82
4.3. CARTOGRAPHIE DE L'EXPOSITION DU LITTORAL DU BASSIN ADOUR-GARONNE A L'ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER.....	82
<b>5. Détermination de la vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte dans un contexte de changement climatique.....</b>	<b>85</b>
5.1. METHODE DE CARACTERISATION.....	85
5.2. RESULTATS.....	85
5.2.1. Faible vulnérabilité.....	88
5.2.2. Vulnérabilité modérée.....	88
5.2.3. Forte vulnérabilité.....	88
5.2.4. Très forte vulnérabilité.....	89
<b>6. Conclusion.....</b>	<b>91</b>
<b>7. Bibliographie.....</b>	<b>93</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 - Localisation du secteur d'étude : la façade littorale du bassin versant Adour-Garonne.....	14
Illustration 2 - Secteurs géographiques distingués dans cette étude.....	15
Illustration 3 - Coupe schématique d'un marais maritime en zone tempérée (dans Paskoff, 2006, d'après A. Guilcher, 1979).....	16
Illustration 4 - Marais maritime représentatif de la zone inter-pertuis avec le schorre au premier plan (végétation) et la slikke au second plan (source : <a href="http://www.cren-poitou-charentes.org/">http://www.cren-poitou-charentes.org/</a> ).....	16
Illustration 5 - Profil schématique de plage et de dune caractéristique de la côte sableuse.....	17
Illustration 6 - Vue aérienne de la dune littorale en Nouvelle-Aquitaine (© Observatoire de la Côte Aquitaine, ONF, 19/02/2014).....	17
Illustration 7 - Bassin endigué et port sur la commune d'Arès au sein d'un environnement de type marais maritime (photo : ULM Sud Bassin, ©OCA 2017).....	18
Illustration 8 - Plages de poche de la pointe du Chay, commune de Royan (17) (fond photographique : ©IGN, 2014).....	20
Illustration 9 - Plage de poche d'Erromardie, commune de Saint-Jean-de-Luz (photo : ULM Sud Bassin, ©OCA 2017).....	20
Illustration 10 - Cordon de galets en baie d'Yves (17).....	21

Illustration 11 - Cordon sableux du marais de Moëze (17) (photographie ©BRGM, 2017) .....	22
Illustration 12 - Cordon sableux d'Andernos-les-Bains (33) .....	22
Illustration 13 - Vue aérienne du cordon dunaire, de Lacanau au Cap Ferret (photographie : ULM Sud Bassin, ©OCA 2017) .....	23
Illustration 14 - Marais maritime au Teich, Bassin d'Arcachon (33) (photographie : ULM Sud Bassin, ©OCA 2017) .....	24
Illustration 15 - Pointe de la Coubre, presqu'île d'Arvert (17) (fond photographique : ©IGN, 2014).....	25
Illustration 16 - Vue aérienne d'une grande flèche sableuse : la pointe du Cap Ferret (photographie : ULM Sud Bassin, ©OCA 2017) .....	26
Illustration 17 - Gauche : éboulements au niveau de la pointe Sainte-Anne à Saint-Jean-de-Luz (© Observatoire de la Côte Aquitaine, octobre 2013) ; Droite : coupe schématique type (Nedellec et al., 2005).....	27
Illustration 18 - Port du Verdon (33) (photographie : ULM Sud Bassin, ©OCA 2017) .....	28
Illustration 19 - Vue aérienne partielle du marais de Brouage (17) (orthophoto ©IGN, 2014) .....	29
Illustration 20 - Principaux indicateurs du trait de côte (Mallet et al., 2012).....	32
Illustration 21 - Identification de la transition entre le trait de côte et la berge de cours d'eau à l'aide des données géomorphologiques et géologiques (Carte géologique au 1/50000, feuille n°681, BRGM).....	35
Illustration 22 - Exemple d'ouvrage longitudinal : digue en enrochement en baie d'Yves (17) (photographie ©BRGM 2017) .....	36
Illustration 23 - Exemples d'ouvrage transversal : épis sur le front de mer de Montalivet (33) (photographie ULM Sud Bassin, ©OCA 2017) .....	36
Illustration 24 - Exemple de parade active sur une falaise rocheuse : soutènement maçonné à la pointe de Suzac (17) (photographie ©BRGM, 2017).....	37
Illustration 25 - Présence/absence d'ouvrages sur le trait de côte étudié.....	39
Illustration 26 - Effacement des ouvrages côtiers (à gauche : côte sableuse, Montalivet ; à droite : côte rocheuse basque, Biarritz) (fond photographique : ©IGN, OCA, 2014) .....	40
Illustration 27 - Quartier ostréicole et digue du lycée de la mer, Gujan-Mestras (33) (orthophotographie ©SIBA, 2016) .....	41
Illustration 28 - Polder de Charente-Maritime : marais de Brouage (fond photographique ©IGN, 2014) ...	41
Illustration 29 - Positions historiques du trait de côte au sud de Lacanau (©OCA, 2017) .....	42
Illustration 30 - Taux d'évolution annuels moyens sur le littoral de la zone Pertuis-Estuaire .....	45
Illustration 31 - Reculs liés à un évènement majeur sur le littoral de la zone Pertuis-Estuaire .....	46
Illustration 32 - Taux d'érosion annuels moyens « Tx » en m/an sur la côte sableuse (Bernon et al., 2016) .....	48
Illustration 33 - Reculs moyens susceptibles d'intervenir à la suite d'un évènement majeur (Lmax) sur la côte sableuse (Bernon et al., 2016) .....	49
Illustration 34 - Exemple d'estimation des Tx sur le Bassin d'Arcachon. Le trait de côte de 2016 est représenté sur chacune des 2 orthophotographies. En rouge, il correspond au pied des ouvrages (PO) et en orange à la rupture de pente topographique.....	50
Illustration 35 - Exemple d'érosion marine pour la détermination des Lmax sur le poutour du Bassin d'Arcachon .....	51
Illustration 36 - Taux d'érosion annuels moyens « Tx » et reculs liés à un évènement majeur « Lmax » sur le littoral du Bassin d'Arcachon.....	51

Illustration 37 - Taux d'érosion annuels moyens « Tx » en m/an sur la côte rocheuse basque (Bernon et al., 2016) .....	53
Illustration 38 - Distribution géographique de l'intensité des reculs liés à un évènement majeur sur la côte basque (Bernon et al., 2016) .....	54
Illustration 39 - Sensibilité du littoral du bassin Adour-Garonne au recul du trait de côte à l'horizon 2050 .....	55
Illustration 40 - Causes des variations du niveau marin relatives (adapté d'après Cazenave et Le Cozannet (2014)) .....	58
Illustration 41 - Projections de l'évolution du niveau moyen des mers au cours du XXI <sup>e</sup> siècle par rapport à la période 1986-2005, pour les deux scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5.....	59
Illustration 42 - Variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer et ses incertitudes selon l'IPCC pour deux scénarios de changement climatique, en 2100 : RCP 2.6 (A et B) et RCP 8.5 (C et D). .....	60
Illustration 43 - Projections d'élévation du niveau de la mer selon l'étude de Kopp et al. (2014) pour la ville de Saint-Jean-de-Luz, en région Nouvelle-Aquitaine, et trois scénarios de changement climatique (RCP 2.6, 4.5 et 8.5) (données : Kopp et al., 2014) .....	61
Illustration 44 - Approche générale utilisée dans cette étude (adaptée à partir de Slangen et al., 2012) ..	63
Illustration 45 - Implications régionales (en Europe) du scénario de changement climatique RCP 4.5 vers 2050 .....	64
Illustration 46 - Schéma illustrant la réponse de la croûte terrestre induite par la fonte de calottes polaires (source : Church et al., 2013) .....	66
Illustration 47 - Empreinte spatiale des différents processus concourant à élever le niveau de la mer par augmentation de la masse d'eau des océans. ....	67
Illustration 48 - Contraintes globales (rouge) et implications régionales (noir) de chaque contribution à l'élévation du niveau de la mer dans le cas du RCP 4.5 vers 2050 .....	71
Illustration 49 - Variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer dans le cas du RCP 4.5 vers 2050 .....	72
Illustration 50 - Variabilité régionale de la composante stérique de l'élévation du niveau de la mer dans le cas du RCP 4.5 vers 2050 .....	73
Illustration 51 - Projection de l'élévation du niveau de la mer pour le scénario RCP 4.5 .....	75
Illustration 52 - Comparaison des projections d'élévation du niveau de la mer pour le scénario RCP 4.5 en Nouvelle-Aquitaine (médiane en trait gras bleu, et plage bleu ciel des valeurs vraisemblables IPCC) avec la courbe théorique de poursuite des taux globaux observés/actuels de 3,2 mm/an (en noir) .....	76
Illustration 53 - Evolution du profil côtier due à l'élévation du niveau de la mer, selon la règle de Bruun (1962) (figure extraite de Rosati et al., 2013) .....	78
Illustration 54 - Modèle d'érosion des dunes utilisé en mode autonome comme fonction structurelle dans le modèle de Ranasinghe (schéma d'après Larson et al., 2004) .....	78
Illustration 55 - Analyse de la topographie en arrière de cordons de galets sur la commune de Bourcefranc-le-Chapus (17). ....	81
Illustration 56 - Exposition du littoral du bassin Adour-Garonne à l'élévation du niveau marin à l'horizon 2050 .....	84
Illustration 57 - Cartographie de la vulnérabilité du littoral du bassin Adour-Garonne au recul du trait de côte, en lien avec l'élévation du niveau marin de 0,21 m à l'horizon 2050 .....	87

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Linéaires (km) du littoral du bassin Adour-Garonne et classes de distance potentielle de recul à l'horizon 2050 .....	56
Tableau 2 - Valeurs globales considérées pour chaque contribution, en mètres par rapport à une référence 0 en 1986-2005 (sources : Church et al., 2013 [C13] ; Jackson et Jevrejeva, 2016 [JJ16] ; [ICDC] <a href="http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/ar5-slr.html">http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/ar5-slr.html</a> ; Marzeion et al., 2012 [M12]...)	69
Tableau 3 - Valeurs globales considérées pour les mouvements verticaux du sol à partir des données des GPS permanents de la base de données SONEL .....	70
Tableau 4 - Projections de l'élévation du niveau de la mer, aux horizons 2050 et 2100, pour plusieurs scénarios (RCP 2.6, 4.5, 8.5). L'encadré noir souligne la valeur médiane de 0,21 m retenue pour l'horizon 2050 dans cette étude .....	74
Tableau 5 - Projections de recul du trait de côte, basées sur la loi de Bruun (1962) et le modèle de Ranasinghe et al. (2012), aux horizons 2050 et 2100, pour plusieurs scénarios (RCP 2.6, 4.5, 8.5) .....	79
Tableau 6 - Linéaires du littoral du bassin Adour-Garonne et exposition à l'élévation du niveau marin à l'horizon 2050 .....	83
Tableau 7 - Définition de la vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte dans un contexte de changement climatique à l'horizon 2050 .....	85
Tableau 8 - Classes de vulnérabilité du littoral du bassin Adour-Garonne au recul du trait de côte, en lien avec l'élévation du niveau marin de 0,21 m à l'horizon 2050 : linéaires par environnement côtier .....	86



# 1. Introduction

La disposition A16 du SDAGE Adour-Garonne 2016-2021 prévoit d'établir un plan d'adaptation au changement climatique (PACC) pour le bassin Adour-Garonne. Ce plan rassemble :

- une définition des enjeux et des problématiques à traiter ;
- des cartes de vulnérabilités ;
- la définition d'actions et l'évaluation économique, sociale et environnementale.

La présente étude propose des informations sur la **vulnérabilité du littoral du bassin Adour-Garonne au recul du trait de côte en lien avec le changement climatique**, qui pourront alimenter le volet « Littoral » du PACC. L'emprise géographique étudiée correspond à la façade atlantique du bassin Adour-Garonne, soit de la Baie d'Yves au nord à l'estuaire de la Bidassoa au sud.

Une partie de cette bande côtière, celle de l'ex-Région Aquitaine, fut l'objet d'une étude de caractérisation de l'aléa recul du trait de côte aux horizons 2025 et 2050 réalisée en 2016 par l'Observatoire de la Côte Aquitaine (Bernon *et al.*, 2016). Par ailleurs, toujours dans le cadre de l'Observatoire de la Côte Aquitaine, le BRGM réalise une étude des impacts du changement climatique à l'échelle régionale Nouvelle-Aquitaine (Le Cozannet *et al.*, 2017c).

Fort de cette dynamique régionale et des connaissances ainsi acquises, la présente étude vise à étudier, à l'échelle du littoral du bassin Adour-Garonne, sa sensibilité au recul du trait de côte d'une part, et son exposition au changement climatique d'autre part. L'objectif final de cette étude de produire une carte de vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte dans un contexte de changement climatique à l'horizon 2050.

Après une présentation du contexte géographique et géologique général dans un premier chapitre, le second chapitre décrit la méthode de caractérisation de la sensibilité au recul du trait de côte mise en œuvre à l'échelle du bassin Adour-Garonne. Les impacts du changement climatique sur le littoral à l'horizon 2050 sont ensuite exposés dans une troisième partie. Enfin, les éléments développés dans les deux précédents chapitres sont associés pour déterminer la vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte en lien avec le changement climatique à l'horizon 2050.



## 2. Contexte de l'étude

### 2.1. CADRE ET OBJECTIFS

Cette étude est complémentaire à plusieurs actions relatives au recul du trait de côte et à l'évaluation de l'impact du changement climatique, réalisées sur le littoral de la région Nouvelle-Aquitaine :

- actions portées par le GIP Littoral Aquitain dans le cadre de la stratégie régionale de gestion de la bande côtière sur la façade océanique ouverte de la région ex-Aquitaine ;
- actions réalisées par l'Observatoire de la Côte Aquitaine (OCA) et du BRGM, notamment pour l'évaluation du recul du trait de côte à l'horizon 2050 (Bernon *et al.*, 2016) et pour l'adaptation au changement climatique (Le Cozannet *et al.*, 2017c, Le Cozannet et Bulteau, 2017) ;
- l'expertise du laboratoire universitaire LIENSs de l'Université de La Rochelle sur le littoral charentais.

Une aide financière de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne a permis la réalisation de cette étude, formalisée par la convention n°310 33 0151 signée le 21/03/2017. Les résultats pourront notamment alimenter le volet « Littoral » du Plan d'Adaptation au Changement Climatique élaboré par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. Par ailleurs, ce projet est cohérent avec le Contrat d'objectifs Etat-BRGM 2013-2017. A ce titre, une part du financement de l'étude a été supportée par le BRGM via la subvention pour charge publique apportée par le Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche.

Un comité de suivi composé de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, du BRGM, du LIENSs, du CEREMA, du GIP Littoral Aquitain, de la Région et de la DREAL Nouvelle-Aquitaine a été défini pour accompagner le déroulement de l'étude. Le comité de suivi a été informé de l'avancement du projet et a été invité aux réunions d'étape de l'étude. L'ensemble des éléments a été transmis à tous les membres du comité de suivi, participants aux réunions ou excusés, pour lui permettre de fournir un avis sur la méthode mise en œuvre et les résultats produits.

### 2.2. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

#### 2.2.1. Secteur d'étude

L'emprise géographique de cette étude correspond à la frange littorale bordant le bassin versant Adour-Garonne (Illustration 1).

Dans le détail, la zone d'étude s'étend de la commune d'Yves au nord, située en Charente-Maritime, à la commune d'Hendaye au sud, où la frontière avec l'Espagne est matérialisée par l'estuaire de la Bidassoa.

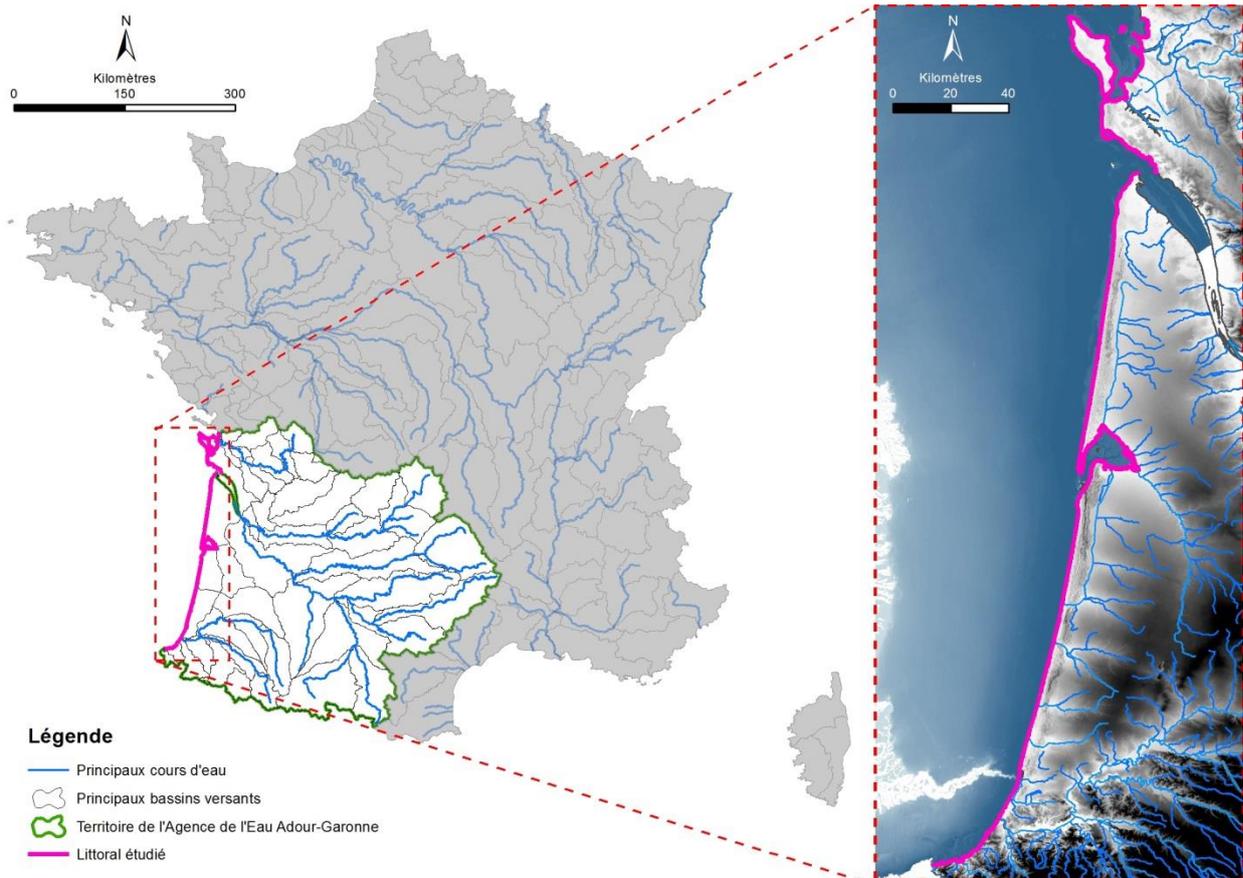


Illustration 1 - Localisation du secteur d'étude : la façade littorale du bassin versant Adour-Garonne

Ce territoire a été étudié en distinguant quatre secteurs géographiques (Illustration 2), du fait de contextes géomorphologiques différents et de l'existence de données sur certaines portions :

- Pertuis-Estuaire ;
- Côte sableuse ;
- Bassin d'Arcachon ;
- Côte rocheuse basque.

Ces secteurs géographiques sont à distinguer des environnements géomorphologiques dans lequel évolue le trait de côte, qui seront détaillés dans le chapitre 2.2.2.

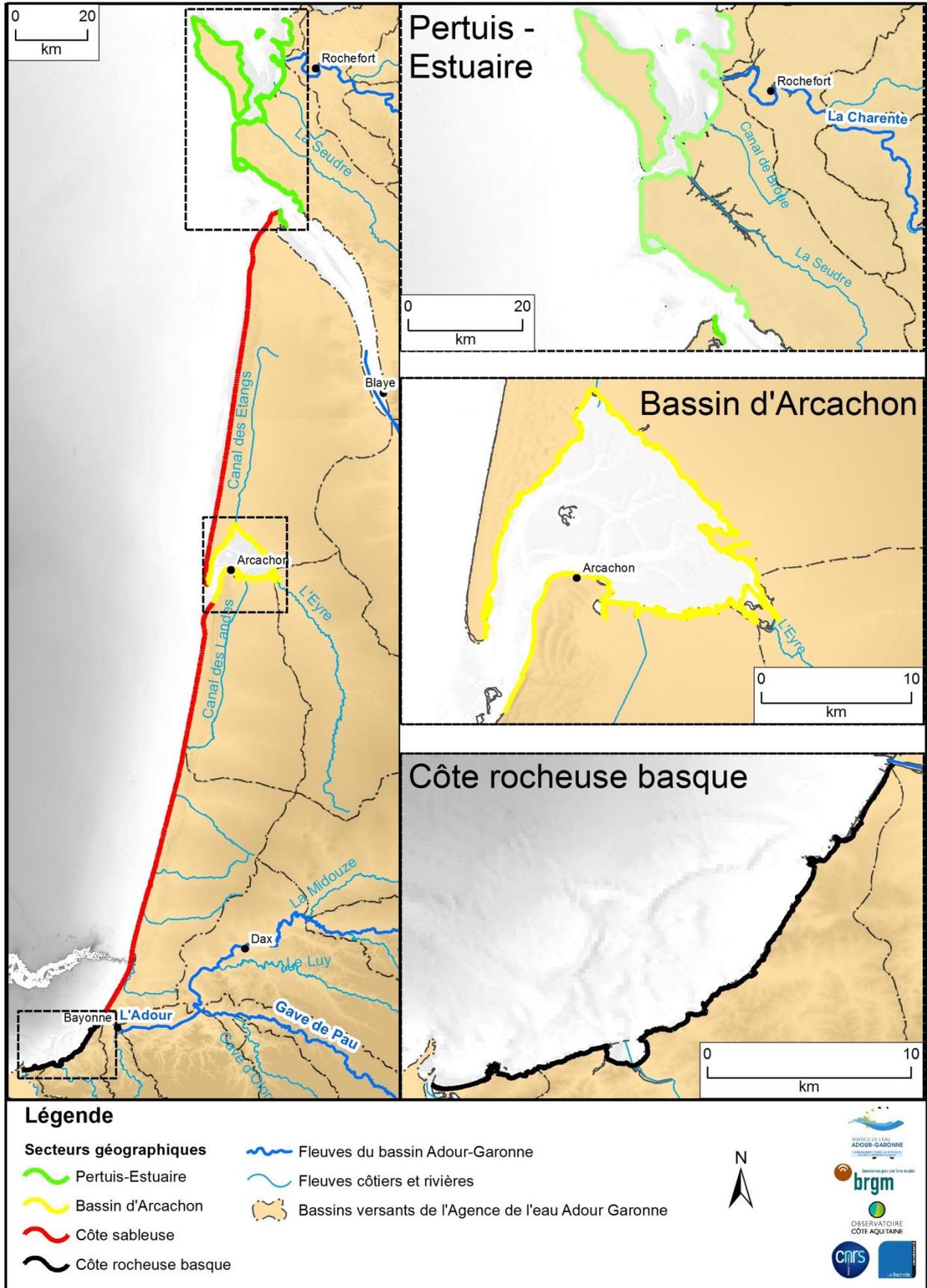


Illustration 2 - Secteurs géographiques distingués dans cette étude

## **Pertuis-Estuaire**

Cette appellation désigne, dans cette étude, le linéaire côtier de 227,6 km de Charente-Maritime et le littoral de l'estuaire de la Gironde. La configuration de ce secteur est singulière sur le littoral Adour-Garonne.

D'une part, l'exposition aux houles est variée : on distingue les secteurs très exposés, situés sur la façade océanique ouverte (côte ouest de l'île d'Oléron, de la presqu'île d'Arvert), des secteurs abrités dans la zone inter-pertuis (entre l'île d'Oléron et le continent). D'autre part, l'orientation changeante du trait de côte implique une exposition variable du littoral face aux houles énergétiques (d'orientation générale ouest-nord-ouest dans le Golfe de Gascogne). C'est en particulier le cas du littoral estuarien.

La zone inter-pertuis constitue un environnement de type marais maritime remarquable, topographiquement bas et faiblement incliné vers l'océan. Cette zone est pour l'essentiel sous la dépendance des marées et des courants associés ; elle est parcourue par des chenaux qui évacuent les eaux continentales vers l'océan. Les marais maritimes se forment alors lorsque les profondeurs sont peu importantes et la charge de sédiments fins en suspension est abondante. La morphologie de cet environnement vaseux ou sablo-vaseux se compose, à l'état naturel, d'une *slikke*, partie inférieure dépourvue de végétation, et du *schorre* légèrement plus haut et couvert de végétation herbacée. La *slikke*, de pente faible (1 à 3 ‰), est inondée à chaque marée haute, alors que le *schorre*, de pente inférieure à 1 ‰, n'est submergé qu'à chaque marée de vives eaux. La transition entre ces deux milieux s'effectue par la haute *slikke* à la pente plus marquée (10 à 20 ‰) traduisant une certaine accrétion du milieu, ou par une microfalaise, de hauteur décimétrique, témoignant d'un secteur en érosion (Illustration 3).

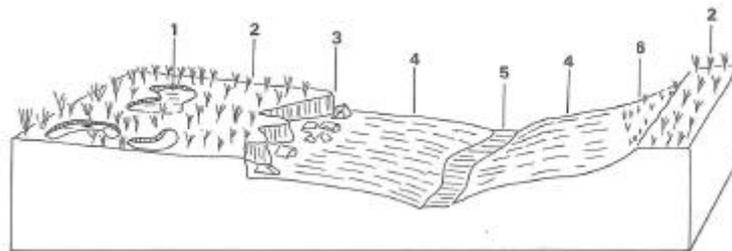


Illustration 3 - Coupe schématique d'un marais maritime en zone tempérée (dans Paskoff, 2006, d'après A. Guilcher, 1979) 1 : cuvette, 2 : schorre, 3 : microfalaise, 4 : slikke, 5 : chenal de marée, 6 : haute slikke



Illustration 4 - Marais maritime représentatif de la zone inter-pertuis avec le schorre au premier plan (végétation) et la slikke au second plan (source : <http://www.cren-poitou-charentes.org/>)

La façade océanique ouverte du secteur Pertuis-Estuaire s'apparente, en dehors des zones de falaises, au secteur de la côte sableuse décrite ci-après.

### Côte sableuse

La côte sableuse au *sens-strict* correspond aux secteurs où la transition terre-océan est marquée par une dune littorale ou à leur proximité immédiate. Dans le cadre de cette étude, en raison des données existantes (Bernon *et al.*, 2016), le secteur de la côte sableuse débute de la pointe de Grave au nord et se termine au sud à l'estuaire de l'Adour, sur un linéaire de 227,6 km. Elle est représentative des côtes girondine et landaise, au cordon dunaire caractéristique, généralement large et rectiligne.

D'ouest en est, le système dunaire comporte trois éléments étroitement solidaires et formant un ensemble indissociable : l'avant-côte (zone subtidale, c'est-à-dire située sous la zone de battement des marées), la plage s.s. (estran) et la dune littorale. En arrière du cordon littoral côtier, s'étendent généralement des dunes anciennes ou historiques dont la formation remonte à plusieurs siècles. Elles sont pour la plupart couvertes de forêts (Illustration 5 et Illustration 6).

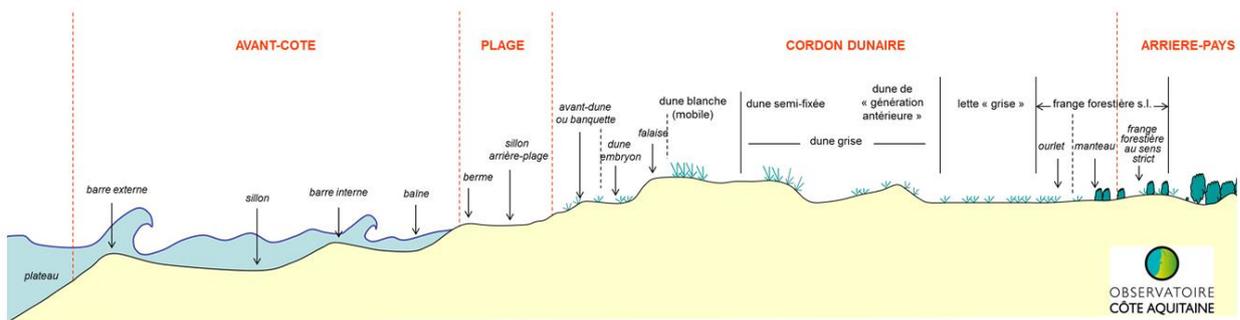


Illustration 5 - Profil schématique de plage et de dune caractéristique de la côte sableuse



Illustration 6 - Vue aérienne de la dune littorale en Nouvelle-Aquitaine (© Observatoire de la Côte Aquitaine, ONF, 19/02/2014)

### **Bassin d’Arcachon**

Le secteur du Bassin d’Arcachon correspond à la façade interne du Bassin, de la pointe du Cap Ferret à la Dune du Pilat. Les mouvements de sédiments dans ce secteur sont, comme dans la zone Pertuis-Estuaire, essentiellement dépendants des courants de marée, bien que le clapot puisse temporairement provoquer des transits sédimentaires (lors de tempêtes notamment). Le courant de jusant, à marée descendante, est légèrement supérieur au courant de flot (marée montante), ce qui maintient l’ouverture océanique communément appelée « passes du Bassin d’Arcachon ».

T. Auly et J. Veiga (2010) indiquent l’existence d’une distinction entre l’ouest du Bassin en relatif déficit sédimentaire et l’est en comblement, dans un environnement de type marais maritime (cf. *supra*, secteur Pertuis-Estuaire). Ce comblement naturel est à associer à une combinaison de facteurs d’ordres hydro-sédimentaires (apports alluvionnaires des cours d’eau, faible agitation) et biologiques (rôle de la végétation, dont les spartines qui ralentissent les courants de marais et favorisent ainsi les dépôts sédimentaires de l’ordre de 2 à 3 cm/an). Dans cette partie orientale, les sédiments sont essentiellement vaseux et sablo-vaseux, sauf dans les chenaux où les sables dominent.

A l’ouest, les puissants courants de chasse (légèrement supérieurs à 2 m/s au jusant, Plus et al., 2006) modifient la morphologie des bancs de sable et des chenaux. Cette partie du Bassin voit la proportion de fines diminuer d’est en ouest, pour ne plus exister aux abords des passes et des bancs, où des sables moyens et grossiers apparaissent.

L’artificialisation du trait de côte est quasi-totale sur les 122,5 km du pourtour du Bassin d’Arcachon (linéaire défini dans cette étude par digitalisation du trait de côte, selon une échelle fine de l’ordre du 1/2 000 intégrant les infrastructures portuaires, ouvrages, etc.). Les zones urbaines, poldérisées et portuaires sont omniprésentes.



*Illustration 7 - Bassin endigué et port sur la commune d’Arès au sein d’un environnement de type marais maritime (photo : ULM Sud Bassin, ©OCA 2017)***Côte rocheuse basque**

Le contexte géomorphologique général de la côte rocheuse est décrit dans les rapports des stratégies locales de gestion de la bande côtière des Agglomérations Côte Basque Adour et Sud Pays Basque (collectivités ayant fusionné en 2017 au sein de la nouvelle Communauté d'Agglomération Pays Basque), réalisées par le BRGM en 2014 (Garnier et Millescamps, 2014-a ; Garnier et Millescamps, 2014-b). Il est repris ci-après.

La côte rocheuse basque, longue d'environ 40,5 km se situe au sud-est du Golfe de Gascogne. Elle est limitée au nord par le Cap Saint-Martin (Anglet-Biarritz) et au sud par l'embouchure de la Bidassoa (Hendaye).

Le paysage évolue alors vers des falaises dominant des plages de fond de baie (situées entre deux caps rocheux). La hauteur de ces falaises varie entre 10 m et 70 m et leur pente entre 10° et 90°.

Jusqu'à la pointe Sainte-Barbe (commune de Saint-Jean-de-Luz), de petites criques découpent les falaises sub-verticales, atteignant jusqu'à 40 m de hauteur.

Plus au sud, les falaises sont interrompues par la baie de Saint-Jean-de-Luz. De Socoa à la Baie de Loya (Hendaye), les falaises constituent la Corniche Basque, dont les hauteurs varient entre 20 et 40 m.

La côte rocheuse basque évolue à la faveur des mouvements de terrains dont la typologie dépend du contexte géomorphologique (géologie, comportement mécanique et mode de dégradation). Les mouvements de terrains (chutes de blocs, éboulements et glissements de terrain essentiellement) sont responsables du recul du trait de côte, et sont irréversibles. Parmi les facteurs de déclenchement des mouvements de terrain, les circulations d'eau dans les massifs rocheux (fleuves et rivières côtiers, eaux souterraines et rejets anthropiques) et les dynamiques marines (altération des parois rocheuses, déblaiement des matériaux glissés/éboulés, sous-cavage, chocs mécaniques des vagues notamment) jouent un rôle prépondérant.

### **2.2.2. Environnements littoraux et contextes géomorphologiques associés à l'évolution du trait de côte**

Pour les besoins de cette étude visant à déterminer l'évolution future du littoral, l'identification des différents types d'environnements littoraux dans lequel évolue le trait de côte a été réalisée. Neufs types d'environnements ont été distingués sur le linéaire côtier de l'ensemble du secteur d'étude. Chacun de ces neuf types d'environnements correspond à un contexte géomorphologique particulier, avec une dynamique d'évolution qui lui appartient. Ils sont décrits ci-après et cartographiés dans l'Annexe 1.

#### ***Plages de poche***

La majorité des plages de poche rencontrées en Nouvelle-Aquitaine sont des plages sableuses formées entre deux caps rocheux. En effet, cette configuration particulière entraîne une diminution de l'énergie de la houle et favorise ainsi le dépôt de sédiments charriés par la dérive littorale et parfois même, par les rivières qui débouchent dans la baie. D'une manière générale, chaque plage de poche possède sa propre dynamique hydro-sédimentaire.

Les plages de poche sont particulièrement présentes dans l'estuaire de la Gironde et sur la côte basque (Illustration 8 et Illustration 9).



*Illustration 8 - Plages de poche de la pointe du Chay, commune de Royan (17)  
(fond photographique : ©IGN, 2014)*



*Illustration 9 - Plage de poche d'Erromardie, commune de Saint-Jean-de-Luz  
(photo : ULM Sud Bassin, ©OCA 2017)*

### **Cordon de galets**

Les cordons de galets se situent uniquement dans la zone Pertuis-Estuaire. Les galets se sont accumulés, sous l'action des vagues, au fond d'anciens golfes au fur et à mesure de la remontée du niveau marin depuis la fin de la dernière époque glaciaire, il y a 18 000 ans. Ils forment généralement un bourrelet topographique d'une puissance et d'une largeur limitées à quelques mètres. Sur le secteur étudié, ils isolent le plus souvent des zones de marais de l'océan. Il est également possible de trouver des accumulations de galets au pied de falaises rocheuses. Toutefois, sur le secteur d'étude, l'évolution du littoral au droit de ces cordons reste généralement liée à l'évolution de la falaise.

Les cordons de galets se déplacent à la faveur des épisodes d'agitation océanique suffisamment énergétiques pour les mobiliser. Le cordon effectue alors un « roulement » vers les terres. Ils sont alimentés par des matériaux anciens et récents issus du démantèlement des falaises ou des dalles calcaires présentes au sein de la même cellule hydro-sédimentaire.



*Illustration 10 - Cordon de galets en baie d'Yves (17)  
A noter la présence d'une digue en enrochement positionnée sur le cordon de galets  
(photographie ©BRGM, 2017)*

### **Cordon sableux**

De la même manière que les cordons de galets, les cordons sableux se sont formés, à la faveur de la remontée du niveau marin, par accumulation dans les anciens golfes. Ils occupent une partie du linéaire importante dans la zone des pertuis. Les cordons sableux forment par ailleurs la principale interface naturelle terre/océan dans le Bassin d'Arcachon.

Généralement étroits et peu puissants, les cordons sableux possèdent une dynamique d'évolution comparable à celle des cordons de galets. Déplacé sous l'action de la houle, le sable peut également être repris par le vent et emporté vers les terres.



*Illustration 11 - Cordon sableux du marais de Moëze (17) (photographie ©BRGM, 2017)*

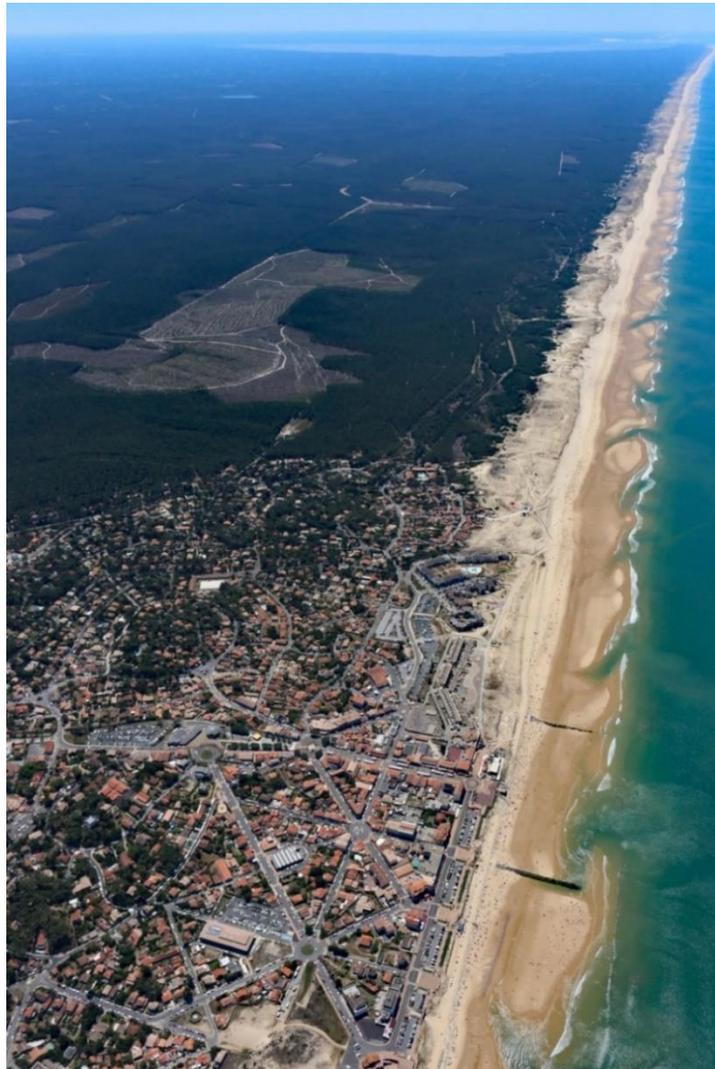


*Illustration 12 - Cordon sableux d'Andernos-les-Bains (33), fixé par un perré séparant la plage d'une promenade (photographie : ULM Sud Bassin, ©OCA 2017)*

### ***Dune littorale***

L'environnement de dunes littorales est un milieu de cordon sableux qui se distingue du précédent par ses dimensions, sa localisation en façade océanique ouverte, et sa dynamique d'évolution plus active que les cordons sableux précités. La largeur du cordon dunaire littoral d'est en ouest est généralement comprise entre 3 km et 7 km. La longueur du cordon en Gironde et dans les Landes est d'environ 230 km, interrompu par l'embouchure du Bassin d'Arcachon et les exutoires des courants landais.

La majeure partie du linéaire côtier sableux correspond ainsi à un milieu de dune littorale (Illustration 13). L'accumulation des sables sur la côte est due au vent, qui, depuis la fin de la dernière ère glaciaire (il y a environ 18 000 ans), associé à la remontée du niveau marin, pousse ces sédiments vers la côte. C'est à la fin de cette remontée, lorsque le niveau marin s'est globalement stabilisé autour de sa position actuelle, il y a environ 6 000 ans, que les plages contemporaines se sont formées. Sous les actions conjuguées de l'océan (houle, courant) et du vent, les sables se déplacent et modèlent la morphologie du littoral. Ce transport peut se faire perpendiculairement (transport cross-shore) ou parallèlement (dérive littorale) à la côte.



*Illustration 13 - Vue aérienne du cordon dunaire, de Lacanau au Cap Ferret  
(photographie : ULM Sud Bassin, ©OCA 2017)*

### **Marais maritime**

Les marais maritimes constituent des étendues littorales basses, très faiblement inclinées, périodiquement submergées, dues à des accumulations récentes de vase dans les secteurs abrités des côtes (Paskoff, 2006). D'un point de vue morphologique, la partie inférieure dépourvue de végétation du marais maritime est dénommée la *slikke*. Elle est inondée à chaque marée haute et de pente faible (1 à 3 ‰). La partie supérieure correspond au *schorre*, de pente très faible (inférieure à 1 ‰), colonisée par une végétation herbacée et inondée seulement lors des grandes marées.

Les marais maritimes se développent dans des secteurs globalement abrités de l'énergie de la houle, où la profondeur est faible, et dépendent essentiellement des courants de marée. Sur le littoral du bassin Adour-Garonne, les marais sont présents dans la zone inter-pertuis, dans l'estuaire de la Gironde et dans le Bassin d'Arcachon. Ces espaces sont généralement fortement artificialisés et peuvent être actuellement exploités pour la conchyliculture ou l'élevage. Des lacs et des tonnes ont par ailleurs été formés dans les marais du Bassin d'Arcachon, notamment pour la pratique de la chasse. Enfin, les marais maritimes se développent également en arrière des grandes flèches sableuses telles que la pointe de la Coubre et la flèche du Mimbeau.



*Illustration 14 - Marais maritime au Teich, Bassin d'Arcachon (33)  
(photographie : ULM Sud Bassin, ©OCA 2017)*

### **Flèches sableuses**

Les flèches sableuses se forment sous l'action d'un transport sédimentaire significatif, résultant d'une dérive littorale établie et d'une bonne disponibilité en sédiments en amont du courant de dérive. La faible profondeur autorise alors l'atterrissement des matériaux transportés.

Parmi les flèches sableuses les plus représentatives du bassin Adour-Garonne existent la pointe de la Coubre (Illustration 15) et la flèche du Mimbeau. Toutefois, de nombreuses petites flèches sont aussi présentes sur le littoral de Charente-Maritime ; elles se développent généralement à la faveur de changements relativement brutaux d'orientation du trait de côte, et où les trois conditions précitées sont réunies.

Les flèches sableuses du bassin Adour-Garonne ont une dynamique d'évolution particulièrement rapide en raison de leur extrémité située en aval dérive généralement libre.



*Illustration 15 - Pointe de la Coubre, presqu'île d'Arvert (17) (fond photographique : ©IGN, 2014) La zone abritée par la pointe et le continent est devenue un marais maritime.*

### **Grandes flèches sableuses**

Les grandes flèches sableuses ont été distinguées des flèches du chapitre précédent en raison d'une emprise spatiale et d'une dynamique d'évolution plus importantes. Elles se sont mises en place sous l'action d'une dérive littorale forte et d'une grande disponibilité en sédiments en amont de la dérive, dans un milieu océanique ouvert.

Les mouvements de sédiments à l'origine de la dynamique des grandes flèches sableuses s'effectuent sur des linéaires de plusieurs centaines de mètres le long du littoral. Le trait de côte peut évoluer perpendiculairement à la côte sur plusieurs dizaines de mètres chaque année.

Les grandes flèches sableuses du littoral Adour-Garonne identifiées dans cette étude sont la pointe de Gatseau au sud de l'Île d'Oléron et la pointe du Cap Ferret (Illustration 16). L'urbanisation de ces deux flèches diffère : la pointe de Gatseau est totalement naturelle, alors que la flèche du Cap Ferret est grandement urbanisée, depuis la frange forestière jusqu'à la façade interne du côté du Bassin d'Arcachon.



*Illustration 16 - Vue aérienne d'une grande flèche sableuse : la pointe du Cap Ferret  
(photographie : ULM Sud Bassin, ©OCA 2017)*

### **Falaise rocheuse**

Le contact entre l'océan et le continent s'effectue par des falaises rocheuses lorsque les formations géologiques du littoral sont particulièrement compétentes. C'est le cas des formations calcaires, marneuses, gréseuses du Jurassique (Pertuis-Estuaire), du Crétacé et du

Tertiaire (Pertuis-Estuaire et Côte rocheuse basque), qui composent la majorité des falaises côtières du bassin Adour-Garonne.

La géologie conditionne pour partie l'apparition de nombreux phénomènes naturels (glissements de terrain, chutes de blocs, éboulements...), regroupés sous le terme générique de « mouvements de terrain ». De nombreux facteurs géologiques interviennent à des degrés divers dans la dynamique des mouvements de terrain : la nature des roches (lithologie), leur fracturation, leur altération et leur perméabilité y jouent notamment des rôles importants.

Les facteurs de déclenchement des mouvements de terrain sont principalement liés à la circulation d'eau (altération chimique et mécanique, cycles de gel/dégel avec la température), qu'elle provienne de l'infiltration d'eau de surface ou d'origine aquifère. Les séismes ou encore les actions anthropiques peuvent également fragiliser les massifs et favoriser la mise en mouvement de masses rocheuses et de versants altérés.

Sur la côte, l'action marine constitue le second facteur principal de déclenchement des mouvements de terrain. Elle s'exprime par des phénomènes de dissolution et d'abrasion, produisant des cavités et des sous-cavages en pied de falaise. Les vagues provoquent, par ailleurs, des chocs mécaniques considérables sur les parois, et maintiennent une pente forte de l'escarpement, favorable aux instabilités, en déblayant en permanence le pied de falaise.

Les falaises rocheuses, hautes de 5 à 30 mètres sur le secteur étudié, peuvent être coiffées par de formations superficielles, sujettes aux glissements de terrain. Ces formations superficielles - altérites, alluvions, colluvions - sont surtout présentes sur la côte rocheuse basque.

Les côtes à falaises ont la particularité de ne posséder aucune résilience à moyen terme : leur évolution, généralement lente (inférieure à 1 m/an sur le secteur d'étude), est à sens unique : elles reculent.

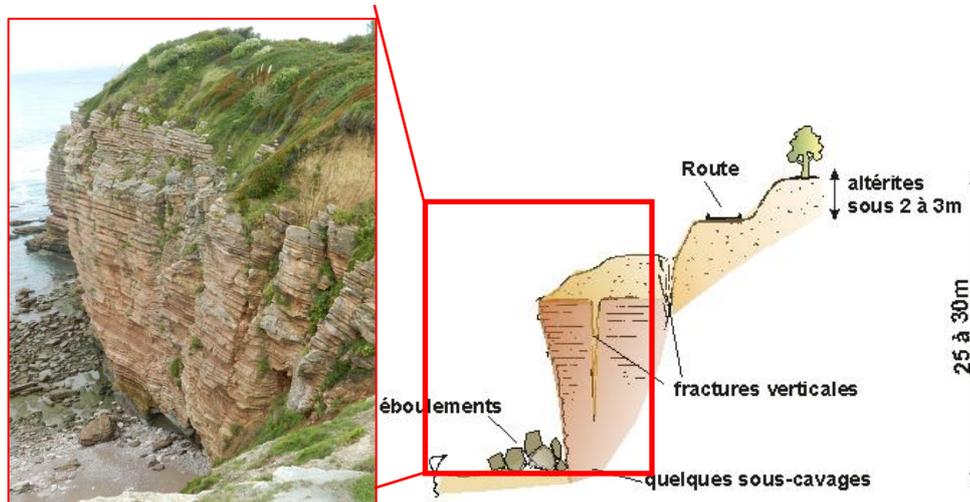


Illustration 17 - Gauche : éboulements au niveau de la pointe Sainte-Anne à Saint-Jean-de-Luz (© Observatoire de la Côte Aquitaine, octobre 2013) ; Droite : coupe schématique type (Nedellec et al., 2005)

### **Environnements artificiels : polders et ports**

Dans cette présente étude, deux aménagements humains modifiant la morphologie du trait de côte ont été retenus comme un type d'environnements artificiels : les ouvrages portuaires et la poldérisation des marais maritimes.

Les ouvrages portuaires consistent en la création d'un espace maritime abrité de la houle pour permettre l'amarrage de bateaux de plaisance, de pêche ou ostréicoles, et l'exercice des activités associées. De grands épis et quais, en béton et/ou en enrochements, sont ainsi érigés sur les fonds océaniques pour la construction de ports. Le trait de côte est alors fixé et n'évolue plus. Les digues portuaires de la zone Pertuis-Estuaire, du Bassin d'Arcachon, du Verdon (Illustration 18), de Capbreton, de l'Adour, de Saint-Jean-de-Luz (Socoa, Artha et Sainte-Barbe) et de la Bidassoa ont été conservées lors du tracé du trait de côte.



*Illustration 18 - Port du Verdon (33) (photographie : ULM Sud Bassin, ©OCA 2017)*

Les polders se situent - sur le secteur étudié - dans les marais maritimes du Bassin d'Arcachon et du secteur Pertuis-Estuaire. La plupart ont été mis en place par l'homme pour y développer des activités salicoles et agricoles : des vestiges de salines remontant à l'époque médiévale ont été révélées à Brouage (17) (Chaumillon *et al.*, 2010). Des digues, levées de terre ou enrochement d'une manière générale, isolent des bassins de l'océan. Ils sont uniquement connectés au travers d'écluses et de canaux qui permettent le renouvellement des eaux qu'ils contiennent. Ces actions favorisant l'accumulation des sédiments dans le marais, l'espace continental s'est alors étendu aux dépens de l'espace maritime. Plusieurs rangées de bassins depuis la mer vers la terre peuvent ainsi occuper le littoral sur des linéaires conséquents. C'est le cas par exemple des marais de Moëze et de Brouage (Illustration 19).

Pour ces environnements artificiels où le trait de côte est fixé par des ouvrages, l'évolution du littoral a été appréciée selon une hypothèse d'absence de ces aménagements (cf. chapitre 3.4.2 traitant de cet aspect).



*Illustration 19 - Vue aérienne partielle du marais de Brouage (17) (orthophoto ©IGN, 2014)*



### 3. Caractérisation de la sensibilité du littoral du bassin Adour-Garonne au recul du trait de côte à l'horizon 2050

#### 3.1. DEFINITION DU TRAIT DE COTE

La notion de trait de côte diffère selon les usages et organismes. L'illustration 20 (Mallet *et al.*, 2012) résume les principaux indicateurs du trait de côte existants en France métropolitaine.

Pour correspondre aux besoins de la présente étude, la définition de trait de côte répond à des critères géomorphologiques permettant de faciliter la cartographie des limites terre-océan en Nouvelle-Aquitaine à partir d'observations et de mesures de terrain, de l'analyse et de l'interprétation d'images aériennes ou spatiales.

Sur les différents secteurs d'étude, le trait de côte a ainsi été défini comme suit :

- Pour la côte sableuse, séparation entre la dune et la plage, correspondant selon la configuration géomorphologique à l'un et/ou l'autre des indicateurs suivants :
  - pied de falaise dunaire,
  - rupture de pente topographique,
  - limite de végétation dunaire,
  - ouvrage de protection longitudinal,
- Pour la côte rocheuse, séparation entre la falaise et l'estran, correspondant selon la configuration géomorphologique à l'un et/ou l'autre des indicateurs suivants :
  - tête de falaise rocheuse,
  - ouvrage de protection longitudinal,
  - ou en fond de baie aux mêmes indicateurs que pour la côte sableuse : pied de falaise dunaire, rupture de pente topographique, limite de végétation,
- Concernant les pertuis charentais et le Bassin d'Arcachon, les indicateurs du trait de côte dépendent de l'environnement littoral dans lequel il évolue :
  - indicateurs précités dans les secteurs de côte sableuse et de falaises rocheuses,
  - pied du cordon côte océan (rupture de pente topographique) en présence d'un cordon de galets ou sableux,
  - limite supérieure du schorre dans les marais maritimes,
  - limite côté océan des aménagements (pied des ouvrages) sur les côtes artificialisées.

Milieu	Indicateurs de trait de côte fréquemment utilisés	Classe/type
Tous types de plages et dunes (côte sableuse, galets, plage corallienne...)	ligne correspondant à l'altitude d'une basse mer moyenne	altimétrique
	ligne correspondant à l'altitude d'une pleine mer moyenne	altimétrique
	ligne de débris (trace de tempête passée)	hydrodynamique
	résurgence d'eau sur la plage	hydrodynamique
	laisse de mer	hydrodynamique
	limite sable mouillé/sec	hydrodynamique
	limite de jet-de-rive	hydrodynamique (instantané ou non)
	ligne d'eau instantanée	hydrodynamique (instantané)
	première barre d'avant-côte	géomorphologique
	berme	géomorphologique
	talus de collision (côte microtidale)	géomorphologique
	ped de dune	géomorphologique
	crête de dune	géomorphologique
	abrupt	géomorphologique
limite de végétation pionnière	botanique	
limite côté mer de végétation pérenne dunaire	botanique	
Côte à falaise rocheuse	ligne correspondant à l'altitude d'une basse mer moyenne	altimétrique
	ligne correspondant à l'altitude d'une pleine mer moyenne	altimétrique
	ligne de débris (trace de tempête passée)	hydrodynamique
	laisse de mer	hydrodynamique
	limite sable mouillé/sec	hydrodynamique
	encoche basale	géomorphologique
	ped de falaise	géomorphologique
	sommet de falaise	géomorphologique
	rupture de pente topographique	géomorphologique
	limite supérieure du cône d'éboulis	géomorphologique
	limite inférieure de végétation terrestre	botanique
partie supérieure de la ceinture grise à cyanobactéries	botanique	
limite supérieure du lichen marin noir	botanique	
Marais maritime	laisse de mer	hydrodynamique
	ligne de débris (trace de tempête passée)	hydrodynamique
	limite supérieure du schorre	géomorphologique et botanique
	limite supérieure de la slikke	géomorphologique et botanique
Marais à mangrove	limite de front de mangrove	géomorphologique et botanique
	limite d'arrière-mangrove	géomorphologique et botanique
Côte artificialisée (ouvrages en l'absence de plages)	limite côté mer de l'aménagement	géomorphologique
	limite côté terre de l'aménagement	géomorphologique
	sommet des ouvrages	géomorphologique

Illustration 20 - Principaux indicateurs du trait de côte (Mallet et al., 2012)

### 3.2. TRAIT DE COTE DE REFERENCE

Les données créées dans l'étude de l'Observatoire de la Côte Aquitaine (Bernon *et al.*, 2016) ont été exploitées : le trait de côte de référence de la côte sableuse et de la côte rocheuse basque (Illustration 2) correspondent au trait de côte de 2014. Deux étapes ont été mises en œuvre pour réaliser cette cartographie :

1/ Photo-interprétation sous ArcGIS v.10.2.2 (®Esri) du trait de côte sur les orthophotographies expresses 2014 (©IGN, OCA), calage avec les données DGPS et LiDAR 2014 (©IGN, OCA) ;

2/ Travail géomatique de vérification de la topologie, de manière à créer une polyligne uniforme, uniquement séparée en différents tronçons au niveau des barrières naturelles (Bassin d'Arcachon, courants landais).

Sur le littoral de la zone Pertuis-Estuaire, la principale information utilisée pour déterminer la position du trait de côte est l'orthophotographie de 2014, mise à disposition par l'IGN via la plateforme PIGMA (<https://www.pigma.org/portail/>). D'autres informations, telles que la BD Alti®, Google Earth®, mais aussi les traits de côte digitalisés par l'ONF et la CARA (Communauté d'Agglomération Royan Atlantique) se sont révélées utiles pour déterminer avec précision les différents marqueurs du trait de côte et leurs positions.

Sur la façade girondine de l'estuaire, le trait de côte a été digitalisé sur l'Ortho-Littorale V2 - MEDDE (Source ©MEDDE). Il s'agit de la donnée la plus récente disponible sur ce secteur, la prise de vue date de 2013.

Le SIBA (Syndicat intercommunal du Bassin d'Arcachon) a mis à disposition du BRGM une orthophotographie et un levé LiDAR de 2016, sur l'ensemble du Bassin. Ces deux informations ont permis de définir la position du trait de côte à cette date. Le trait de côte a été identifié et tracé à dire d'expert en croisant les informations suivantes : les indicateurs précités (pied des ouvrages côté océan, limite supérieure du *schorre*, pied de dune) numérisés sur l'orthophotographie et l'isocote altimétrique correspondant à la PHMA (Plus Haute Mer Astronomique, à savoir 2,93°m/NGF selon les RAM du SHOM de 2016) extraite du LiDAR.

Pour ces deux derniers secteurs géographiques, la digitalisation du trait de côte a été réalisée dans le cadre de cette étude.

Ces données récentes et de haute résolution utilisées pour déterminer les traits de côte de référence de 2013-2014 (« Pertuis-Estuaire»), de 2014 (« Côte sableuse » et « Côte rocheuse basque ») et de 2016 (« Bassin d'Arcachon ») conduisent à estimer l'incertitude sur leurs positions à 5 mètres près.

A l'exception du court linéaire de la façade estuarienne de la pointe du Verdon, les traits de côte ont été réalisés à partir de données acquises après la saison hivernale 2013/2014 ; ils intègrent donc les processus érosifs induits par la succession des tempêtes 2013/2014.

### 3.3. CAS DES ESTUAIRES

L'évolution des côtes et des morphologies littorales est conditionnée par des agents dynamiques météo-marins, également appelés facteurs de forçage (Cowell et Thom, 1994). Ils sont notamment responsables de l'érosion, du transport et du dépôt des sédiments présents sur le littoral. Ce sont eux qui façonnent les morphologies côtières. Ces facteurs de forçage sont le

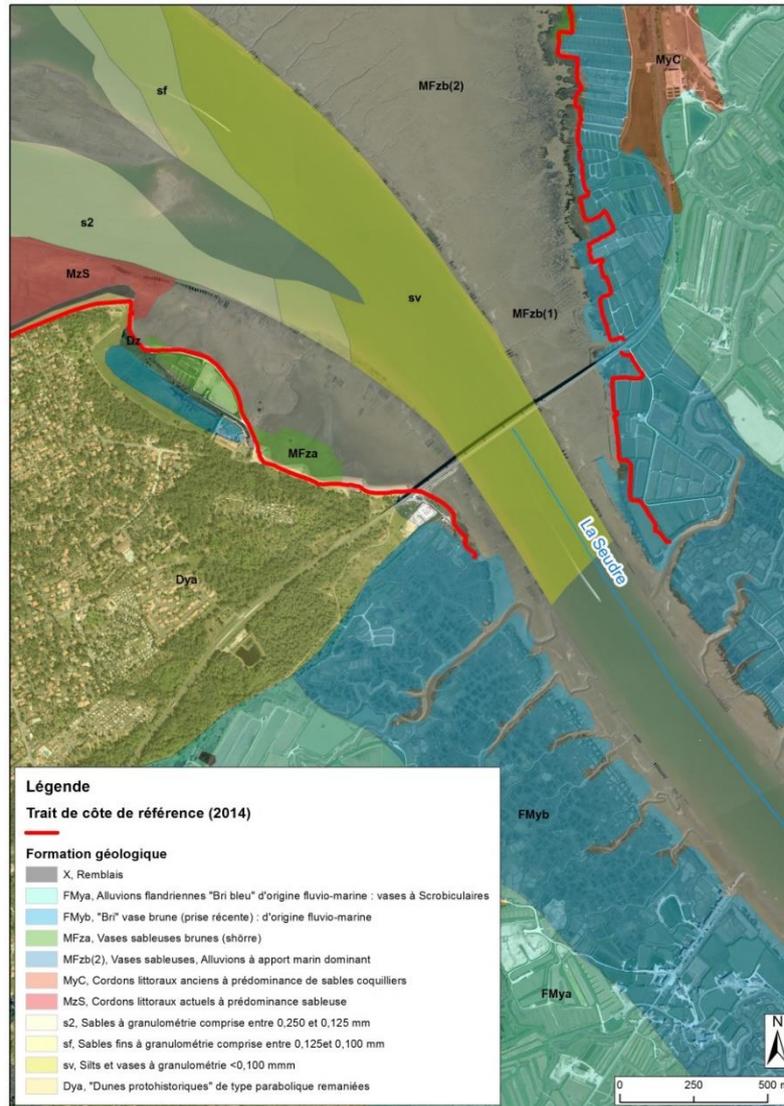
vent, la marée, les vagues et plus globalement les variations du niveau de l'eau à différentes échelles temporelles (de la marée aux variations climatiques séculaires).

Dans le cas des estuaires, il a été recherché, pour cette étude, la limite d'influence des facteurs météo-marins, lorsque la dynamique fluviale devient dominante sur l'interface terre-eau. A partir des données disponibles, deux critères permettent de la reconnaître : un critère géomorphologique et un critère géologique. Le recours à l'expertise, étayée par des visites de terrain, a parfois été nécessaire.

La nature des sédiments, mobilisés par les agents dynamiques, peut être considérée comme un indicateur de la transition entre le « trait de côte » et la « berge d'un cours d'eau ». La limite de pénétration des sables marins dans une embouchure par exemple, a permis d'identifier le passage d'une dynamique marine dominante à une dynamique fluviale dominante.

D'un point de vue géomorphologique, il est possible de repérer les secteurs où la dynamique fluviale est prépondérante à partir de la morphologie du lit du cours d'eau. Il a été considéré que des berges qui forment le lit mineur (par exemple parallèles au lit mineur sur l'illustration 21) révèlent un milieu où l'hydraulique fluviale est le principal agent qui façonne l'interface terre-eau.

L'estuaire de La Seudre (17) regroupe ces deux cas de figures où la transition trait de côte - berges d'un cours d'eau a été ainsi identifiée (Illustration 21).



*Illustration 21 - Identification de la transition entre le trait de côte et la berge de cours d'eau à l'aide des données géomorphologiques et géologiques (Carte géologique au 1/50000, feuille n°681, BRGM). Ici, le trait de côte est arrêté lorsqu'il recoupe des formations fluvio-marines et lorsque les berges sont parallèles à la direction d'écoulement de La Seudre.*

### 3.4. CONSIDERATION DES OUVRAGES COTIERS

#### 3.4.1. Types d'ouvrages

La grande diversité des milieux côtiers néo-aquitains et les multiples usages de l'espace littoral ont mené à la création d'ouvrages de protection très variés. Il est possible dans un premier temps de distinguer les ouvrages longitudinaux (parallèles au trait de côte) - tels que les digues et les perrés par exemple -, des ouvrages transversaux (perpendiculaires au trait de côte) parmi lesquels les épis et les jetées sont les plus représentatifs sur le littoral de Nouvelle-Aquitaine. Les photos de l'illustration 22, de l'illustration 23 et de l'illustration 24 exposent des exemples de ces différents ouvrages côtiers.



*Illustration 22 - Exemple d'ouvrage longitudinal : digue en enrochement en baie d'Yves (17)  
(photographie ©BRGM 2017)*



*Illustration 23 - Exemples d'ouvrage transversal : épis sur le front de mer de Montalivet (33)  
(photographie ULM Sud Bassin, ©OCA 2017)*

Enfin, une troisième catégorie concerne particulièrement les parois rocheuses, dont la stabilité peut être renforcée par des parades géotechniques actives telles que les ancrages, grillages plaqués, soutènements... Il est à noter que ces ouvrages ne sont généralement pas visibles sur les orthophotographies.



Illustration 24 - Exemple de parade active sur une falaise rocheuse : soutènement maçonné à la pointe de Suzac (17) (photographie ©BRGM, 2017)

Les données consultées, faisant état de la présence d'ouvrages côtiers, sont les suivantes :

- fichier de forme shapefile développé par la Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Charente-Maritime (DDTM17), disponible via la plateforme PEGASE (<http://www.pegase-poitou-charentes.fr/>) en avril 2017. Elle recense les ouvrages de défense contre la mer sur le département. La date de dernière mise à jour de cette couche était alors de janvier 2017 ;
- BD Ouvrages, disponible à l'Observatoire de la Côte Aquitaine. Elle recense et géolocalise des ouvrages présents sur les côtes de l'ex-Aquitaine (côte sableuse, côte rocheuse basque et Bassin d'Arcachon). La principale mise à jour, avec notamment un recensement des ouvrages par photo-interprétation, date de 2013 ;
- des ouvrages identifiés dans l'étude relative à l'aléa submersion marine dans le Bassin d'Arcachon (Mugica *et al.*, 2016) ;
- BD Ouvrages, créée dans le cadre des stratégies locales de gestion de la bande côtière des Agglomérations Côte Basque Adour et Sud Pays Basque, réalisées par le BRGM en 2014 (Garnier et Millescamps, 2014-a ; Garnier et Millescamps, 2014-b). Elle ne concerne que la côte rocheuse basque.

Ces données ont pu être actualisées localement lors de la digitalisation du trait de côte sur la base de la connaissance de l'opérateur.

Enfin, il faut noter que ces bases de données ne recensent pas les actions de lutte active souples effectuées par les collectivités ou l'ONF sur le littoral, telles que les rechargements en

sable, les reprofilages ou la gestion des dunes. Ces opérations de gestion sont fréquentes au droit des stations balnéaires et dans les plages de poche.

Bien qu'hétérogènes et potentiellement incomplètes, l'utilisation de ces données reste pertinente à l'échelle régionale. L'illustration 25 fournit à l'échelle du bassin Adour-Garonne la nature du littoral, en distinguant les linéaires littoraux aménagés de ceux évoluant naturellement.

A cette échelle, les aménagements du littoral sont inégalement répartis. Le trait de côte du Bassin d'Arcachon apparaît le plus fixé par des ouvrages. Les prés salés d'Arès forment le milieu naturel le plus conséquent de ce secteur. Dans la zone Pertuis-Estuaire, les dunes littorales de la presqu'île d'Arvert et d'Oléron évoluent naturellement. A l'inverse, les vastes zones de marais maritimes, présentes essentiellement dans le secteur abrité entre l'île d'Oléron et le continent, sont les plus ouvragées. La côte rocheuse basque est également fortement aménagée (à noter la présence importante de parades actives en falaise en plus des ouvrages longitudinaux) ; les tronçons côtiers naturels les plus importants se situent à Bidart, Guéthary et Urrugne (corniche).

A l'inverse, seuls environ 10% du littoral de la côte sableuse sont durcis par des ouvrages côtiers. Ces aménagements se situent quasi-exclusivement au droit des stations balnéaires girondines et landaises.

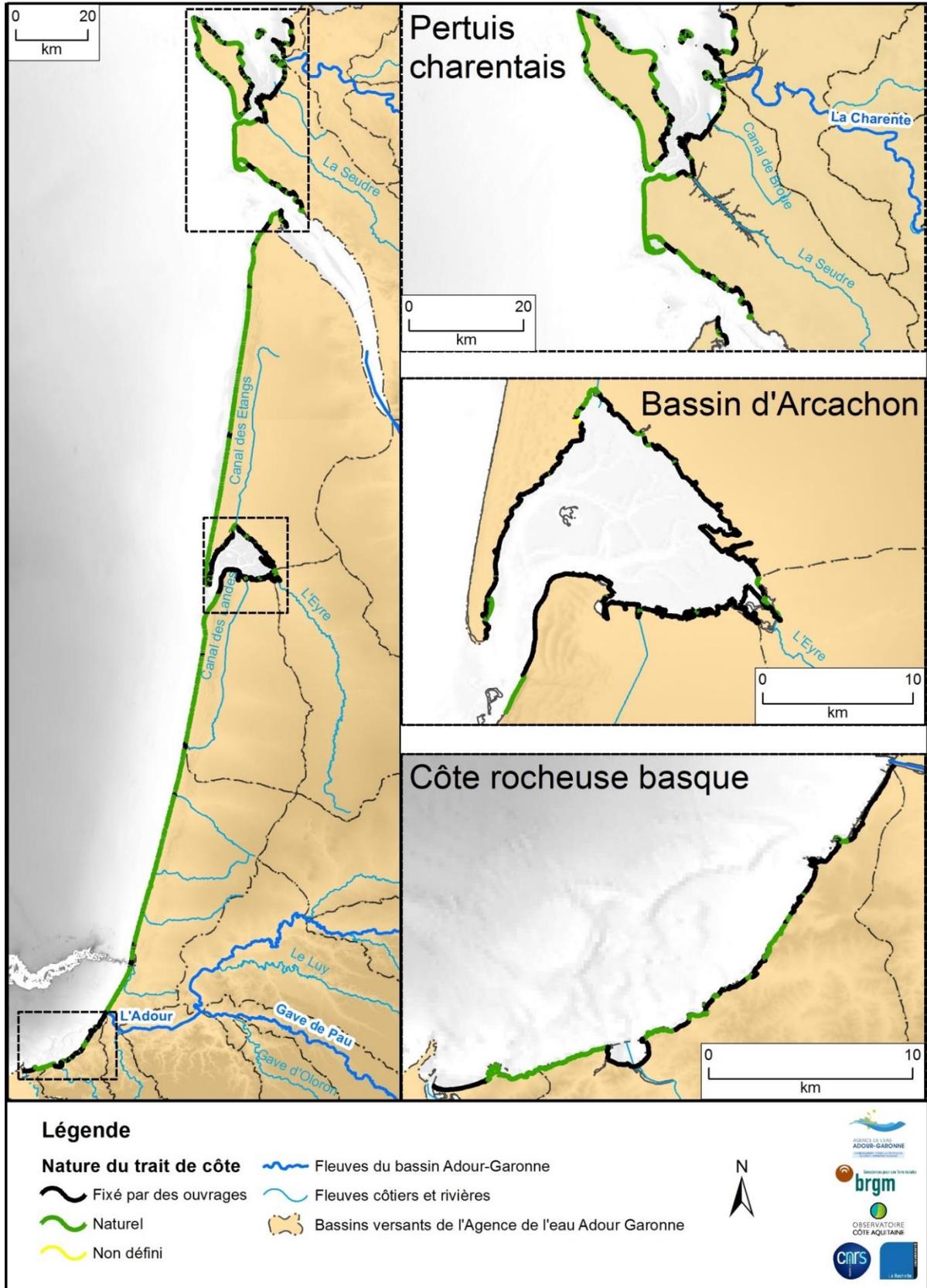


Illustration 25 - Présence/absence d'ouvrages sur le trait de côte étudié

### 3.4.2. Hypothèses relatives aux traits de côte de référence et leurs évolutions

Concernant la côte sableuse et la côte rocheuse basque, les traits de côte de référence ont été réalisés selon une hypothèse d'effacement des ouvrages. Pour ce faire, les préconisations du guide d'élaboration PPRL de 2014 (MEDDE) d'une part, et l'expertise sur une position virtuelle « naturelle » du trait de côte en l'absence d'ouvrage d'autre part, ont été prises en compte lors du tracé du trait de côte. Il s'agit par exemple, sur la côte sableuse, d'un réalignement du trait de côte en fonction de sa position de part et d'autre de l'ouvrage, possible lorsque le linéaire concerné par la fixation est relativement court (Illustration 26, à gauche). Sur la côte rocheuse, les ouvrages ont généralement été effacés en considérant le sommet de falaise/versant lorsque des protections en pied ou en paroi existent (Illustration 26, à droite).



Illustration 26 - Effacement des ouvrages côtiers (à gauche : côte sableuse, Montalivet ; à droite : côte rocheuse basque, Biarritz) (fond photographique : ©IGN, OCA, 2014)

Ces analyses sur la prise en compte des ouvrages ont été permises dans le cadre des études de stratégies locales et régionale de gestion de la bande côtière réalisée en ex-Aquitaine. Cependant, le littoral du Bassin d'Arcachon et une grande partie du secteur Pertuis-Estuaire sont lourdement aménagés. Les enjeux à protéger et les activités économiques, liés notamment à la nature de ces milieux côtiers, ont en effet conduit à la mise en œuvre d'ouvrages sur des linéaires parfois conséquents, et datant pour certains de plusieurs siècles. Dans ces conditions, définir une position « naturelle » du trait de côte devient hasardeux, la connaissance d'un état de la côte avant l'existence des ouvrages étant difficilement accessible.

Pour ces deux milieux, il a donc été décidé de positionner le trait de côte au pied des ouvrages longitudinaux (Illustration 27 et Illustration 28). Les ouvrages transversaux ont cependant été effacés par réalignement du trait de côte de part et d'autre de l'ouvrage.

Afin toutefois de respecter une hypothèse d'évolution « sans ouvrage » pour ces deux derniers environnements, et à l'instar de ce qui a été réalisé sur les côtes sableuse et rocheuse basque, l'évolution du trait de côte est déterminée en considérant l'absence des ouvrages, à dire d'expert. Ainsi, pour les portions du littoral aux configurations géologique, géomorphologique et géographique comparables, les dynamiques d'évolution définies sur les secteurs non aménagés sont transposées sur les secteurs fixés.



*Illustration 27 - Quartier ostréicole et digue du lycée de la mer, Gujan-Mestras (33)  
(orthophotographie ©SIBA, 2016)*



*Illustration 28 - Polder de Charente-Maritime : marais de Brouage (fond photographique ©IGN, 2014)*

### 3.5. DETERMINATION DE LA SENSIBILITE DU LITTORAL AU REcul DU TRAIT DE COTE

#### 3.5.1. Définition et caractérisation de l'aléa recul du trait de côte

L'aléa « recul du trait de côte » a fait l'objet d'une description détaillée dans le « Guide méthodologique : plan de prévention des risques littoraux » réalisé par la Direction Générale de la Prévention des Risques en 2014 (MEDDE). Les principales recommandations pour la caractérisation de cet aléa ont été suivies dans cette étude. Elles l'avaient été également dans les travaux de l'OCA en 2016 (Bernon *et al.*, 2016).

Le guide fournit la définition suivante : « Le recul du trait de côte est le déplacement vers l'intérieur des terres de la limite entre le domaine marin et le domaine continental ». Il recommande de caractériser l'aléa en distinguant deux échelles de temps : une évolution à long terme de cette limite, et une évolution ponctuelle. Deux paramètres sont alors utilisés pour rendre compte de ces deux échelles temporelles : le taux d'évolution ( $T_x$ ) pour l'évolution à long terme, et le recul lié à un évènement majeur ( $L_{max}$ ) pour l'évolution ponctuelle. Ils s'ajoutent et déterminent ainsi une distance  $L_r$  sur  $n$  années selon la formule :

$$L_r = n T_x + L_{max}$$

Les taux d'évolutions de la côte sont issus de l'analyse des tendances d'évolution passées et s'expriment en mètres par an. Une analyse statistique sur les positions historiques du trait de côte (Illustration 29) est préconisée, dans l'objectif de fournir un taux moyen d'évolution annuel sur une période d'observation de plusieurs décennies.

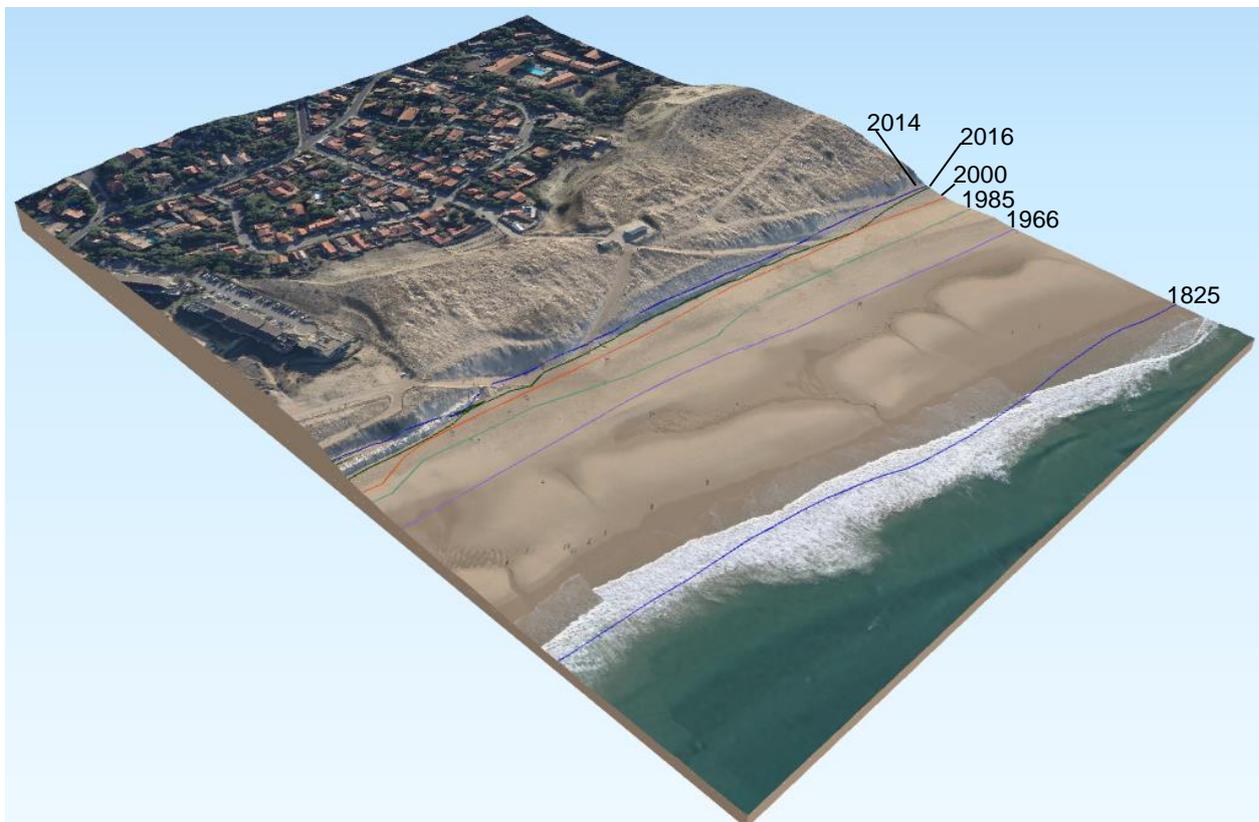


Illustration 29 - Positions historiques du trait de côte au sud de Lacanau (©OCA, 2017)

Un évènement majeur correspond à un phénomène susceptible de provoquer un recul instantané de la côte. Il s'agit généralement d'une ou plusieurs tempêtes, ou encore d'un éboulement ou d'un glissement de terrain sur les côtes à falaises rocheuses. Deux méthodes visant à estimer les reculs liés à un évènement majeur sont proposées dans le guide méthodologique pour l'élaboration des PPRL (MEDDE, 2014) : les observations à la suite d'un évènement et l'application de formules empiriques.

Enfin, il convient de distinguer les différentes dynamiques d'évolution du littoral qui dépendent du contexte géomorphologique du site étudié et de l'exposition aux agents météo-marins. Par exemple, les côtes basses meubles peuvent reculer assez rapidement et de façon chronique mais possèdent une certaine résilience, alors que les côtes à falaises reculent lentement (quelques centimètres par an en général) mais de façon irréversible. L'exposition des façades océaniques ouvertes aux houles énergétiques de nord-ouest sont également à distinguer des zones plus abritées situées dans le secteur Pertuis-Estuaire ou encore dans le Bassin d'Arcachon par exemple.

### **3.5.2. Détermination des taux d'évolution du trait de côte et des valeurs de recul lié à un évènement majeur**

Les données produites sur la côte sableuse et la côte rocheuse basque dans le cadre de l'étude de Bernon *et al.* (2016), ont été réutilisées. La bibliographie et les données existantes ont été collectées sur les secteurs Pertuis-Estuaire et du Bassin d'Arcachon. Une attention particulière a été portée quant à l'homogénéisation des techniques et méthodes entre ces différents environnements, ainsi qu'à la cohérence des résultats à l'échelle régionale.

#### ***Pertuis-Estuaire***

Pour ce secteur, la bibliographie existante collectée et traitant du recul du trait de côte est la suivante :

- E. Chaumillon, A. Bigot (2016) - Etude des évolutions morphologiques interannuelles et séculaires de 37 plages de Charente - Maritime (année 2016). 27 p., 36 ann.
- J. Gaudefroy, E. Chaumillon (2017) - Etude des évolutions morphologiques décennales et séculaires de 37 plages de Charente - Maritime. Mémoire de stage, 29 p., 1 ann.
- F. Bliard, X. Bertin (2016) - Evolution pluri-décennale des littoraux adjacents au pertuis de Maumusson (Charente - Maritime). Mémoire de stage, 60 p., 3 ann.
- SOGREAH (2010) - Elaboration d'un document « Eléments de mémoire et retour d'expérience de l'évènement XYNTHIA, Atlas cartographiques. 86 planches.
- BRL Ingénierie (2013) - Révision du plan de prévention des risques naturels de l'île d'Oléron - PHASE 4 : Quantification des aléas. 16 p.
- ARTELIA (2016) - Etude des aléas et enjeux du bassin de la Seudre et des marais de Brouage : 6 cartes des évolutions du trait de côte et du taux d'érosion par tronçons
- Communauté d'Agglomération Royan Atlantique (2014) - Observatoire de la côte royannaise : Etude du trait de côte Hiver 2013/2014. 49 p.

Par ailleurs, certains organismes ont transmis au BRGM des informations géographiques qui ont permis d'évaluer le recul du trait de côte sur certaines portions du littoral de ce secteur :

- ONF Pays de Loire - Couche SIG contenant la limite du pied de dune ou de végétation vivace de 2013, 2014 et 2015 sur les dunes littorales d'Oléron et de la presqu'île d'Arvert. Technique de levé : DGPS ;

- Communauté d'Agglomération Royan Atlantique - Couche SIG contenant des traits de côte historiques de la presqu'île d'Arvert entre 1999 et 2016 (indicateur : hautes mers par coefficient de marée supérieur à 100) ;
- Communauté d'Agglomération Royan Atlantique - Orthophotographie de 1950.

Ces divers rapports et documents cartographiques ont été consultés afin de déterminer, pour chaque portion homogène du littoral, des valeurs de taux d'évolution et de reculs liés à un événement majeur. Les données établies dans des rapports d'études ont été généralement reprises. Lorsque plusieurs sources fournissent des valeurs différentes sur un même tronçon, une appréciation à dire d'expert des valeurs représentatives a été réalisée.

Par ailleurs, ces informations ne couvrent pas la totalité du territoire de cette étude. Le recours à l'expertise a permis de fournir des valeurs de taux d'évolution et de recul lié à un événement majeur, en s'appuyant notamment :

- sur la connaissance des contextes géologiques, géomorphologiques et des agents météorologiques auxquels ils sont exposés ;
- sur les orthophotographies anciennes et récentes (<https://remonterletemps.ign.fr>) ;
- sur les visites de terrain.

Enfin, le laboratoire LIENSs de l'Université de la Rochelle a effectué un contrôle sur les données créées sur la base de son expertise locale.

La zone Pertuis-Estuaire possède des singularités par rapport aux autres secteurs : son littoral est parsemé d'ouvrages, et parfois depuis plusieurs décennies. Dans ces conditions, définir une évolution naturelle du trait de côte est délicat. Les valeurs de  $T_x$  et de  $L_{max}$  connues alors sur un secteur aux caractéristiques comparables (géomorphologie, géologie, exposition aux agents météorologiques-marins) ont été reportées sur les portions aménagées.

Les cartes de l'illustration 30 et de l'illustration 31 indiquent les valeurs de  $T_x$  et  $L_{max}$  retenues sur la zone Pertuis-Estuaire.

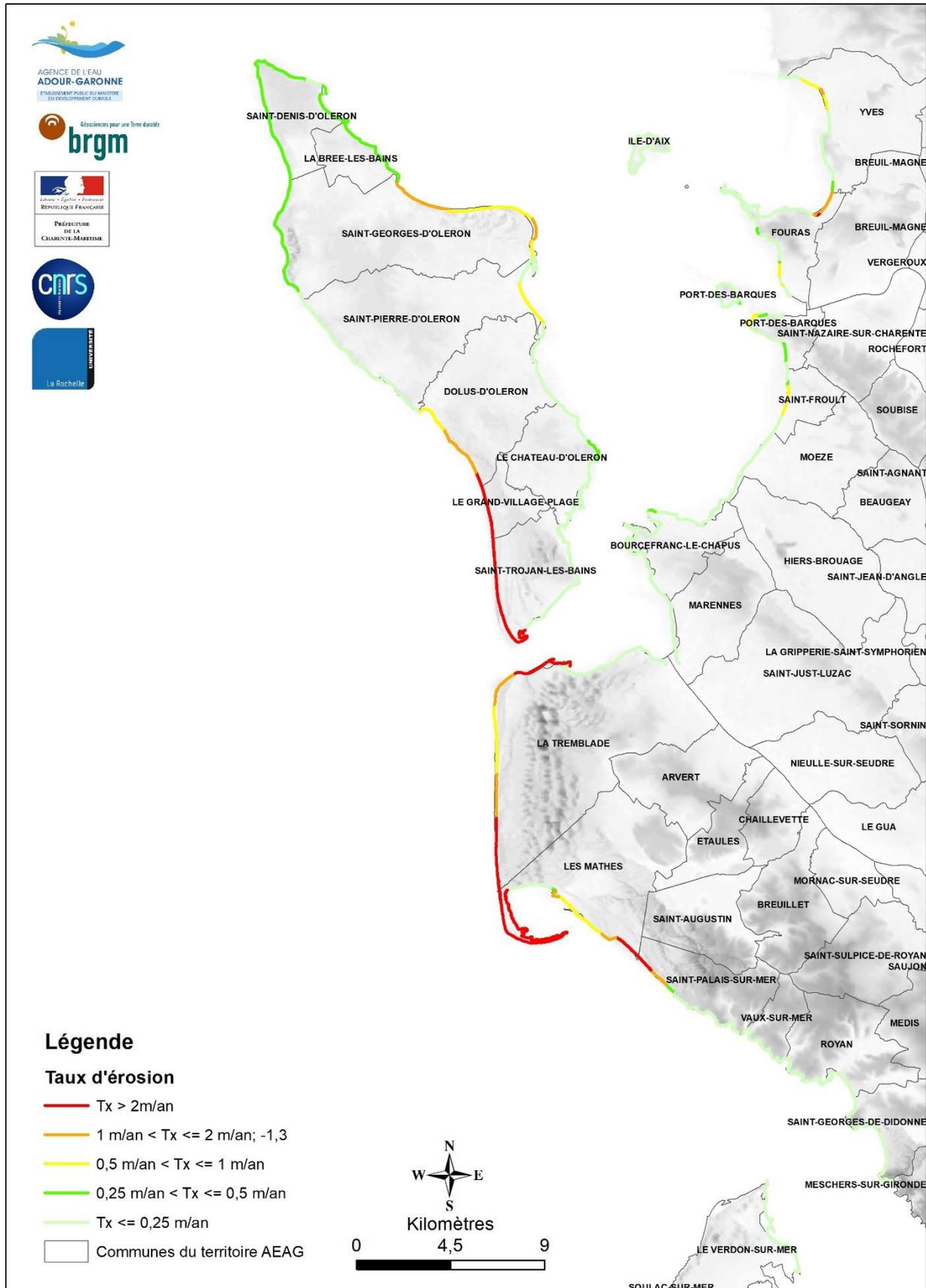


Illustration 30 - Taux d'évolution annuels moyens sur le littoral de la zone Pertuis-Estuaire

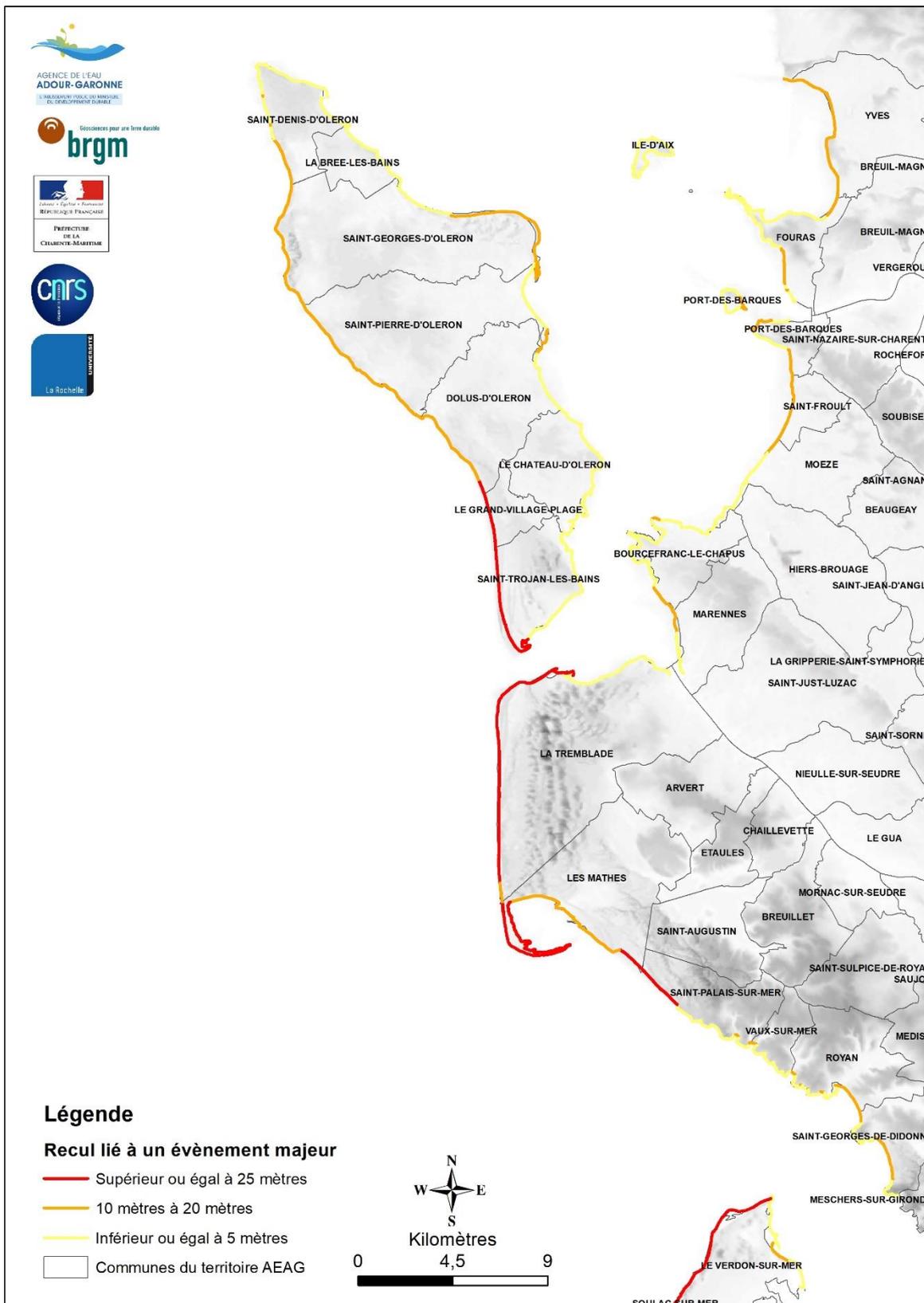


Illustration 31 - Reculs liés à un évènement majeur sur le littoral de la zone Pertuis-Estuaire

## Côte sableuse

### • Taux d'évolution

Cette portion du littoral a été étudiée dans le cadre de la caractérisation de l'aléa recul du trait de côte sur le littoral de la côte aquitaine aux horizons 2025 et 2050 (Bernon *et al.*, 2016).

Les taux d'évolution ont été déterminés par l'analyse statistique sur les positions historiques du trait de côte. Neuf traits de côte sur la période 1985 – 2014, disponibles dans la base de données de l'OCA, ont été utilisés :

- **1985 - 1998 - 2000** (©ORTHOLITTORALE 2000) : Photo-interprétation de photographies aériennes - *Incertitude estimée à 10 m* ;
- **2006** : Levé DGPS sur l'ensemble de la côte sableuse aquitaine, réalisé en avril 2006 (précision centimétrique) - *Incertitude estimée à 5 m* ;
- **2007 - 2008** : Analyse d'images spatiales FORMOSAT 2 et photo-interprétation - *Incertitude estimée à 5 m* ;
- **2009** : Photo-interprétation de l'ortho-photo IGN (Source : ©IGN, GIP ATGeRI) - *Incertitude estimée à 5 m* ;
- **2011** : Photo-interprétation de l'Ortho Littorale V2 - MEDDE (Source : ©MEDDE) - *Incertitude estimée à 5 m* ;
- **2014** : Photo-interprétation de l'ortho-photo IGN + LiDAR (Source : ©IGN, OCA 2014) - *Incertitude estimée à 5 m*.

Pour le calcul des taux d'évolution, l'outil DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) exploitable sous ArcGIS® effectue plusieurs méthodes statistiques sur les distances entre les positions historiques du trait de côte et une ligne fixe, à intervalles de distance réguliers. Sur le linéaire de la côte sableuse, un taux d'évolution a ainsi été déterminé tous les 100 mètres. Une intervention à dire d'expert sur les résultats statistiques bruts fut indispensable pour harmoniser les résultats et introduire la connaissance du fonctionnement du littoral. L'ensemble de la méthode est détaillé dans le rapport de l'étude. L'illustration 32 présente le résultat.

### • Recul lié à un évènement majeur

Sur la côte sableuse, les évènements majeurs provoquent l'attaque du pied de dune. L'ensemble de la côte sableuse est exposé aux évènements majeurs, à des degrés variables en fonction notamment de l'orientation du trait de côte, mais aussi de la disponibilité en sédiments sur la plage.

Le dernier évènement particulièrement énergétique survenu sur la côte aquitaine est l'épisode de tempêtes de l'hiver 2013/2014. Cette succession de tempêtes entre décembre 2013 et mars 2014 a été étudiée par l'Observatoire de la Côte Aquitaine (Bulteau *et al.*, 2014), où le caractère exceptionnel de cette succession de tempêtes a été démontré en raison essentiellement de leurs durées cumulées.

Adapté pour définir le recul lié à un évènement majeur, les reculs observés à la suite de cet évènement ont été affectés sur le littoral de la côte sableuse (Illustration 33).

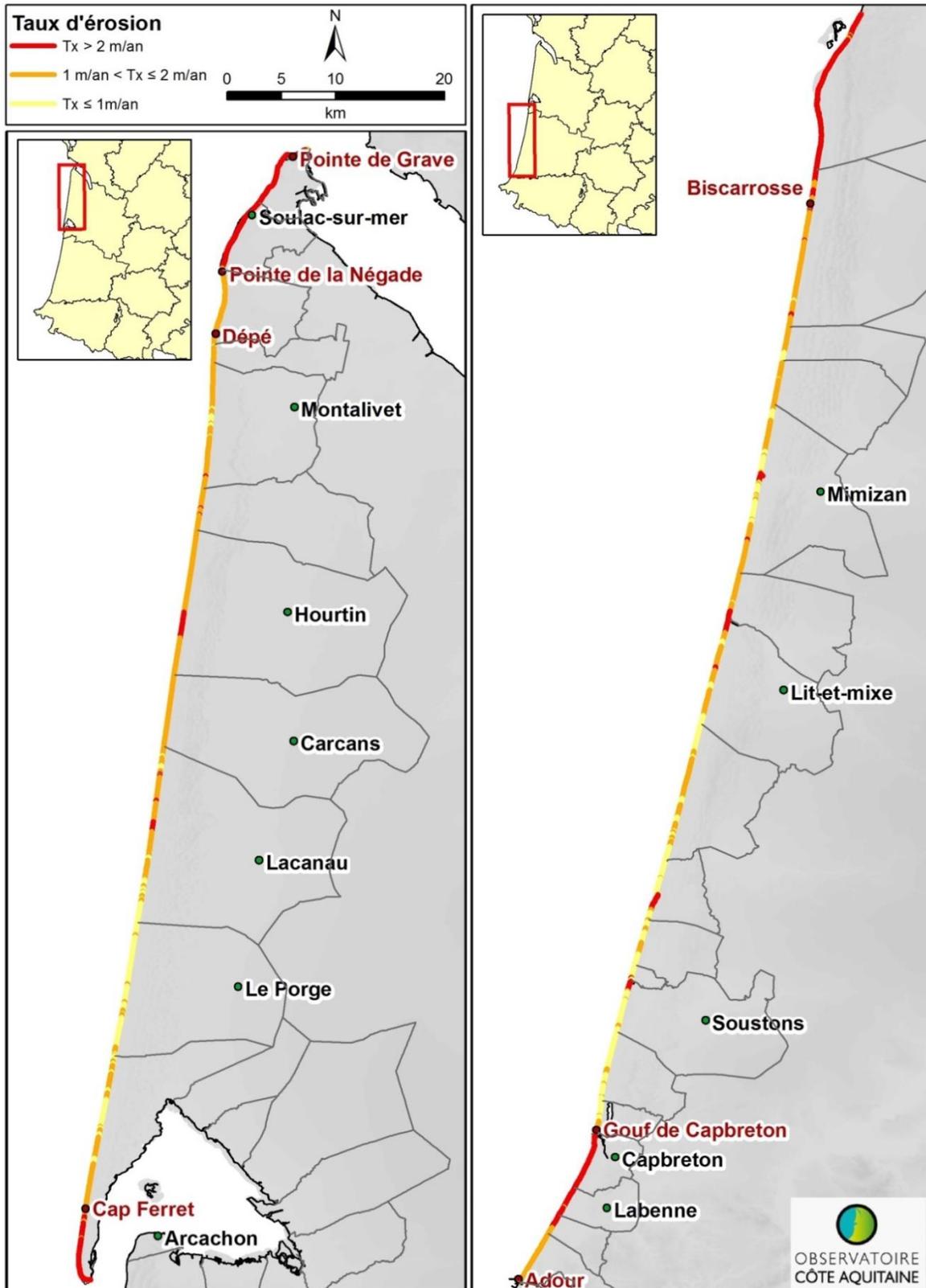


Illustration 32 - Taux d'érosion annuels moyens « Tx » en m/an sur la côte sableuse (Bernon et al., 2016)

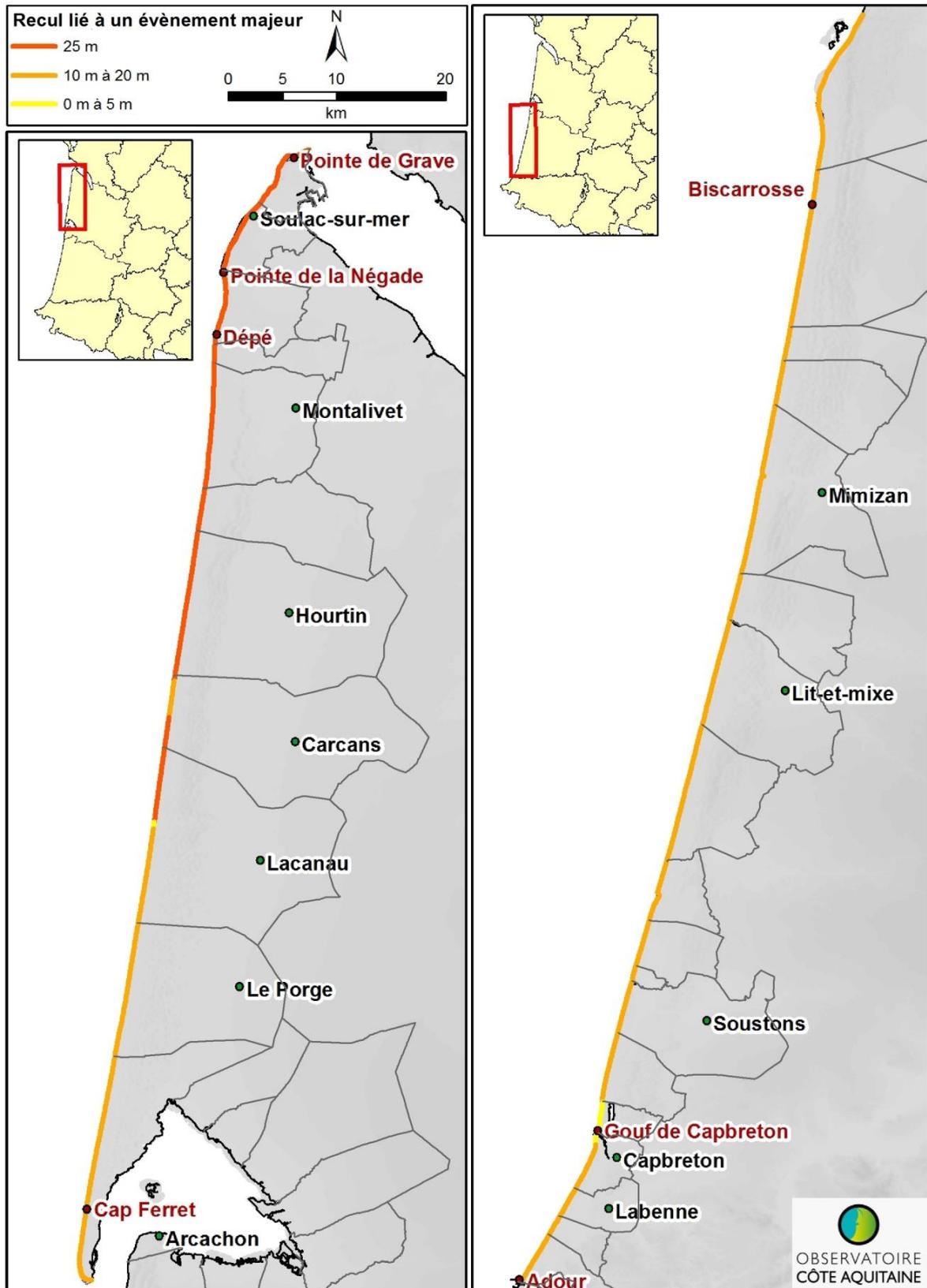


Illustration 33 - Reculs moyens susceptibles d'intervenir à la suite d'un événement majeur ( $L_{max}$ ) sur la côte sableuse (Bernon et al., 2016)

## **Bassin d’Arcachon**

Tout comme la zone Pertuis-Estuaire, le Bassin d’Arcachon possède des singularités par rapport aux autres secteurs : la grande majorité du littoral est fixée par des ouvrages, et souvent depuis plusieurs décennies. Dans ces conditions, définir une évolution naturelle du trait de côte est délicat. Les valeurs de  $T_x$  et de  $L_{max}$  connues alors sur un secteur aux caractéristiques comparables (géomorphologie, géologie, exposition aux agents météo-marins) ont été reportées sur les portions aménagées.

A titre d’exemple, l’Illustration 34 présente un linéaire où un déplacement du trait de côte a été constaté entre 2005 et 2016. Bien que cette évolution ne soit pas totalement naturelle (linéaire situé entre des ouvrages côtiers, environnement portuaire), ce constat permet de déterminer un ordre de grandeur du taux d’évolution envisageable sur un secteur globalement fixé par des ouvrages.

Les traces, sur le terrain, d’entailles d’érosion marine ont permis d’estimer des  $L_{max}$  inférieurs à 5 m sur certains secteurs. L’Illustration 35 présente un exemple d’entailles d’érosion marine ayant affecté des ouvrages constitués de matériaux hétérogènes (argile et sable) pouvant être assimilés à la nature même du terrain naturel. De plus, les observations pendant et juste après les tempêtes de l’hiver 2013-2014 ont permis également de déterminer des  $L_{max}$  plus importants au niveau de l’embouchure (exemple des brèches et entailles d’érosion mesurées sur le site de la flèche du Mimbeau, (Bulteau *et al.*, 2014)).

La cartographie des taux d’érosion moyens annuels et des reculs liés à un évènement majeur est présentée sur l’Illustration 36.



*Illustration 34 - Exemple d’estimation des  $T_x$  sur le Bassin d’Arcachon. Le trait de côte de 2016 est représenté sur chacune des 2 orthophotographies. En rouge, il correspond au pied des ouvrages (PO) et en orange à la rupture de pente topographique*



Illustration 35 - Exemple d'érosion marine pour la détermination des  $L_{max}$  sur le pourtour du Bassin d'Arcachon

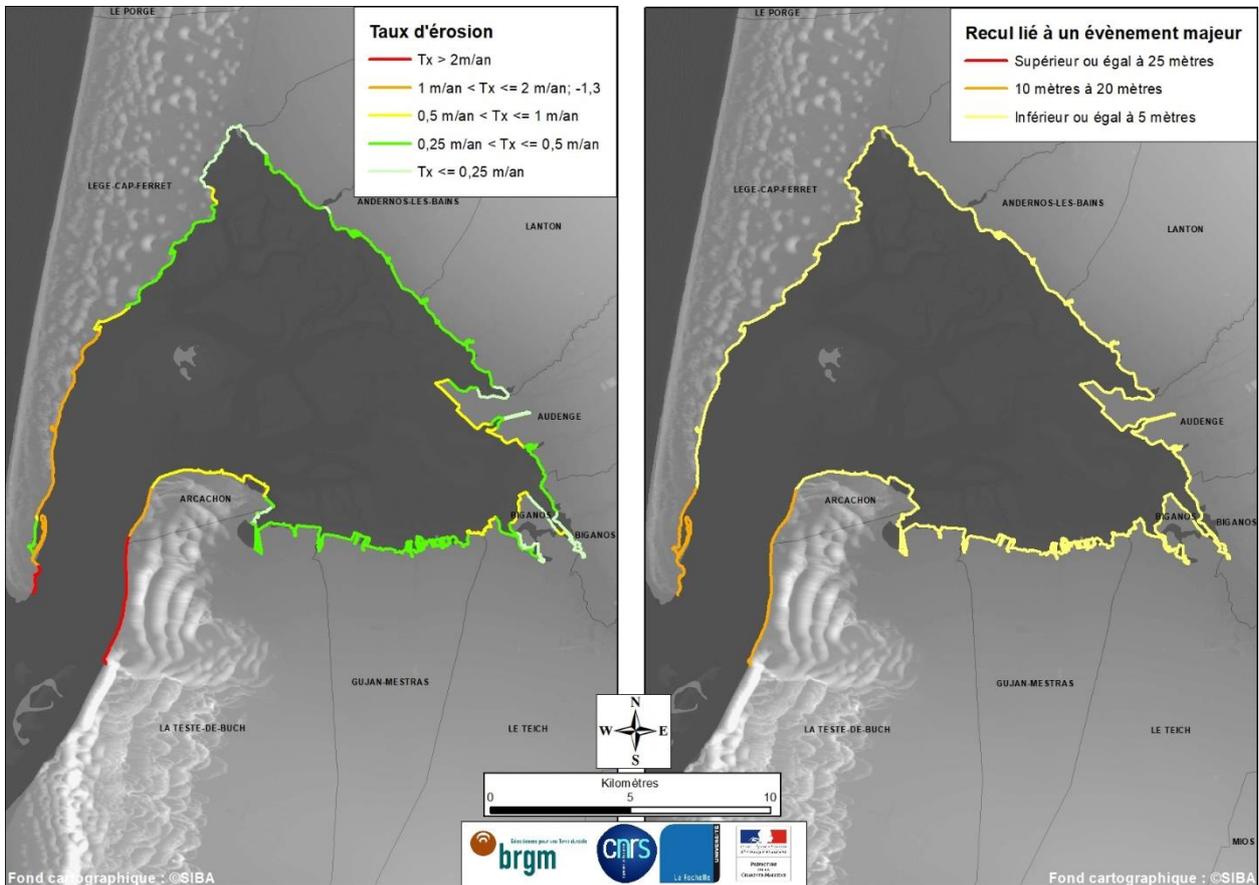


Illustration 36 - Taux d'érosion annuels moyens «  $T_x$  » et reculs liés à un évènement majeur «  $L_{max}$  » sur le littoral du Bassin d'Arcachon

### **Côte rocheuse basque**

Comme la côte sableuse, les résultats de l'étude de caractérisation de l'aléa recul du trait de côte sur le littoral aquitain aux horizons 2025 et 2050 ont été repris. Ils sont brièvement rappelés ci-après.

La côte rocheuse est décrite en une centaine de tronçons homogènes, d'un point de vue géomorphologique, d'après les résultats de l'étude BRGM/RP-52783-FR « Evaluation et cartographie de l'aléa mouvements de terrain sur la Côte Basque (Nedellec *et al.*, 2005). Ce découpage, toujours d'actualité, a été reproduit sur le trait de côte de 2014.

- **Tx**

Les taux de recul moyens annuels du trait de côte avaient été quantifiés lors de l'étude de « Caractérisation de l'aléa érosion (2020-2040) de la côte aquitaine dans le cadre de l'étude stratégique de gestion du trait de côte » (Aubié *et al.*, 2011).

Les traits de côte (haut de plage et sommet de falaise) ont été digitalisés à partir d'orthophotographies (photographies aériennes) de l'IGN pour les années 1954 et 2009 (précision +/- 10 m).

De même que sur la côte sableuse, une analyse statistique déterministe sur les positions historiques du trait de côte a été réalisée à l'aide de l'outil géomatique DSAS. L'analyse a porté sur des transects espacés de 10 m, à partir des traits de côte de 1954 et 2009. Ces résultats, augmentés par la connaissance du terrain, ont conduit à l'estimation d'un taux d'évolution moyen pour chaque tronçon géomorphologique homogène du littoral.

Ces taux d'évolution ont été reportés sur le trait de côte de 2014 et légèrement modifiés dans le cadre de la stratégie locale de gestion de la bande côtière de l'Agglomération Côte Basque-Adour en 2014 (Garnier et Millescamps, 2014-a), afin d'intégrer les dernières connaissances acquises sur les plages d'Anglet.

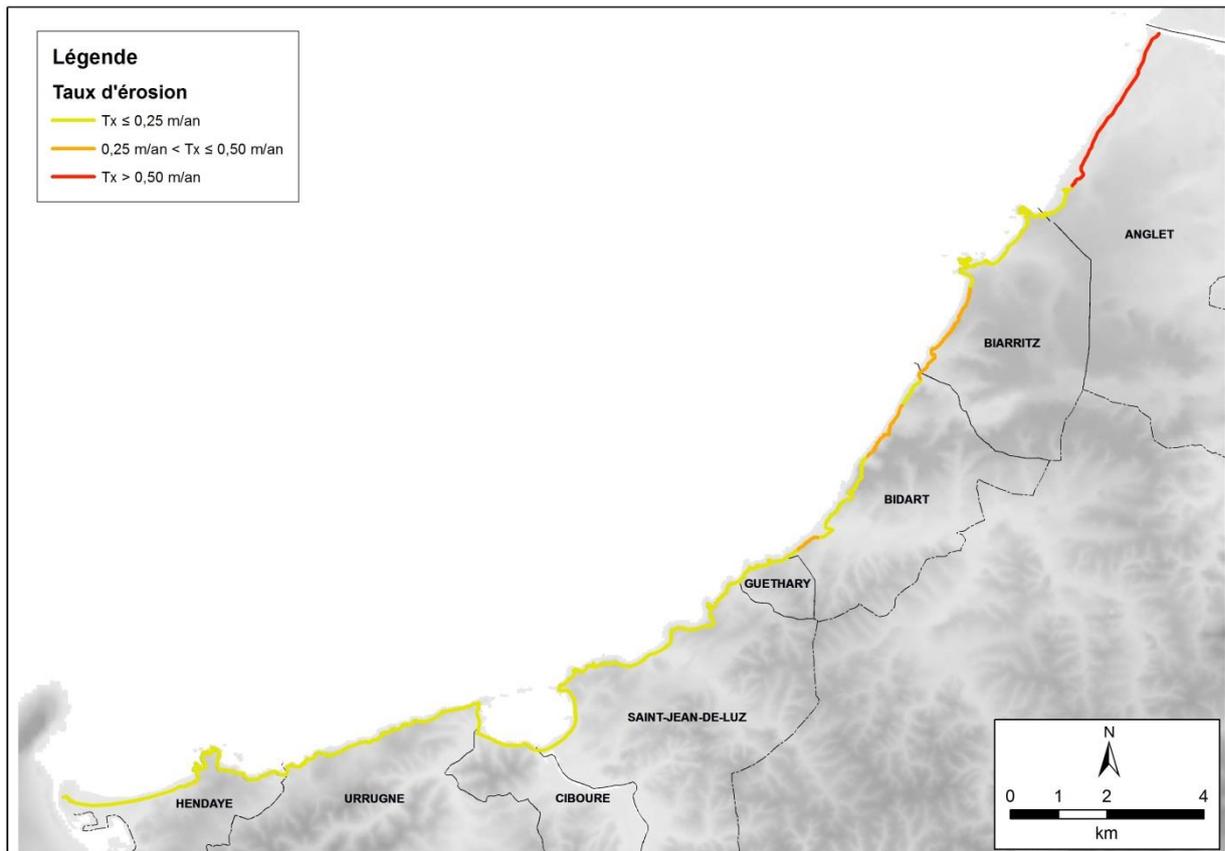


Illustration 37 - Taux d'érosion annuels moyens « Tx » en m/an sur la côte rocheuse basque (Bernon et al., 2016)

- **Lmax**

Les impacts d'évènements de tempête se matérialisent sur la côte rocheuse par des reculs généralement ponctuels et instantanés. Ces reculs résultent de mouvements de terrain dont l'ampleur est dépendante des configurations des falaises (caractéristiques géologiques, géomorphologiques, géomécaniques, hydrogéologiques...).

Les études des stratégies locales (Garnier et Millescamps, 2014-a ; Garnier et Millescamps, 2014-b) déterminent des valeurs de reculs liés à l'occurrence d'un évènement majeur pour chaque tronçon géomorphologique. Dans un premier temps, le recul en sommet de falaise provoqué par un mouvement de terrain de référence sur 10 ans, égal à 0 m, 5 m ou 10 m, est affecté à chaque tronçon géomorphologique. Il a ensuite été considéré que ce type d'évènement peut se produire 2,5 fois à l'échéance + 30 ans (2050).

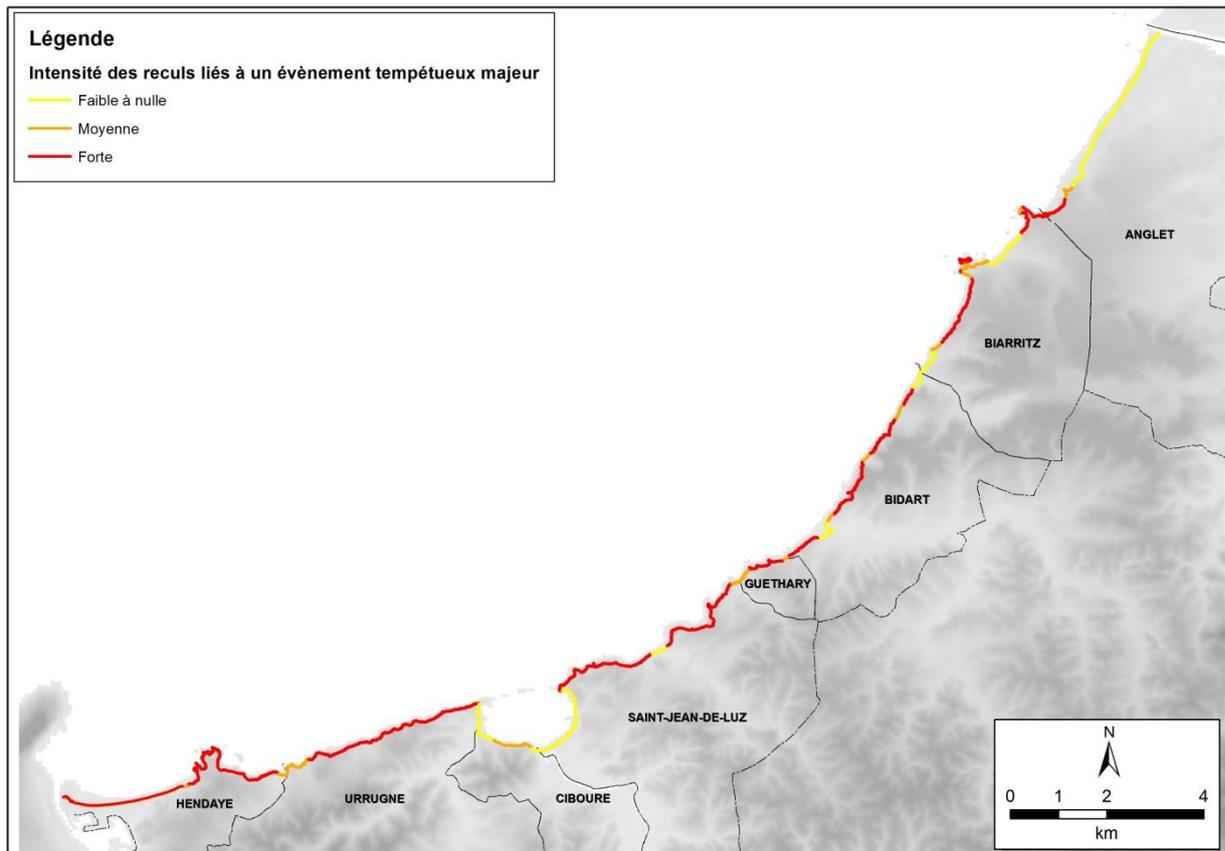


Illustration 38 - Distribution géographique de l'intensité des reculs liés à un évènement majeur sur la côte basque (Bernon et al., 2016). Les intensités faible à nulle, moyenne et forte correspondent respectivement à des mouvements de terrain de 0 m, 12,5 m et 25 m à l'échéance +30 ans

### 3.6. CARACTERISATION DE LA SENSIBILITE DU LITTORAL ADOUR-GARONNE AU REcul DU TRAIT DE COTE A L'HORIZON 2050

L'horizon temporel défini pour cette étude de caractérisation de l'aléa recul du trait de côte sur le littoral du bassin Adour-Garonne est 2050. La distance  $L_r$  de l'aléa recul du trait de côte est donc définie en fonction du nombre d'années séparant la date du trait de côte de référence et 2050 (cf. chapitre 3.5.1), soit par les formules :

- $L_r = 36 \times T_x + L_{max}$  sur les secteurs « Pertuis-Estuaire » (hors Verdon), « Côte sableuse » et « Côte rocheuse basque » ;
- $L_r = 37 \times T_x + L_{max}$  sur la façade gironde de la pointe du Verdon ;
- $L_r = 34 \times T_x + L_{max}$  sur le secteur « Bassin d'Arcachon ».

Afin de disposer d'une échelle représentative sur le littoral du bassin Adour-Garonne, ces distances de recul ont été réparties selon les classes 0 à 30 mètres, 30 à 60 mètres, 60 à 90 mètres et supérieure à 90 mètres.

La représentation cartographique (Illustration 39) de cette distance de recul à l'horizon 2050 permet de distinguer la sensibilité du territoire étudié au phénomène de recul du trait de côte. Les linéaires du littoral concernés par chacune des classes sont exposés dans le Tableau 1.

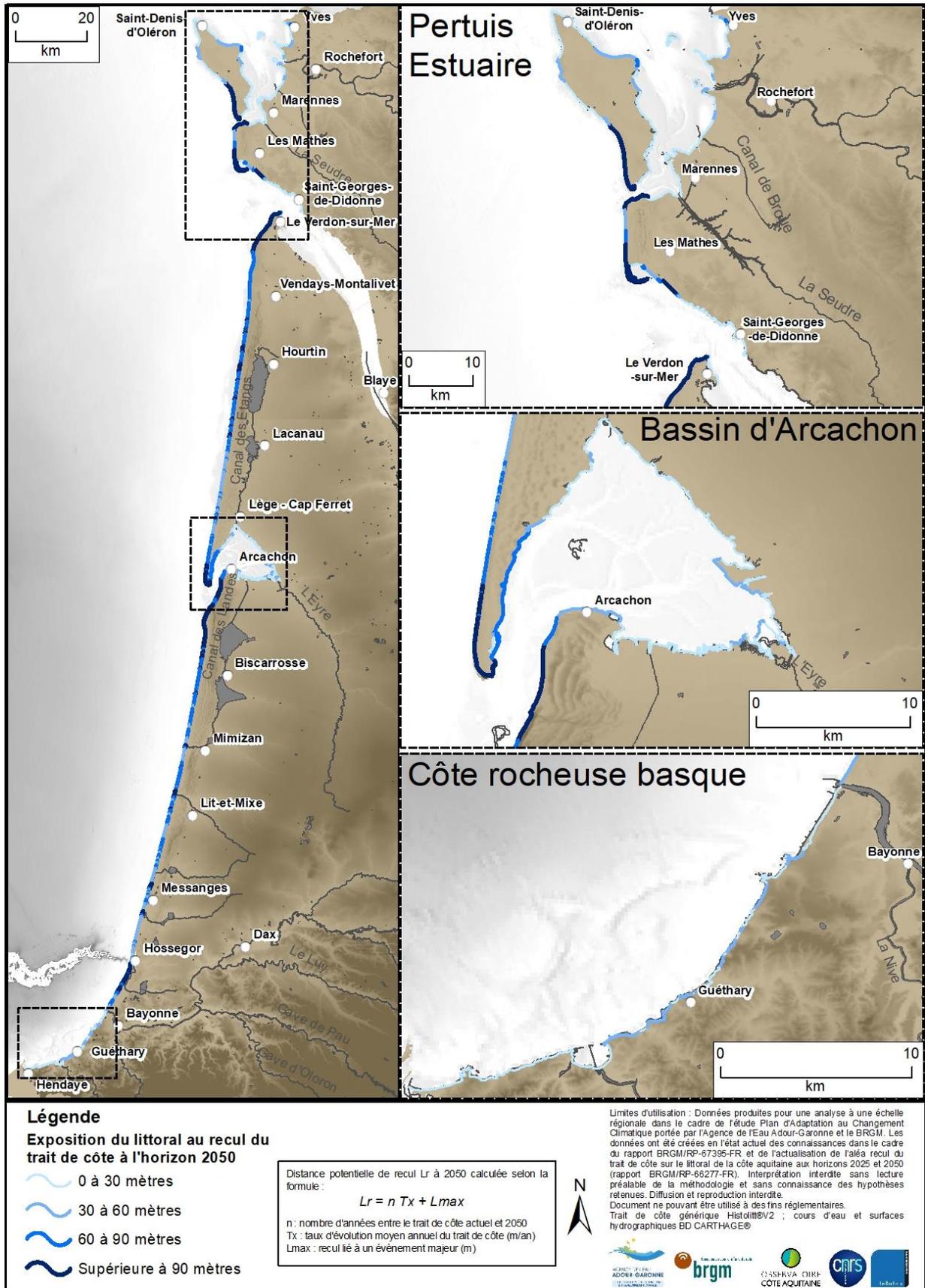


Illustration 39 - Sensibilité du littoral du bassin Adour-Garonne au recul du trait de côte à l'horizon 2050

Distance de recul à l'horizon 2050	Linéaire	%
Inférieure à 30 m	264,7	42,4
30 m à 60 m	134,6	21,5
60 m à 90 m	115,9	18,5
Supérieure à 90 m	109,7	17,6
<b>Total</b>	<b>625,0</b>	<b>100,0</b>

Tableau 1 - Linéaires (km) du littoral du bassin Adour-Garonne et classes de distance potentielle de recul à l'horizon 2050

La cartographie révèle des distances de recul relativement faibles dans les zones abritées situées dans les milieux du Pertuis-Estuaire et du Bassin d'Arcachon. Ces valeurs résultent de la localisation géographique, à l'abri des houles énergétiques provenant essentiellement de l'ouest-nord-ouest dans le Golfe de Gascogne (secteurs du Bassin d'Arcachon caractérisés par la présence de marais maritimes avec un estran large par exemple). Certaines formations rocheuses situées sur la façade océanique de l'Île d'Oléron, certaines falaises et plages de la côte basque sont également caractérisées par de faibles distances potentielles de recul. Ces distances estimées à moins de 30 mètres à l'horizon 2050 sont réparties sur ces trois milieux à hauteur de 42,4 % du linéaire total du bassin Adour-Garonne, soit 264,7 km des 625,0 km au total.

La côte basque comprend également des zones soumises à des reculs potentiels non négligeables à l'horizon 2050, ainsi que certains secteurs du Bassin d'Arcachon (exposés à une dynamique plus intense en lien avec la proximité de larges chenaux : pointe du Domaine de Certes, front de mer d'Arcachon et Pirailan) et de la côte sableuse (majoritairement sur les plages au sud des départements de Gironde et des Landes). La proportion du linéaire total concernée par des distances de recul estimées entre 30 m et 60 m s'élève à 21,5 %, soit 134,6 km.

Les distances potentielles de recul sont d'une manière générale élevées dans les secteurs de dunes littorales de la côte sableuse. Pour ce dernier environnement, le sud des départements de la Gironde et des Landes présente cependant des valeurs relativement moins élevées que dans les parties nord. Ces secteurs où les distances de recul potentielles évaluées à l'horizon 2050 sont de 60 m à 90 m occupent 18,6 % du littoral, soit 115,9 km. Il est à noter la présence de cette classe de recul sur la façade interne du Cap Ferret, à l'ouest d'Arcachon (liée à la proximité d'un large chenal et au rapprochement de l'embouchure) et ponctuellement sur la façade océanique du secteur Pertuis-Estuaire.

Les distances de recul potentielles à l'horizon 2050 les plus élevées se situent dans les zones d'embouchure : pertuis de Maumusson, estuaire de la Gironde, Bassin d'Arcachon et courants landais pour l'essentiel. Ces zones où les dynamiques hydro-sédimentaires sont fortes peuvent évoluer rapidement et sont présentes sur 17,6 % du linéaire total, soit 109,7 km.

## 4. Impact du changement climatique sur le littoral à l'horizon 2050

### 4.1. IMPACTS PREVISIBLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'HORIZON 2050 : PROJECTIONS DU NIVEAU DE LA MER POUR LA NOUVELLE-AQUITAINE

Dans le cadre de l'Observatoire de la Côte Aquitaine, la revue des connaissances relative à l'impact potentiel du changement climatique sur les aléas littoraux (Le Cozannet *et al.*, 2017c) met en évidence les fortes incertitudes sur les changements des conditions hydrométéorologiques moyennes et extrêmes futurs (régimes de tempête, vents, vagues, niveaux marins extrêmes, surcotes, débit des fleuves, ...). Si dans les années à venir les changements observés sur le littoral aquitain demeureront dominés par les tendances actuelles et la variabilité climatiques des régimes de houle et tempêtes, à plus long terme (dès le milieu du XXI<sup>ème</sup> siècle), c'est l'élévation du niveau de la mer qui induira les changements les plus importants pour l'érosion et la submersion marines. C'est pourquoi, l'objectif de cette partie est de définir à l'horizon 2050 la valeur d'élévation du niveau marin le plus précisément possible sur la base des connaissances actuelles.

Cette section met à jour les scénarios d'élévation du niveau de la mer actuellement utilisés par l'Observatoire de la Côte Aquitaine à l'échelle de la région Nouvelle-Aquitaine, en prenant en compte les dernières connaissances disponibles. Il procède de la manière suivante :

1. Description des phénomènes physiques en jeu et des données disponibles (section 4.1.1)°;
2. Description de la méthode permettant de constituer des projections de l'élévation du niveau de la mer régionales (section 4.1.2) ;
3. Identification des principales composantes de l'élévation du niveau de la mer, des projections disponibles et de leurs incertitudes (section 4.1.3) ;
4. Présentation des scénarios d'élévation du niveau de la mer, de leur évolution temporelle, de leur variabilité régionale, et incertitudes associées (section 4.1.4).

Ce travail s'appuie sur une collaboration avec deux groupes de travail<sup>1</sup> :

- le Grand Challenge « Regional Sea-Level Rise and Coastal Impacts » du World Climate Research Programme (WCRP) ;
- le projet CNRS - LEFE IMPHALA, qui regroupe la communauté scientifique française concernée par l'élévation du niveau de la mer et ses impacts.

---

<sup>1</sup> Ce travail a donc bénéficié d'apports de Benoit Meyssignac (CNES, LEGOS, Toulouse), Catherine Ritz et Gael Durand (CNRS, IGE, Univ. Grenoble Alpes), Angélique Melet (Mercator Ocean), Aimée Slangen (NIOZ Royal Netherlands Institute for Sea Research), David Salas (CNRM-GAME, URA CNRS & Météo-France), Jeremy Rohmer et Jean-Charles Manceau (BRGM).

#### 4.1.1. Introduction

##### **Phénomènes en jeu**

L'élévation du niveau de la mer est l'une des manifestations majeures du changement climatique. Au niveau global, celle-ci a deux origines principales (Illustration 40) : la dilatation thermique des océans et la fonte des glaciers et des calottes polaires, qui sont, toutes deux, des conséquences du déséquilibre énergétique global induit par l'augmentation des concentrations de gaz à effets de serre dans l'atmosphère (Church *et al.*, 2013).

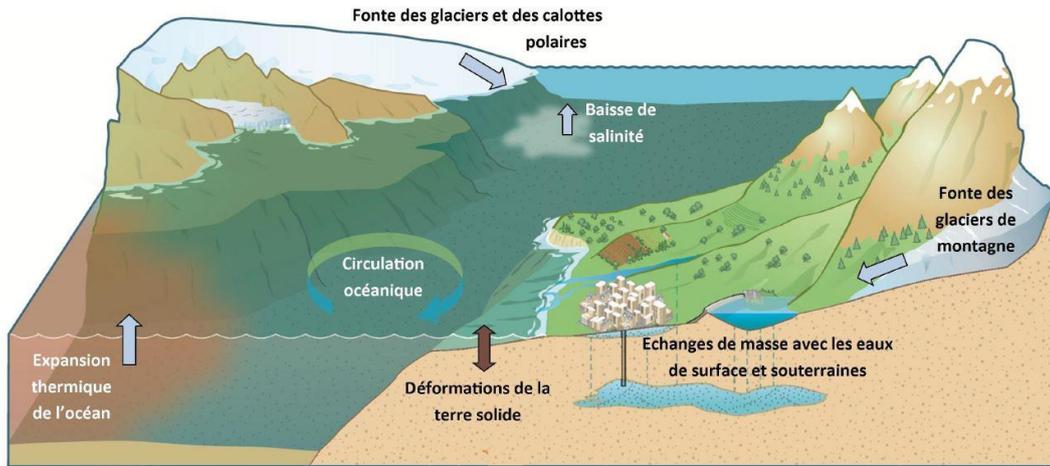


Illustration 40 - Causes des variations du niveau marin relatives  
(adapté d'après Cazenave et Le Cozannet (2014))

##### **Projections d'élévation du niveau marin du GIEC en 2100**

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)<sup>2</sup> a défini dans son dernier rapport quatre scénarios de référence, les RCP (pour *Representative Concentration Pathways*), représentant chacun des profils d'évolution possibles des concentrations de gaz à effet de serre (ou GES) : RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5<sup>3</sup>. Des scénarios de développements socio-économiques et diverses stratégies d'adaptation et d'atténuation y sont associés. Le scénario RCP 2.6 implique de fortes réductions d'émissions de GES par la communauté internationale. Le RCP 8.5 est le plus pessimiste, mais c'est un scénario probable car il correspond à la prolongation des émissions actuelles.

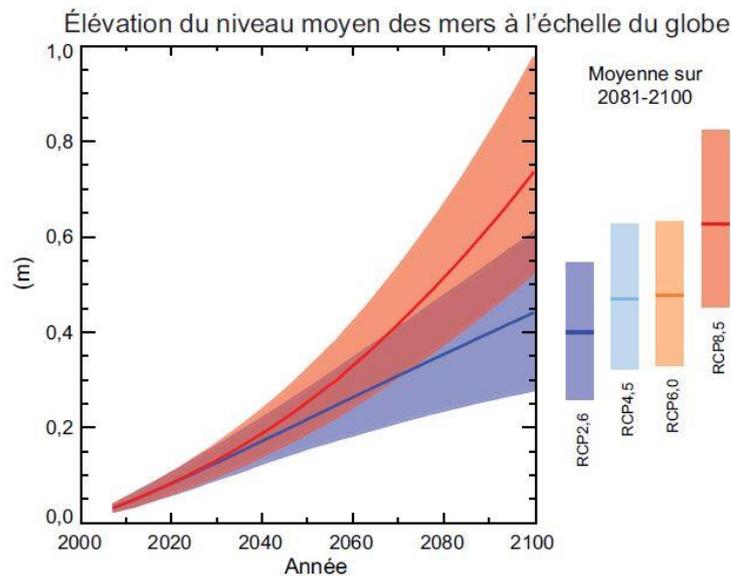
A la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, l'augmentation de la température à la surface du globe sera probablement supérieure à 1,5 °C par rapport à l'époque allant de 1850 à 1900, pour tous les RCP sauf peut-être le RCP 2.6 (GIEC, 2013). Il est probable qu'elle dépassera 2 °C selon les RCP 6.0 et RCP 8.5, et il est plus probable qu'improbable qu'elle dépassera 2 °C selon le RCP 4.5. Dans tous les RCP envisagés à l'exception du RCP 2.6, le réchauffement se poursuivra après 2100. Il continuera à présenter une variabilité interannuelle à décennale et ne sera pas uniforme d'une région à l'autre.

<sup>2</sup> en anglais IPCC pour *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Les deux appellations sont utilisées dans la suite du rapport.

<sup>3</sup> Ces RCP sont identifiés par leur forçage radiatif total approximatif pour l'année 2100 par rapport à 1750: 2,6 W m<sup>-2</sup> pour le RCP 2.6; 4,5 W m<sup>-2</sup> pour le RCP 4.5; 6,0 W m<sup>-2</sup> pour le RCP 6.0 et 8,5 W m<sup>-2</sup> pour le RCP 8.5.

D'après le Groupe de travail ayant contribué au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, le niveau moyen mondial des mers continuera à s'élever au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Selon tous les RCP, il est *très probable* que cette élévation se produira à un rythme plus rapide que celui observé entre 1971 et 2010, en raison du réchauffement accru de l'océan et de l'augmentation de perte de masse des glaciers et des nappes glaciaires.

L'illustration 41 montre, pour l'élévation du niveau marin en 2100, des différences importantes entre le scénario de changement climatique RCP 2.6 (compatible avec l'objectif d'augmentation de la température moyenne globale de 2°C au-dessus de la période préindustrielle) et un scénario RCP 8.5 (poursuite des émissions de gaz à effets de serre). Dans les deux cas cependant, l'ampleur des changements anticipés est très importante (plusieurs dizaines de centimètres), ce qui motive la prise en compte de ce phénomène dans les études de vulnérabilité du littoral.



*Illustration 41 - Projections de l'évolution du niveau moyen des mers au cours du XXI<sup>e</sup> siècle par rapport à la période 1986-2005, pour les deux scénarios RCP 2.6 et RCP 8.5. La plage probable estimée est indiquée sous la forme d'une zone de couleur. Les intervalles probables estimés (moyennes sur la période 2081-2100 pour tous les scénarios RCP) sont indiqués sous la forme de bandes verticales de couleur et la valeur médiane correspondante, sous la forme d'une ligne horizontale (source : GIEC, 2013)*

L'illustration 42 montre également qu'au niveau régional l'élévation du niveau de la mer relativement à la côte peut être différente en raison de processus océaniques et de mouvements verticaux du sol.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> À titre d'exemple, les changements locaux peuvent être dus à une élévation de la hauteur de la surface de la mer ou à un abaissement des terres émergées. Comme l'indique le GIEC (2013) dans son résumé à l'attention des décideurs : « Sur des intervalles de temps relativement courts (de quelques heures à quelques années), l'influence des marées, des tempêtes et de la variabilité climatique - du phénomène El Niño, par exemple - domine les variations du niveau de la mer. Les tremblements de terre et les glissements de terrain peuvent également exercer un effet en provoquant des changements dans l'élévation des terres émergées. Sur des intervalles de temps plus longs (allant des décennies aux siècles), l'influence du changement climatique - et les changements qui en résultent dans le volume de l'eau de l'océan et des glaces terrestres - est ce qui pèse le plus sur le changement du niveau de la mer dans la plupart des régions. À ces échelles de temps plus longues, différents processus peuvent également entraîner un mouvement vertical de la surface des terres émergées, lequel peut également engendrer des modifications substantielles du niveau relatif de la mer. »

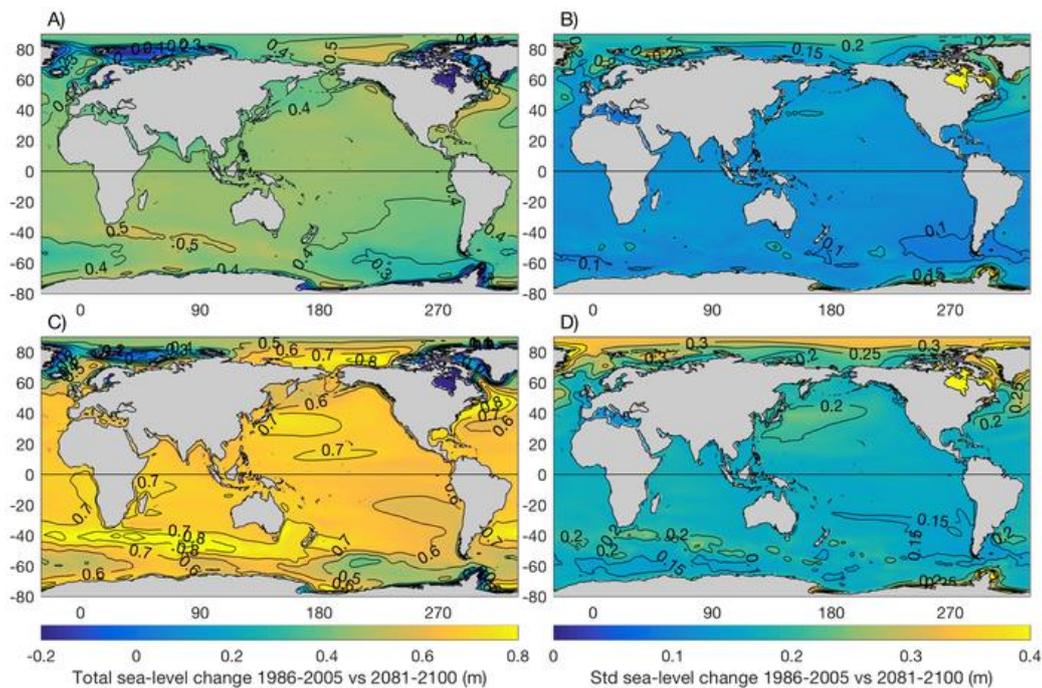


Illustration 42 - Variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer et ses incertitudes selon l'IPCC pour deux scénarios de changement climatique, en 2100 : RCP 2.6 (A et B) et RCP 8.5 (C et D). Les incertitudes représentées correspondent à un écart type d'une distribution gaussienne (données : IPCC AR5 WG1 Ch 13). Figure préparée par Aimée Slangen pour l'article Le Cozannet et al., 2017b.

### Projections d'élévation du niveau de la mer existantes à l'échelle régionale

Il existe aujourd'hui deux familles de projections régionales de l'élévation du niveau de la mer :

- Les projections du GIEC, qui reposent sur l'hypothèse que les incertitudes des projections sont gaussiennes (Illustration 42) ;
- Des projections ayant intégré des lois de probabilité non-paramétriques pour décrire les incertitudes de certaines composantes à l'élévation du niveau de la mer. Dans la plupart des cas, la principale différence a consisté à introduire une distribution asymétrique issue de l'élicitation de Bamber et Aspinall (2013), pour représenter les incertitudes associées à la fonte des calottes de l'Antarctique et du Groenland. Ceci traduit le fait que la communauté des glaciologues estime que des contributions bien supérieures à la moyenne sont possibles.

L'illustration 43 présente les projections de l'élévation du niveau de la mer utilisées en 2016 par l'Observatoire de la Côte Aquitaine, dans le cadre de son programme complémentaire « Adaptation au changement climatique ». Il s'agit des projections de Kopp *et al.* (2014), qui sont présentées à Saint-Jean-de-Luz. Ces projections appartiennent à la seconde famille précitée.

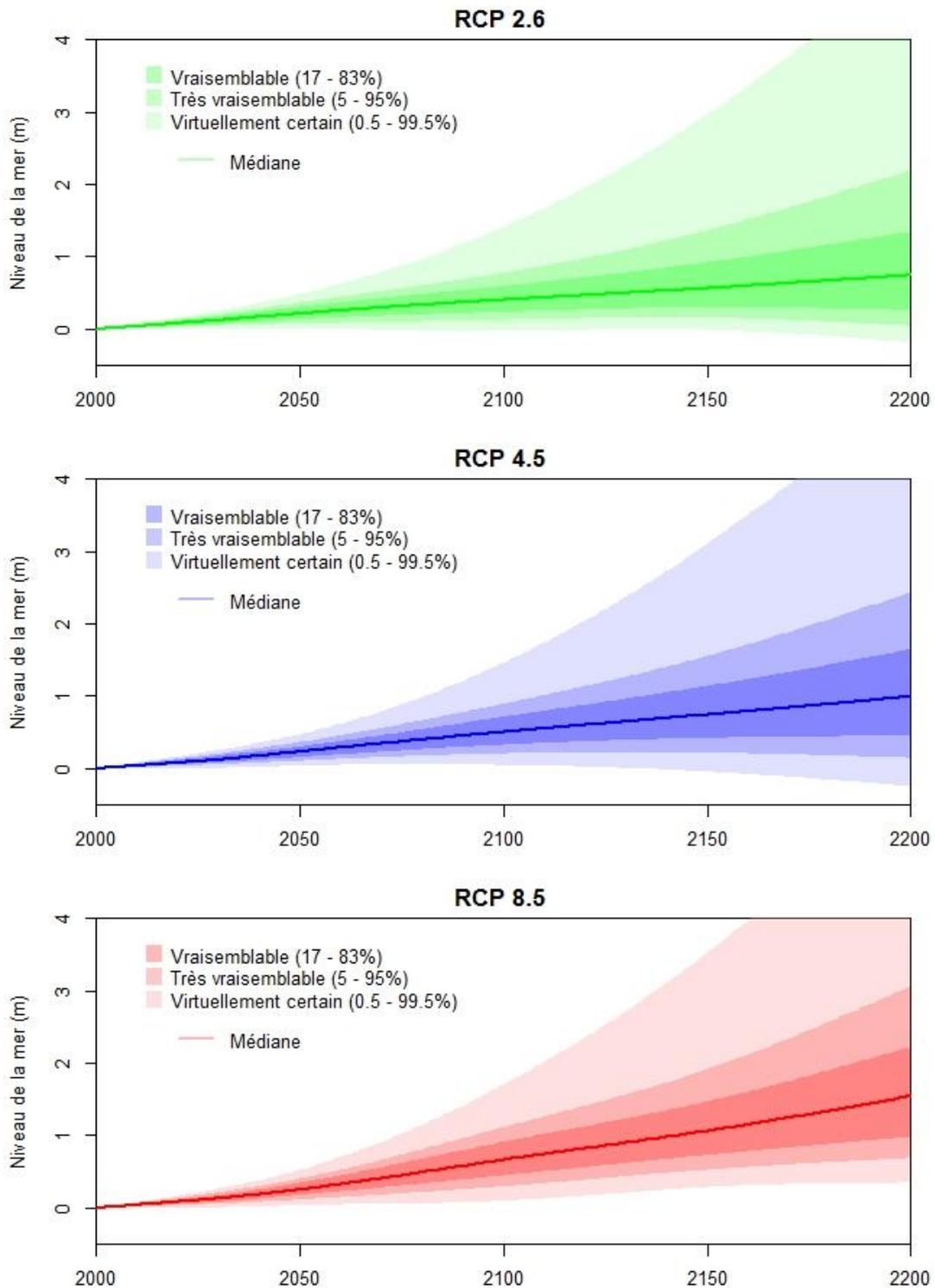


Illustration 43 - Projections d'élévation du niveau de la mer selon l'étude de Kopp et al. (2014) pour la ville de Saint-Jean-de-Luz, en région Nouvelle-Aquitaine, et trois scénarios de changement climatique (RCP 2.6, 4.5 et 8.5) (données : Kopp et al., 2014)

### **Motivation de l'étude**

Les projections d'élévation du niveau de la mer de Kopp *et al.* (2014) sont utilisables pour évaluer les impacts vraisemblables de l'élévation du niveau de la mer. En revanche, elles présentent plusieurs difficultés :

- Les données sont fournies au niveau d'un nombre limité de marégraphes seulement (en Nouvelle-Aquitaine, notamment, La Rochelle et Saint-Jean-de-Luz) ;
- Les projections prennent en compte des mouvements verticaux du sol, calculés à partir du bruit de la série temporelle, et qui sont mises en défaut à La Rochelle par exemple, où cette méthode conduit à surestimer la subsidence d'un facteur 10 au moins. En effet, à La Rochelle, les données de GPS permanent ([www.sonel.org](http://www.sonel.org)) montrent l'absence de mouvements verticaux du sol. Cette question est abordée en détail ci-après (voir tableau 3) ;
- Les valeurs proposées pour les scénarios extrêmes sont basées d'une part sur une contribution des calottes polaires qui a été proposée en 2013 (Bamber et Aspinall, 2013) et dont l'exploitation a été contestée (De Vries et Van De Wal, 2015), d'autre part sur l'hypothèse que les incertitudes de la plupart des autres contributions peuvent être représentées par une loi normale, ce qui est discutable. La fiabilité des scénarios extrêmes (intervalles « très vraisemblable » et « pratiquement certain ») est donc limitée.

Ceci motive la production d'un nouveau jeu de données régionales, applicables pour la Nouvelle-Aquitaine, présentant les scénarios extrêmes de manière explicite (cas de fonte rapide des calottes polaires, notamment) et présentant les observations disponibles concernant les mouvements verticaux du sol.

#### **4.1.2. Méthode**

##### ***Approche générale***

L'illustration 44 décrit l'approche générale utilisée dans ce projet. La méthode procède comme suit :

- dans un premier temps, des hypothèses globales sur les contributions de chaque processus à l'élévation du niveau de la mer sont établies ;
- dans un second temps, les implications régionales de ces scénarios globaux sont estimées pour la Nouvelle-Aquitaine ;
- ensuite, des estimations des mouvements verticaux du sol sont intégrées pour proposer des scénarios applicables localement ;
- enfin, un calcul des empreintes spatiales de chacune de ces contributions, en région Nouvelle-Aquitaine, prend en compte les effets gravitationnels induits.

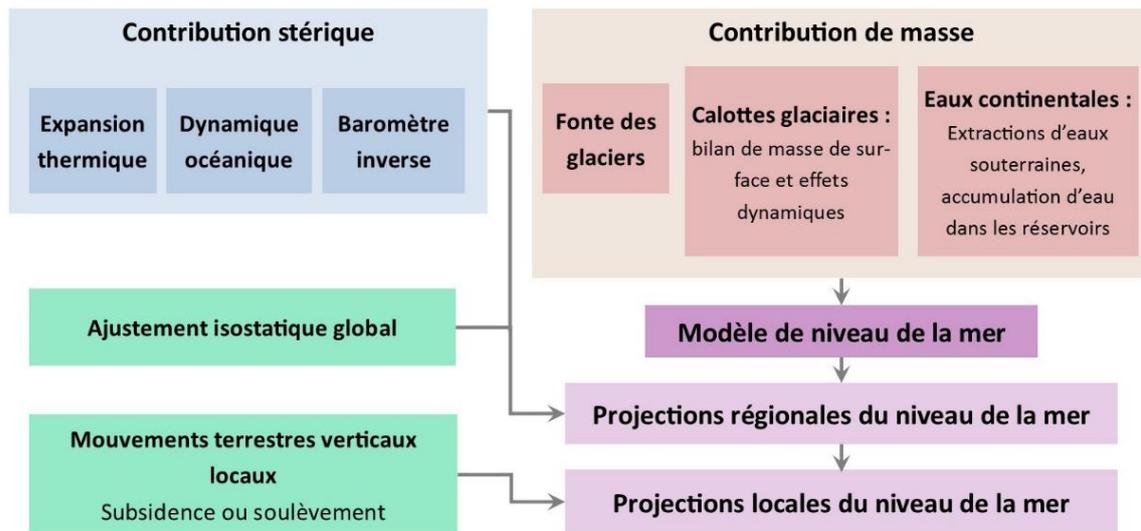


Illustration 44 - Approche générale utilisée dans cette étude (adaptée à partir de Slangen et al., 2012)

Les résultats présentés sont en partie déjà accessibles via des études antérieures : il s'agit en particulier des hypothèses du GIEC (valeurs médianes et vraisemblables) et de leurs implications régionales. A titre d'exemple, l'illustration 44 présente les implications régionales d'un scénario médian dans le cas d'émissions de gaz à effets de serre non contenues (scénario RCP 8.5), qui aboutit à une moyenne globale de 0,74 cm au-dessus de la référence 1986-2005. En revanche, d'autres scénarios plus optimistes (*low-end scenarios*) ou plus pessimistes (*high end scenarios*) ne sont pas accessibles, ou reposent sur des hypothèses que l'on peut discuter dans le cas de l'illustration 43. Il est pourtant important de les considérer car ils permettent d'évaluer les besoins minimaux (ou maximaux) en adaptation. Les sections suivantes présentent les hypothèses qui ont été effectuées pour définir des scénarios associés à chacune de ces contributions à l'élévation du niveau de la mer. Dans une dernière sous-section, nous présentons le cadre de traitement des incertitudes.

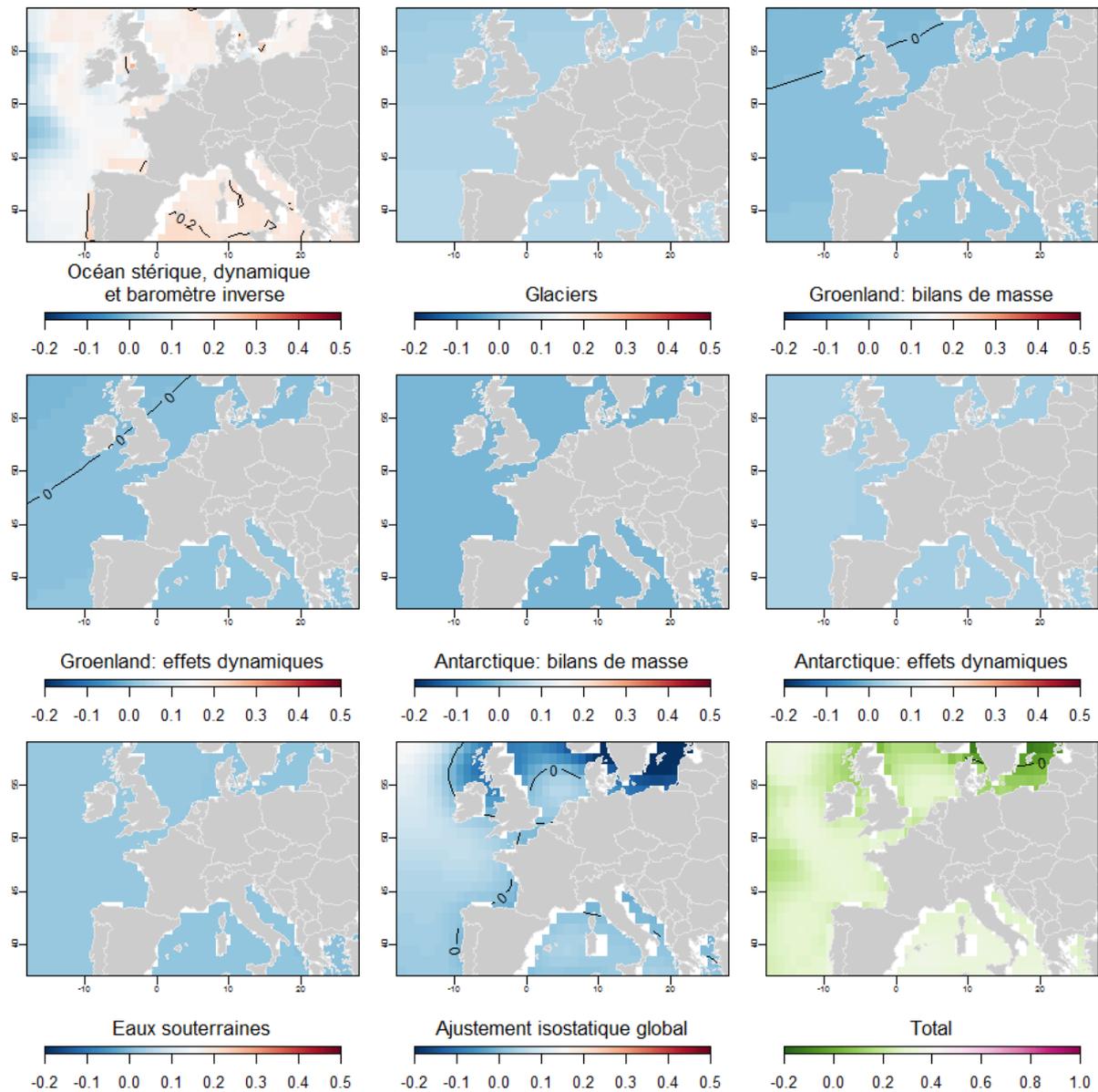


Illustration 45 - Implications régionales (en Europe) du scénario de changement climatique RCP 4.5 vers 2050

### Cadre de description des incertitudes

Avant de préciser le cadre de description des incertitudes, nous rappelons que même si le réchauffement climatique devait s'arrêter aujourd'hui, l'élévation du niveau de la mer se poursuivrait pendant plusieurs siècles. Par exemple, les glaciers sont actuellement dans un état de déséquilibre par rapport au climat actuel. Les incertitudes ne portent donc que sur la vitesse du processus d'élévation du niveau marin. Dans les rapports du GIEC, elles sont données sous la forme d'intervalles de confiance, qui décrivent, par exemple, que le niveau de la mer global a entre 66% et 100% de chances d'être compris entre 0,52 et 0,98 m en 2100 par rapport à une moyenne 1986-2005 dans le cas du scénario de réchauffement climatique RCP 8.5.

Plusieurs études ont tenté de décrire les incertitudes de l'élévation du niveau de la mer avec des lois de probabilité<sup>5</sup> (ex : Kopp *et al.*, 2014). Aujourd'hui, il est bien établi qu'une distribution crédible pour représenter l'élévation du niveau de la mer future devrait d'une part être bornée (même si toute la cryosphère fondait, l'élévation du niveau de la mer ne serait que de 70 m environ), et d'autre part avoir une forme asymétrique, afin de représenter de manière adéquate les fortes incertitudes liées à la dynamique des calottes polaires (ex : Bamber et Aspinall, 2013 ; Ritz *et al.*, 2015). Cependant, en raison du manque d'informations disponibles pour décrire tous les quantiles de telles distributions de probabilités, la forme exacte de la distribution demeure inconnue. Dans le cadre de la présente étude, nous levons cette difficulté en nous référant à un cadre de description des incertitudes possibilistes<sup>6</sup> (Dubois, 2007), qui limite l'apport d'informations arbitraires (Le Cozannet *et al.*, 2017a). Ces approches possibilistes sont complémentaires à celles utilisant des distributions de probabilités : ces dernières sont adaptées pour trouver une réponse optimale à l'élévation du niveau de la mer (dans le cas où des erreurs importantes sont acceptables), tandis que les représentations possibilistes sont utiles pour examiner les besoins minimaux en adaptation ou pour explorer les conséquences de scénarios plus rapides.

### **Contributions n'impliquant pas de variations de la masse des océans (contributions stériques)**

Les contributions à l'élévation du niveau de la mer n'impliquant pas de variation de masse des océans sont dues aux processus suivants :

- Expansion thermique des océans, circulation océanique : en se réchauffant, l'océan se dilate ; néanmoins, ce phénomène présente de fortes disparités régionales en raison du réchauffement hétérogène des eaux de surface, de la circulation océanique et de salinité ; enfin, des variations de pression atmosphérique induisent des variations régionales à ce processus ;
- Ajustement isostatique global : lors de la dernière transgression post-glaciaire, deux calottes de glace, situées au Canada et en Scandinavie, ont fondu. En fondant, elles ont libéré des contraintes s'exerçant sur la croûte terrestre, conduisant à un rebond post-glaciaire dans la région de fonte. Ces mouvements verticaux du sol se poursuivent encore aujourd'hui en raison de la dynamique visco-élastique lente de la réponse de la Terre solide à ces redistributions de masse. En Scandinavie, ces phénomènes conduisent à des surrections de l'ordre du centimètre par an. En Nouvelle-Aquitaine, ces phénomènes ont une influence négligeable sur l'élévation du niveau de la mer actuellement ;
- A ces mouvements verticaux du sol globaux peuvent s'ajouter des phénomènes plus régionaux ou locaux, induits par des phénomènes naturels (tectonique, volcaniques) ou anthropiques (extractions d'eaux souterraines, assèchements de marais conduisant à une réduction de la teneur en eau de dépôts sédimentaires récents et à leur « compaction »). Ces phénomènes sont généralement mal connus, mais ils peuvent être mesurés par des GPS permanents ou par d'autres techniques de géodésie, et sont parfois accessibles à la modélisation (Santamaria-Gomez *et al.*, 2012 ; Raucoules *et al.*, 2013 ; Wöppelmann et Marcos, 2016).

---

<sup>5</sup> Une loi de probabilité est une fonction qui décrit le comportement d'une variable aléatoire

<sup>6</sup> Dans un cadre possibiliste, les incertitudes sont décrites sous la forme d'intervalles flous, décrivant les valeurs possibles d'une variable aléatoire (densité de possibilité égale à 1), les valeurs impossibles (densité de possibilité égale à 0) et les valeurs intermédiaires (entre 0 et 1) pour décrire des degrés de possibilité plus ou moins élevés.

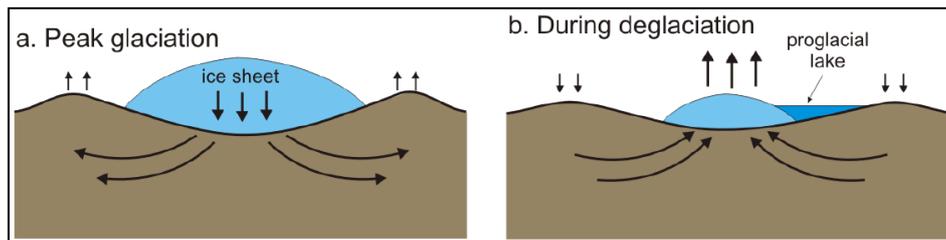


Illustration 46 - Schéma illustrant la réponse de la croûte terrestre induite par la fonte de calottes polaires (source : Church et al., 2013)

### **Contributions impliquant des variations de la masse d'eau des océans (contributions non stériques)**

Cette section examine le cas de contributions à l'élévation du niveau de la mer impliquant une augmentation de la masse d'eau des océans. Les processus pris en compte dans cette étude sont les transferts de masse depuis la cryosphère (glaciers, calottes polaires) ou des eaux souterraines vers les océans. Ces redistributions des masses d'eau à l'échelle globale ont pour conséquence, non seulement un rebond élastique de la croûte terrestre (Illustration 46), mais également perturbent le champ de gravité de la Terre. L'illustration 47 présente les empreintes spatiales de ces phénomènes. Ces figures montrent que, schématiquement, une perte de masses de glace ou d'eau sur un site conduit à une baisse de l'élévation du niveau de la mer au voisinage de ce site, et à une élévation du niveau de la mer plus forte que la moyenne globale loin de la source.

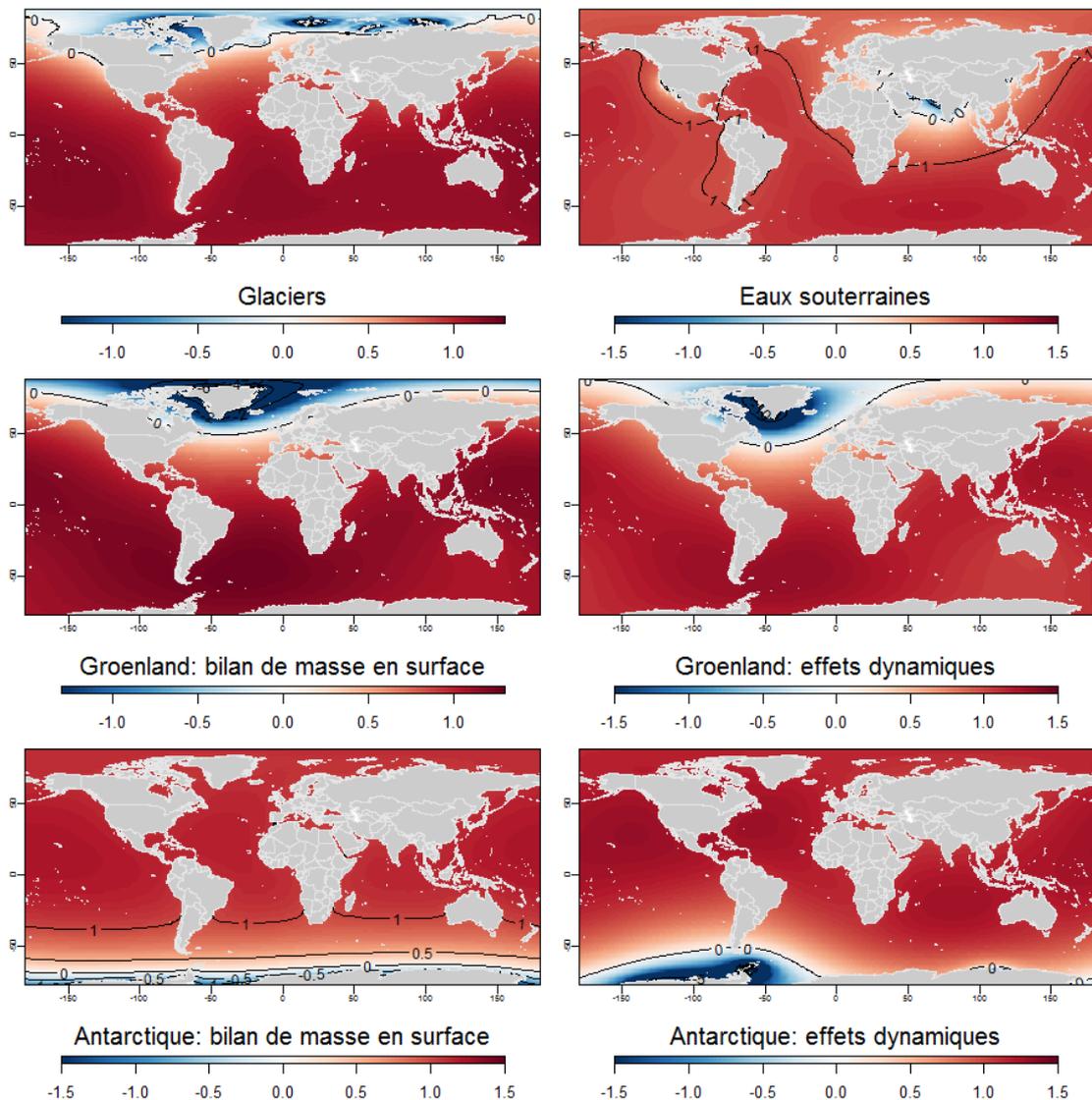


Illustration 47 - Empreinte spatiale des différents processus concourant à élever le niveau de la mer par augmentation de la masse d'eau des océans. L'échelle présentée correspond à un paramètre adimensionnel, représentant la variation du niveau de la mer local induite par la perte d'une unité de masse (exprimée par exemple en m équivalent d'élévation du niveau de la mer) pour chacune des sources considérées (données : service climatique de l'Université de Hambourg).

#### 4.1.3. Données et hypothèses

##### Sources

- IPCC / Integrated Climate Data Center (ICDC) de l'Université de Hambourg pour toutes les valeurs vraisemblables basses, hautes et médianes.
- Les valeurs extrêmes sont, pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5, basées sur Jackson et Jevrejeva (2016) : les valeurs extrêmes basses sont les 5 percentiles et les valeurs extrêmes hautes sont les 99<sup>ème</sup> percentiles (à noter que les 1 percentiles ne sont pas directement fournis par Jackson et Jevrejeva, 2016).
- Autres études spécifiques sur l'Antarctique, le Groenland et les glaciers (ex. Marzeion *et al.*, 2012 ; Ritz *et al.*, 2015).

### **Hypothèses globales sur les contributions / empreinte spatiale de chaque processus à l'élévation du niveau de la mer**

- **Expansion thermique, dynamique océanique et baromètre inverse (Tableau 2 a)**
- **Glaciers de montagne (Tableau 2 b)**
- **Calotte polaire groenlandaise : bilans de masse de surface (Tableau 2 c)**
- **Calotte polaire groenlandaise : effets dynamiques (Tableau 2 d)**
- **Calotte polaire antarctique : bilans de masse de surface (Tableau 2 e)**

Les bilans de masse en surface en Antarctique sont dominés par les précipitations, qui devraient s'accroître avec le changement climatique. Dans le cas de cette composante, une intensification du réchauffement climatique régional a donc pour effet de modérer l'élévation du niveau de la mer. Autrement dit, les scénarios minima présentés dans le tableau ci-dessous ont davantage de chance d'intervenir dans des cas où les autres processus contribuent à l'élévation du niveau de la mer, au-delà des valeurs médianes.

En première approximation, nous prenons en compte ce phénomène d'anticorrélation en combinant la valeur maximale (respectivement : minimale) des bilans de masse de surface de l'Antarctique avec les valeurs minimales (respectivement maximales) basses des autres contributions.

- **Calotte polaire antarctique : effets dynamiques (Tableau 2 f)**

Les effets dynamiques (Ritz *et al.*, 2015 ; De Conto et Pollar, 2016) sont dominés par les processus suivants :

- la fonte en surface favorisant la dislocation des plateformes de glace (*ice shelves*) ;
- l'accélération des écoulements des glaciers en amont des *ice shelves* se disloquant ;
- la fonte sous les *ice shelves*, induite par la température des océans ;
- les instabilités mécaniques (MISI - *marine ice sheet instabilities* - et MICI - *marine ice cliff instabilities* - c.f. De Conto et Pollar, 2016).

Les débats scientifiques sur la rapidité de l'élévation du niveau de la mer au XXI<sup>ème</sup> siècle se sont largement focalisés sur cette contribution. En effet, les processus de déstabilisation de la calotte de glace restent difficiles à modéliser. Par ailleurs, il est aujourd'hui difficile de relier des valeurs quantitatives à un scénario de changement climatique donné.

Néanmoins, De Conto et Pollar (2016), qui présentent un scénario de fonte rapide de l'Antarctique, estiment que les processus dynamiques ne s'accélèrent que dans la 2<sup>ème</sup> partie du XXI<sup>ème</sup> siècle. Ceci nous permet de compléter les valeurs proposées dans la littérature par des valeurs correspondant à une contribution modeste en 2055.

- **Contribution des eaux souterraines (Tableau 2 g)**
- **Contribution de l'ajustement isostatique global (GIA) (Tableau 2 h)**

Pour estimer les incertitudes des modèles de GIA, on dispose de deux modèles : celui de Lambeck et celui de Peltier (Church *et al.*, 2013). Localement, l'IPCC interprète les écarts entre ces modèles comme l'écart type d'une gaussienne représentant les incertitudes de l'ajustement isostatique global.

Contribution		Scenario	Minimum	Vraisemblable (valeur basse)	Médiane	Vraisemblable (valeur haute)	Maximum
<b>(a) Expansion thermique et dynamique océanique, effet barométrique inverse</b>	2055	RCP 2.6	0,035 <sup>1</sup>	0,055 ICDC	0,10 ICDC	0,15 ICDC	0,20 <sup>2</sup>
		RCP 4.5	0,035 <sup>1</sup>	0,061 ICDC	0,11 ICDC	0,16 ICDC	0,21 <sup>2</sup>
		RCP 8.5	0,035 <sup>1</sup>	0,078 ICDC	0,13 ICDC	0,18 ICDC	0,23 <sup>2</sup>
	2100	RCP 2.6	0,07 <sup>1</sup>	0,097 C13	0,16 ICDC	0,23 C13	0,30 <sup>2</sup>
		RCP 4.5	0,11 JJ16	0,14 C13	0,21 ICDC	0,29 C13	0,36 JJ16
		RCP 8.5	0,19 JJ16	0,23 C13	0,33 ICDC	0,43 C13	0,53 JJ16
<b>(b) Glaciers</b>	2055	RCP 2.6	0,03 <sup>4</sup>	0,030 ICDC	0,065 ICDC	0,10 ICDC	0,13 <sup>1</sup> M12
		RCP 4.5	0,035 <sup>4</sup>	0,035 ICDC	0,069 ICDC	0,11 ICDC	0,13 <sup>1</sup> M12
		RCP 8.5	0,04 <sup>3</sup>	0,042 ICDC	0,077 ICDC	0,11 ICDC	0,15 <sup>1</sup> M12
	2100	RCP 2.6	0,047 <sup>3</sup>	0,047 ICDC	0,11 ICDC	0,17 ICDC	0,21 <sup>1</sup>
		RCP 4.5	0,01 JJ16	0,07 ICDC	0,13 ICDC	0,20 ICDC	0,35 JJ16
		RCP 8.5	0,05 JJ16	0,10 ICDC	0,18 ICDC	0,26 ICDC	0,45 JJ16
<b>(c) Bilans de masse de surface de la calotte polaire groenlandaise</b>	2055	RCP 2.6	0,006 <sup>5</sup>	0,006 ICDC	0,014 ICDC	0,034 ICDC	0,068 <sup>5</sup>
		RCP 4.5	0,007 <sup>6</sup>	0,007 ICDC	0,016 ICDC	0,037 ICDC	0,074 <sup>5</sup>
		RCP 8.5	0,007 <sup>7</sup>	0,009 ICDC	0,020 ICDC	0,045 ICDC	0,09 <sup>5</sup>
	2100	RCP 2.6	0,01 <sup>6</sup>	0,01 ICDC	0,03 ICDC	0,08 C13	0,16 <sup>5</sup>
		RCP 4.5	0,02 JJ16	0,02 ICDC	0,05 ICDC	0,11 C13	0,2 JJ16
		RCP 8.5	0,03 JJ16	0,04 ICDC	0,10 ICDC	0,22 C13	0,4 JJ16
<b>(d) Effets dynamiques de la calotte polaire groenlandaise</b>	2055	RCP 2.6	0 <sup>9</sup>	0,011 ICDC	0,019 ICDC	0,028 ICDC	0,028 <sup>9</sup>
		RCP 4.5	0 <sup>9</sup>	0,011 ICDC	0,019 ICDC	0,028 ICDC	0,028 <sup>9</sup>
		RCP 8.5	0 <sup>9</sup>	0,012 ICDC	0,023 ICDC	0,034 ICDC	0,034 <sup>9</sup>
	2100	RCP 2.6	0,01 <sup>8</sup>	0,015 ICDC	0,04 ICDC	0,06 ICDC	0,15 <sup>8</sup>
		RCP 4.5	0,01 JJ16	0,015 ICDC	0,04 ICDC	0,06 ICDC	0,15 JJ16
		RCP 8.5	0,02 JJ16	0,02 ICDC	0,05 ICDC	0,08 ICDC	0,3 JJ16
<b>(e) Bilans de masse de surface de la calotte polaire antarctique</b>	2055	RCP 2.6	-0,05 <sup>12</sup>	-0,02 ICDC	-0,009 ICDC	-0,002 ICDC	0 <sup>10</sup>
		RCP 4.5	-0,05 <sup>12</sup>	-0,022 ICDC	-0,010 ICDC	-0,003 ICDC	0 <sup>10</sup>
		RCP 8.5	-0,05 <sup>12</sup>	-0,025 ICDC	-0,012 ICDC	-0,004 ICDC	0 <sup>10</sup>
	2100	RCP 2.6	-0,15 <sup>11</sup>	-0,046 ICDC	-0,02 ICDC	-0,005 ICDC	0 <sup>10</sup>
		RCP 4.5	-0,15 JJ16	-0,06 ICDC	-0,03 ICDC	-0,009 ICDC	0 JJ16
		RCP 8.5	-0,2 JJ16	-0,09 ICDC	-0,05 ICDC	-0,01 ICDC	0 JJ16
<b>(f) Effets dynamiques de la calotte polaire antarctique</b>	2055		0 <sup>13</sup>	0,001 ICDC	0,034 ICDC	0,067 ICDC	0,1 <sup>14</sup>
	2100		-0,02 JJ16	-0,02 ICDC	0,08 ICDC	0,19 ICDC	1,5 JJ16
<b>(g) Eaux souterraines</b>	Vers 2050		0 <sup>15</sup>	0,0023 ICDC	0,021 ICDC	0,040 ICDC	0,08 <sup>15</sup>
	2100		-0,07 C13	-0,015 C13	0,046 C13	0,11 C13	0,23 C13
<b>(h) Ajustement isostatique global</b>	Vers 2050		-0,02 <sup>16</sup>	-0,01 ICDC	0,002 ICDC	0,01 ICDC	0,02 <sup>16</sup>
	2100		-0,04 <sup>16</sup>	-0,018 C13	0,003 C13	0,023 C13	0,04 <sup>16</sup>

Tableau 2 - Valeurs globales considérées pour chaque contribution, en mètres par rapport à une référence 0 en 1986-2005 (sources : Church et al., 2013 [C13] ; Jackson et Jevrejeva, 2016 [JJ16] ; [ICDC] <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/ar5-slr.html> ; Marzeion et al., 2012 [M12]...)

(\*) A noter : cette contribution n'est pas conditionnée à un scénario RCP

1 : basé sur la poursuite des taux observés (moyenne moins un écart-type) sur la période 1993-2004 (Dieng et al., 2017)

2 : basé sur la médiane plus deux écarts types (niveau de confiance de 95% sous hypothèse de normalité)

3 : basé sur le scénario de fonte le plus rapide de M12 (Ré-analyse et projections de fonte des glaciers de montagne de Marzeion et al., 2012)

4 : basé sur le scénario de fonte minimal du GIEC (supérieur au scénario minimal de Marzeion et al., 2012).

5 : double de la valeur vraisemblable supérieure des projections, basée sur les écarts entre observations et modèles depuis deux décennies environ.

6 : basé sur la valeur vraisemblable inférieure des projections, de manière analogue au RCP 4.5 en 2100 (JJ16).

7 : basé sur la valeur vraisemblable inférieure des projections du RCP 4.5, de manière analogue au résultat présenté par JJ16 en 2100.

8 : basé sur les valeurs du RCP 4.5 (JJ16)

9 : L'article Fürst et al. (2016) suggère que la principale source d'incertitude concernant la fonte du Groenland porte sur les bilans de masse en surface (et non sur les effets dynamiques). Par ailleurs, il indique que cette contribution est nécessairement limitée.

10 : les bilans de masse en surface en Antarctique sont dominés par les effets des précipitations, que l'on anticipe en augmentation avec le changement climatique

11 : basé sur le RCP 4.5 (prudent)

12 : en l'absence de données quantitatives plus précises : double de la valeur vraisemblable basse du scénario RCP 8.5 en 2055.

En effet, De Conto et Pollar montrent que l'accumulation de précipitations sur l'antarctique précède l'accélération des processus de fonte dynamique. Néanmoins, leurs simulations (leur figure 4.d) n'excèdent pas les valeurs prudentes proposées ici.

13 : suppose que les phénomènes d'accélération de la contribution de l'Antarctique de l'Ouest, observés actuellement, s'interrompent rapidement.

14 : basé sur la médiane plus deux écarts types (niveau de confiance de 95% sous hypothèse de normalité), car De Conto et Pollar (2016) modélisent que les processus dynamiques ne s'accroissent que dans la 2ème partie du 21ème siècle.

15 : basé sur l'hypothèse que les eaux souterraines du sous-continent indien et de Californie continueront à être exploitées au-delà de leur capacité de recharge pendant les prochaines 50 années.

16 : basé sur la médiane plus deux écarts types (niveau de confiance de 95% sous hypothèse de normalité)

### Autres mouvements verticaux du sol

Aux mouvements verticaux du sol globaux s'ajoutent des affaissements ou des surrections régionales à locales, qui peuvent avoir de multiples origines : naturelles (tectonique, volcanisme), anthropogéniques (extractions de fluides du sous-sol, modification de l'occupation des sols induisant des variations de la teneur en eau des sédiments et la compaction du milieu).

Ces phénomènes ne peuvent être modélisés que lorsque suffisamment de données sont disponibles, ce qui n'est le cas que de manière exceptionnelle (ex : en Californie). En Nouvelle-Aquitaine, comme dans la plupart des autres régions côtières dans le monde, il est donc nécessaire d'avoir recours à des observations.

Nous examinons ci-dessous les tendances issues des GPS permanents de la base de données SONEL, sur 3 sites représentatifs de la côte aquitaine. Ces données ne permettent pas de dresser un portrait des mouvements verticaux du sol dans la région mais montrent la diversité de situations pouvant se présenter. On rappelle ici que les mesures de mouvements verticaux du sol sont essentiellement basées sur des mesures GPS. Elles sont donc représentatives d'une valeur locale.

Sites	Valeurs SONEL (moyenne et 1 écart type)	Confiance dans la mesure	Justification
La Rochelle	-0,11 +/- 0,16 mm/an	Très bonne	La série est de très bonne qualité et le site marégraphique de La Rochelle est considéré comme très stable sur la base de cette mesure.
Cap Ferret	-1,21 +/- 0,57 mm/an	Moyenne	Cette mesure de subsidence est cohérente avec des mesures de nivellement suggérant une subsidence modérée dans le bassin versant de la Leyre. Néanmoins, les incertitudes de mesures sont importantes et la série comporte une discontinuité.
Bayonne	-0,82 +/- 0,33 mm/an	Moyenne	Cette série comporte une discontinuité. Les valeurs de subsidences trouvées semblent élevées. Les incertitudes sont probablement sous estimées.
Saint-Jean-de-Luz	-2,69 +/- 0,28 mm/an	Faible	Cette série comporte deux discontinuités. Les valeurs de subsidence sont très rapide. Elles suggèrent un phénomène local ou bien des erreurs instrumentales.

Tableau 3 - Valeurs globales considérées pour les mouvements verticaux du sol à partir des données des GPS permanents de la base de données SONEL

Ce tableau montre que pour les sites instrumentés de la région Nouvelle-Aquitaine, on trouve des mouvements verticaux du sol allant de -3 mm/an à 0 mm/an. Au bout de 30 ans (en 2050), les variations de niveau de la mer locales pourraient ainsi s'écarter de la moyenne régionale de 9 cm sur le site de Saint-Jean-de-Luz (24 cm en 2100). Des valeurs plus importantes sont possibles sur des sites non instrumentés.

#### 4.1.4. Résultats

Les résultats présentés s'appuient sur des scénarios régionaux (sans prise en compte des mouvements verticaux du sol locaux) en région Nouvelle-Aquitaine.

##### **Estimation d'implications régionales de contraintes globales : le cas du RCP 4.5 en 2050**

L'illustration 48 montre l'approche générale permettant de générer des scénarios régionaux et présente les projections de chaque composante à l'élévation du niveau marin, en 2100 en Nouvelle-Aquitaine, dans le cas du scénario RCP 8.5. La médiane et l'intervalle vraisemblable de chaque contribution y sont représentés. 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.

Les carrés et triangles représentés en couleur noire indiquent les implications régionales de la contrainte globale (en rouge). Elles sont calculées comme expliqué dans la partie 4.1.2.

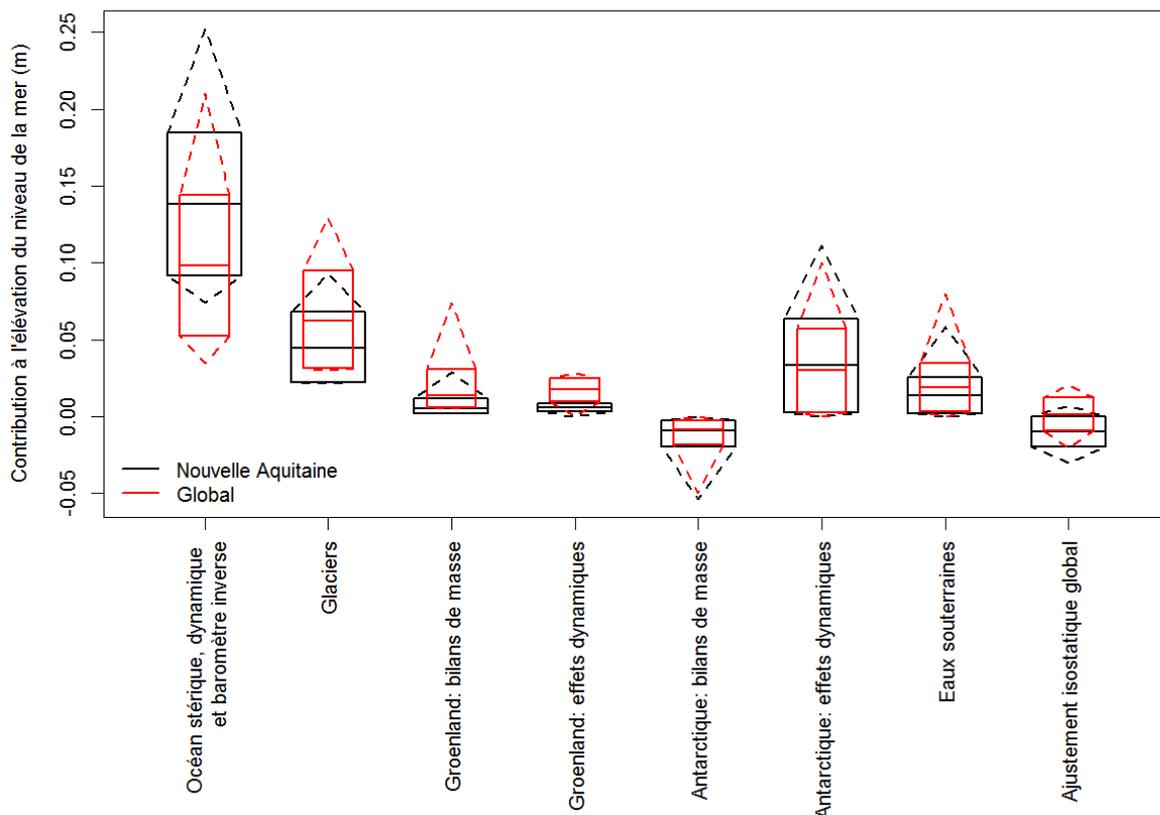


Illustration 48 - Contraintes globales (rouge) et implications régionales (noir) de chaque contribution à l'élévation du niveau de la mer dans le cas du RCP 4.5 vers 2050

L'illustration 48 montre que l'impact de la fonte du Groenland est atténué en Nouvelle-Aquitaine (la barre d'incertitudes régionale, en noir, est inférieure à la barre d'incertitudes globale, en rouge), tandis que la contribution de l'Antarctique est amplifiée (la barre d'incertitudes régionale, en noir, est légèrement supérieure à la barre d'incertitudes globale, en rouge). Ceci est lié aux effets gravitationnels, dont les empreintes spatiales sont présentées dans l'illustration 47. L'expansion thermique des océans est également sensiblement plus élevée qu'en moyenne globale.

L'illustration 49 montre que l'hypothèse consistant à sélectionner une seule valeur pour l'ensemble de la côte « Nouvelle-Aquitaine » est raisonnable. Elle montre que l'élévation du niveau de la mer pourrait être plus importante en milieu hauturier du golfe de Gascogne qu'en milieu côtier. Ceci s'explique par les effets de l'expansion thermique des océans, de la dynamique océanique et des changements de pression atmosphérique (Illustration 50), et, dans une certaine mesure, par l'ajustement isostatique global (i.e., la réponse de la terre solide à la dernière déglaciation initiée il y a 21 000 ans). En termes de limites des projections proposées dans l'illustration 48, il faut préciser que la circulation océanique n'est pas modélisée de manière complète sur le plateau continental. Aussi, il est possible que des phénomènes, plus locaux que ceux modélisés dans les simulations climatiques, modulent les scénarios présentés ici. In fine, ceci pourrait se traduire par une augmentation des incertitudes, peut-être de l'ordre d'une dizaine de centimètres supplémentaires.

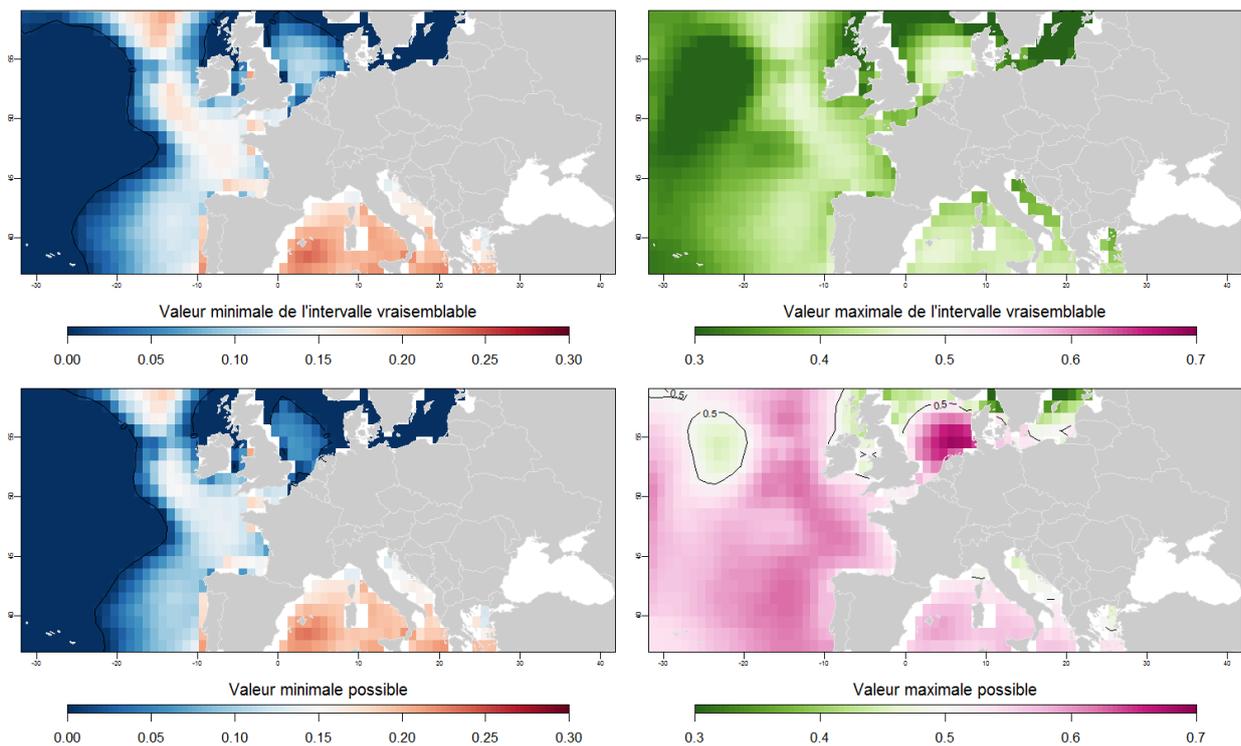


Illustration 49 - Variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer dans le cas du RCP 4.5 vers 2050

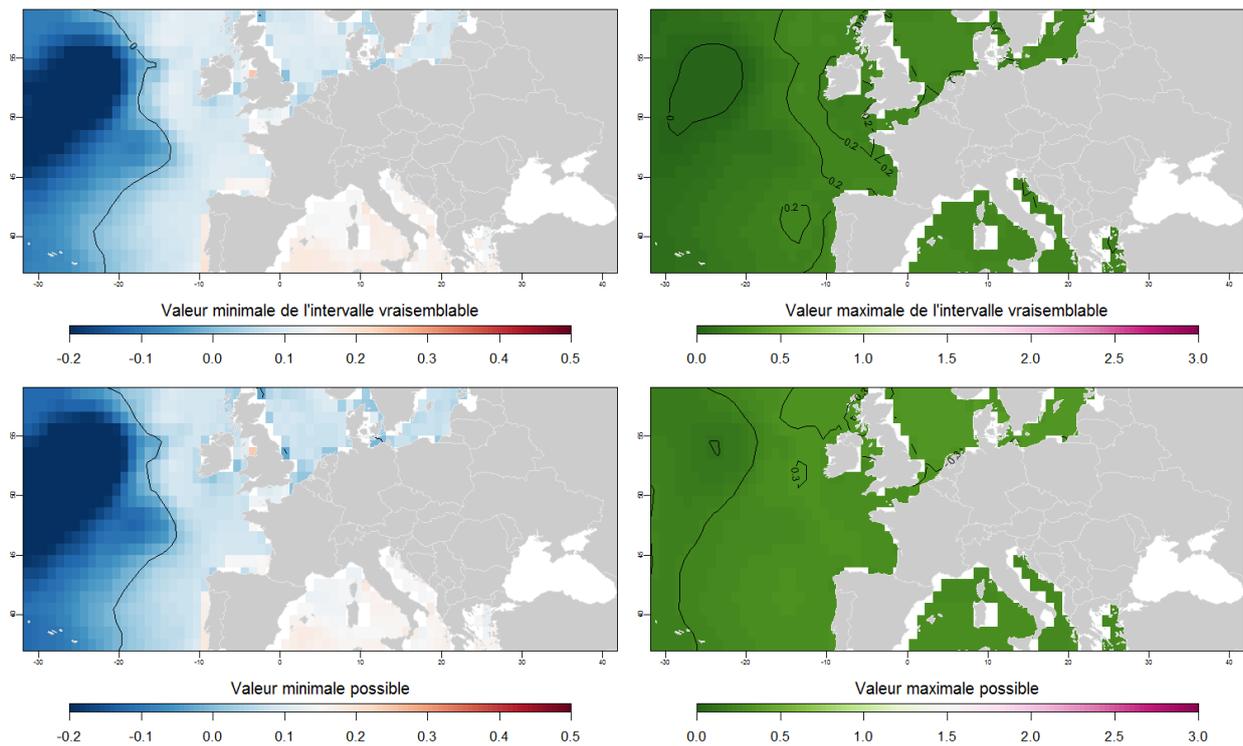


Illustration 50 - Variabilité régionale de la composante stérique de l'élévation du niveau de la mer dans le cas du RCP 4.5 vers 2050

### Dynamique temporelle

Outre la tendance à long terme de l'évolution du niveau de la mer, la variabilité saisonnière, interannuelle et multi-décennale superposée à cette tendance est importante. Des informations relatives à la variabilité temporelle des tendances d'évolution de l'élévation du niveau de la mer sont disponibles, comme indiqué précédemment, via l'*Integrated Climate Data Center* (ICDC) de l'Université de Hambourg, qui fournit les séries temporelles des projections du cinquième rapport d'évaluation AR5 de l'IPCC (Church *et al.*, 2013 ; Carson *et al.*, 2016). Cependant, ces informations n'incluent pas les processus océaniques à méso-échelle induisant une variabilité interannuelle à décennale du niveau de la mer, comme les modes de variabilité à basse fréquence El Niño (Becker *et al.*, 2012 ; Meyssignac *et al.*, 2012 ; Melet *et al.*, soumis), ni les interactions entre marées et élévation du niveau de la mer (Woodworth, 2010 ; Pickering *et al.*, 2017 ; Idier *et al.*, 2017). De plus, les mouvements verticaux terrestres (en particulier la subsidence) peuvent être fortement non linéaires à la fois dans l'espace et dans le temps, et sont susceptibles de dépendre de processus naturels ou anthropiques non prévisibles, tels que la tectonique ou les extractions d'eaux souterraines (i.e. Raucoules *et al.*, 2013).

### Projections régionales de l'élévation du niveau de la mer en région Nouvelle-Aquitaine

Des projections de l'élévation du niveau de la mer ont été réalisées pour la Nouvelle-Aquitaine, à partir des données exploitées dans les paragraphes précédents. Les composantes prises en compte sont celles de l'illustration 48.

Trois scénarios ont été proposés, pour les horizons 2050 et 2100 :

- le scénario RCP 2.6, dans lequel l'objectif de contenir le réchauffement global à 2°C d'ici 2100 par rapport à la période préindustrielle serait vraisemblablement atteint, considérant 2/3 de chances d'atteindre cet objectif de 2°C (et donc 1/3 de chances de le dépasser) ;
- le scénario RCP 4.5, qui correspond approximativement aux émissions de gaz à effet de serre auxquelles les Etats se sont déjà engagés dans l'accord de Paris. Ce scénario ne permet donc pas d'atteindre l'objectif de 2°C, mais il suppose déjà une réduction des émissions de gaz à effets de serre très importantes ;
- le scénario RCP 8.5, qui correspond à une poursuite des émissions actuelles.

Pour chaque scénario de changement climatique, plusieurs valeurs sont calculées (Tableau 4) :

- la valeur médiane ;
- les valeurs vraisemblables IPCC (Church *et al.*, 2013) / Integrated Climate Data Center (ICDC ; <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/ar5-slr.html>) ;
- les valeurs vraisemblables sans hypothèse sur la forme des distributions ;
- les valeurs min/max.

Au regard des résultats, écarts entre les scénarios et incertitudes, le comité de suivi a validé en séance la proposition de retenir des valeurs vraisemblables d'élévation du niveau marin calculé, compatibles avec l'objectif de sensibilisation des acteurs souhaité. La valeur médiane d'élévation du niveau marin de 0,21 m, calculée pour le scénario RCP 4.5 à l'horizon 2050, est retenue (Tableau 4 ; Illustration 51). Dans la suite de l'étude, les valeurs min/max seront également prises en considération et indiquées.

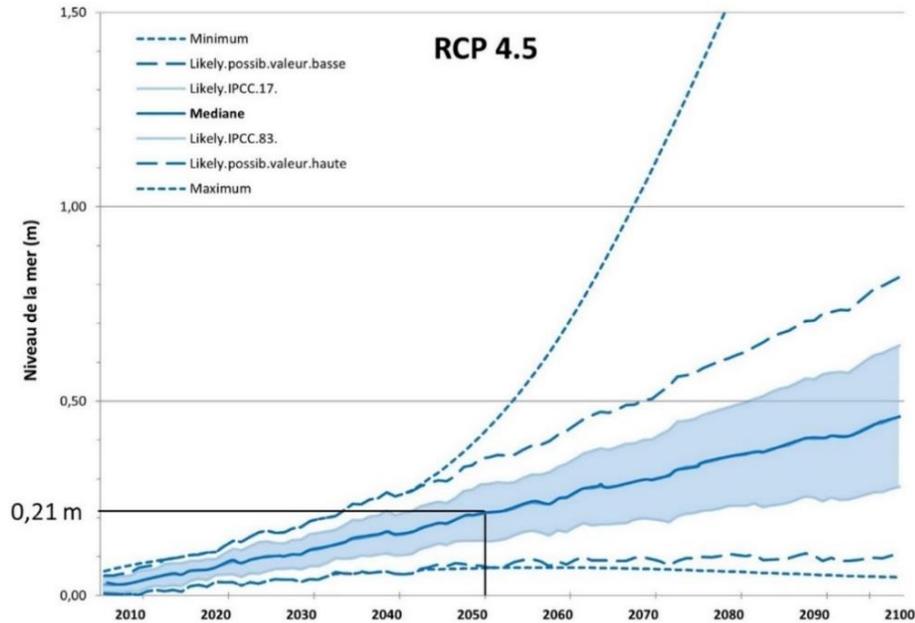
Scénario de changement climatique	Valeurs min/max	Valeur médiane	Valeurs vraisemblables IPCC	Valeurs vraisemblables sans hypothèses sur la forme des distributions
<b>En 2050</b>				
RCP 2.6	0,07 à 0,39 m	0,20 m	0,13 à 0,26 m	0,07 à 0,33 m
RCP 4.5	0,07 à 0,39 m	0,21 m	0,14 à 0,27 m	0,08 à 0,34 m
RCP 8.5	0,07 à 0,42 m	0,23 m	0,17 à 0,30 m	0,10 à 0,36 m
<b>En 2100</b>				
RCP 2.6	0,03 à 2,31 m	0,38 m	0,21 à 0,55 m	0,05 à 0,72 m
RCP 4.5	0,05 à 2,49 m	0,46 m	0,28 à 0,64 m	0,11 à 0,82 m
RCP 8.5	0,16 à 2,81 m	0,63 m	0,42 à 0,86 m	0,22 à 1,06 m

Tableau 4 - Projections de l'élévation du niveau de la mer, aux horizons 2050 et 2100, pour plusieurs scénarios (RCP 2.6, 4.5, 8.5). L'encadré noir souligne la valeur médiane de 0,21 m retenue pour l'horizon 2050 dans cette étude.

L'Illustration 51 représente l'évolution temporelle des projections de l'élévation du niveau de la mer pour le scénario RCP 4.5 en Nouvelle-Aquitaine. La médiane des projections y est indiquée (courbe continue bleue), considérant une chance sur deux d'être en dessous, et une chance sur deux d'être au-dessus, aux horizons 2050 comme 2100 dans le cas présent.

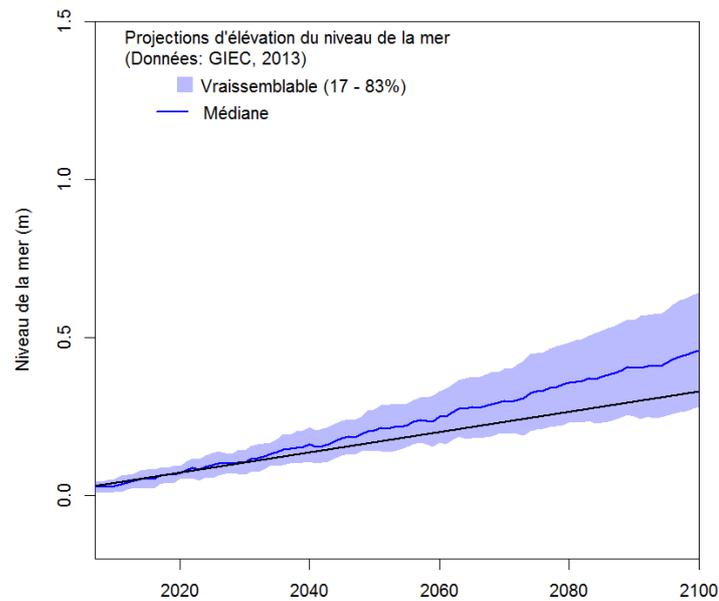
L'intervalle de confiance « vraisemblable » (aire bleu ciel) présenté dans l'Illustration 51 correspond aux valeurs vraisemblables selon l'IPCC. Dans la terminologie du GIEC, « vraisemblable » signifie qu'il existe au minimum 2 chances sur 3 de se situer dans cet intervalle de confiance. Le tiers de 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. Ainsi, les projections du GIEC, qui demeurent la référence, n'excluent donc pas une élévation du niveau de la mer plus rapide que celle présentée.



*Illustration 51 - Projection de l'élévation du niveau de la mer pour le scénario RCP 4.5: médiane, valeurs vraisemblables IPCC (aire bleu ciel), valeurs vraisemblables sans hypothèse sur la forme des distributions (pointillés longs), valeurs min/max (pointillés courts). La valeur médiane de 0,21 m retenue pour l'horizon 2050 dans cette étude est ici reportée.*

D'apparence linéaire, cette courbe présente bien une accélération, comme en témoigne (à titre purement comparatif) le report de la courbe théorique de poursuite des taux globaux observés/actuels de 3,2 mm/an (en noir) aux côtés des projections d'élévation du niveau de la mer pour le scénario RCP 4.5 en Nouvelle-Aquitaine (médiane en trait gras bleu, et plage bleu ciel des valeurs vraisemblables IPCC) (Illustration 52). L'accélération « contenue » pour le scénario RCP 4.5 dans la seconde partie du XXI<sup>ème</sup> siècle, par rapport à ce qu'anticipe le RCP 8.5, correspond au bénéfice attendu des réduction d'émissions de gaz à effet de serre (dans le RCP 4.5), et en raison de l'atténuation des contributions du Groenland et des glaciers en Nouvelle-Aquitaine (Illustration 48 ; Tableau 2).



*Illustration 52 - Comparaison des projections d'élévation du niveau de la mer pour le scénario RCP 4.5 en Nouvelle-Aquitaine (médiane en trait gras bleu, et plage bleu ciel des valeurs vraisemblables IPCC) avec la courbe théorique de poursuite des taux globaux observés/actuels de 3,2 mm/an (en noir)*

#### 4.1.5. Conclusion

Les résultats proposés dans cette section suivent les objectifs de l'action visant à définir l'impact du changement climatique sur l'évolution du trait de côte en Région Nouvelle-Aquitaine. Dans cette optique, des scénarios d'élévation du niveau marin à l'échelle régionale ont été établis, en distinguant les contributions de chacune des composantes du phénomène, pour plusieurs échéances temporelles et selon plusieurs scénarios climatiques. L'approche générale, basée sur des résultats globaux issus de travaux scientifiques (recherche, grands groupes de travail internationaux...), permet de générer des projections de niveau de la mer régionales et mobilisables dans la sphère des politiques publiques et acteurs locaux.

Au regard de l'importance des incertitudes des projections du niveau de la mer, il semble que celles-ci doivent être à minima communiquées aux acteurs publics concernés. Ces incertitudes peuvent être décrites par différents moyens : par des projections médianes et vraisemblables (selon l'approche du GIEC), et/ou couvrant des valeurs du niveau de la mer minimales et maximales (scénarios probabilistes). Pour la production des cartes d'aléa à l'horizon 2050, un scénario « vraisemblable » a été favorisé, en adéquation avec la démarche des Plans d'Adaptation au Changement Climatique, avec une valeur médiane de 0,21 m retenue pour l'horizon 2050 dans le cas du scénario RCP 4.5. Les valeurs min/max seront également indiquées, autant que possible.

Les valeurs d'élévation du niveau de la mer indiquées dans ce rapport sont amenées à évoluer avec de nouveaux résultats scientifiques. Cette réserve concerne tout particulièrement les valeurs maximales d'élévation du niveau de la mer, sur lesquelles il est difficile encore aujourd'hui de trouver un consensus. Actuellement, le débat scientifique sur l'existence ou non du processus d'instabilité de falaises de glace des calottes marines (Marine Ice Cliffs Instability, De Conto et Pollard, 2016). Si ce processus devait intervenir au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle, les projections d'élévation du niveau de la mer au-delà de 2050 devraient être révisées à la hausse.

## 4.2. DEVELOPPEMENT D'UN INDICATEUR D'EXPOSITION DU TRAIT DE CÔTE A L'ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER

Les conséquences de l'élévation du niveau de la mer sur la position du trait de côte dépendent de la nature de l'environnement géomorphologique (chapitre 2.2.2.) dans lequel il se situe. Une description de ces conséquences potentielles a donc été effectuée pour chacun des environnements du trait de côte en considérant une élévation du niveau marin de 21 cm à l'horizon 2050, selon une échelle de *1-faible exposition, 2-exposition modérée, 3-forte exposition*.

Pour certains environnements géomorphologiques présents dans les secteurs Pertuis-Estuaire et Bassin d'Arcachon (cordons littoraux, marais maritimes, ports, polders), le recours à des analyses topographiques a été nécessaire. Elles ont été menées à l'aide des données suivantes :

- données LiDAR, mises à disposition par le SIBA, concernant le Bassin d'Arcachon, acquises en 2016 ;
- levés LiDAR de l'IGN datés de 2012, obtenus via la plateforme Geoplateforme17 ;
- références altimétriques maritimes : RAM 2016 (SHOM, 2016).

Afin de d'étudier l'impact de l'élévation du niveau marin à l'horizon 2050, la méthode employée a consisté à relever le niveau des Plus Hautes Marées Astronomiques (PHMA), renseignées dans le RAM 2016 (Références Altimétriques Maritimes de 2016, éditées par le SHOM) et à y ajouter la valeur de 0,21 m. Les isolignes d'altitude de valeur PHMA + 0,21 m sont ensuite extraites des données LiDAR. Ainsi, les courbes de niveau suivantes ont été tracées :

- secteur Pertuis-Estuaire : 3,57 m (PHMA = 3,36 m NGF au port de La Rochelle) ;
- secteur Bassin d'Arcachon : 3,14 m (PHMA = 2,93 m NGF au port d'Arcachon).

A noter que la cartographie de ces courbes de niveau ne fournit pas la position du trait de côte consécutive à l'élévation du niveau marin de 0,21 m et ne permet pas de déduire la distance de recul par rapport au trait de côte actuel. L'impact de cette élévation s'estime par le croisement de plusieurs informations à dire d'expert. La cartographie des courbes de niveau précitées permet de visualiser l'espace au sein duquel le littoral est susceptible de se translater. Plus cet espace est large, plus l'exposition du trait de côte à l'élévation du niveau marin est supposée forte. Cependant, cette exposition dépend également de la capacité du littoral à migrer vers l'intérieur des terres. C'est pourquoi, une analyse de la géomorphologie, de la nature et de l'occupation du sol (bâti plus ou moins dense, marais maritimes, polders, ...) s'avère complémentaire et indispensable. Une illustration de cette méthode sera apportée dans les paragraphes suivants (Illustration 55).

### 4.2.1. Dune littorale

Les réflexions et le travail de bibliographie, menés sur les approches mobilisables dans le cadre de cette étude, ont permis de retenir deux méthodes pour quantifier l'impact de l'élévation du niveau de la mer, en termes de recul du trait de côte de la côte sableuse :

- une méthode basée sur la loi de Bruun (1962) ou ses variantes, consistant à ajouter les effets de l'élévation du niveau de la mer à ceux de la variabilité saisonnière et pluriannuelle de la position du trait de côte. La loi de Bruun repose sur le concept d'équilibre de la zone active de la plage sableuse, comprise entre une profondeur de fermeture et le haut de plage (Illustration 53).

Le principe suppose que le profil de plage sous-marine s'adapte à l'élévation du niveau de la mer en conservant sa forme avec une translation vers le rivage. A mesure que le niveau de

la mer s'élève, la plage maintient son profil d'équilibre en modifiant sa forme, en prélevant des sédiments sur le haut de plage et l'avant-dune, ce qui se traduit par un recul du trait de côte. Si ses concepts de profondeur de fermeture et de profil d'équilibre de plage sont controversés, car ses conditions d'application sont difficiles à réunir (équilibre du budget sédimentaire, absence de transit littoral), cette approche reste couramment utilisée pour fournir de premiers ordres de grandeur de recul du trait de côte liés à la montée du niveau marin (DGPR, 2014). Ceci motive le recours à une méthode alternative, afin d'estimer plus précisément les incertitudes de ces modèles d'impact.

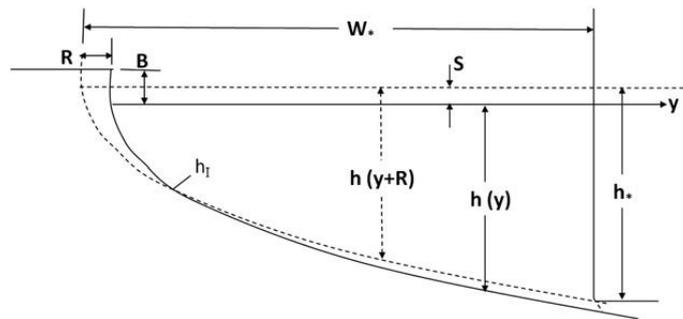


Illustration 53 - Evolution du profil côtier due à l'élévation du niveau de la mer, selon la règle de Bruun (1962) (figure extraite de Rosati et al., 2013)

- une seconde méthode, alternative, basée sur le modèle d'impact de Ranasinghe *et al.* (2012) fondé sur des processus physiques (*PCR - Probabilistic Coastline Recession - model*), qui fournit des estimations probabilistes de l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur les dunes côtières, en se focalisant sur les processus agissant au niveau de l'avant dune (pertes/gains de volumes sableux) (Illustration 54) : lors des tempêtes, le jet de rive atteint le pied de dune, ce qui engendre des transferts de matériaux depuis la dune vers la plage ; au contraire, par période de temps calme, une dune embryonnaire se reconstitue. Le modèle de Ranasinghe *et al.* (2012) calcule simplement le recul du trait de côte pour des successions d'événements couvrant des périodes de 100 ans, utilisant les projections IPCC pour estimer l'élévation du niveau de la mer au moment de chaque tempête. De plus, la méthode (*bootstrapping*) utilisée ici minimise l'incertitude associée aux estimations probabilistes fournies par le modèle. L'étude menée dans le cadre du programme d'accompagnement « adaptation » de l'Observatoire de la Côte Aquitaine (Le Cozannet *et al.*, 2017c) a montré que ce modèle complexe de Ranasinghe *et al.* (2012) pouvait être émulé de manière simple en remplaçant les valeurs de la pente de plage de « Bruun » par celles de la pente de plage intertidale dans la loi de Bruun (Le Cozannet et Bulteau, 2017). Les résultats présentés ci-après sont basés sur cette hypothèse.

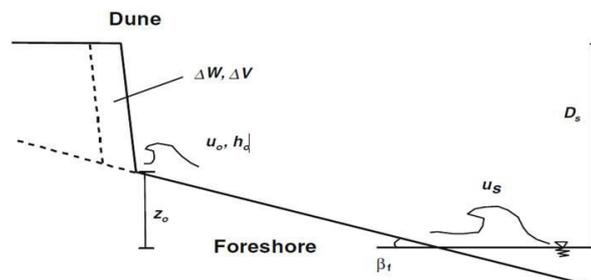


Illustration 54 - Modèle d'érosion des dunes utilisé en mode autonome comme fonction structurelle dans le modèle de Ranasinghe (schéma d'après Larson *et al.*, 2004)

Sur la base des scénarios d'élévation du niveau marin établis dans la section 4.1, les reculs induits (et leurs incertitudes) selon chaque scénario et chaque échéance temporelle ont été calculés.

L'implémentation de ces deux modèles sur le littoral de Nouvelle-Aquitaine souligne la simplicité de mise en œuvre de la loi de Bruun, tandis que le modèle de Ranasinghe, plus complexe, nécessite un temps de travail et de calcul nettement plus important (i.e. Le Cozannet et Bulteau, 2017). La quantification du recul du trait de côte sur la côte sableuse s'est basée sur des pentes de plages adaptées à la géomorphologie locale (1 à 5 %). Pour la loi de Bruun, une pente calculée, selon les paramètres géométriques de la plage, a été calculée entre la profondeur de fermeture (10 à 20 mètres) et le haut de plage : de l'ordre de 1% en moyenne en Aquitaine. Dans le cas du modèle de Ranasinghe, la pente de la zone intertidale est ici considérée et représente une pente de l'ordre de 5 % en moyenne.

La valeur de 0,21 m d'élévation du niveau de la mer précédemment déterminée est utilisée avec la loi de Bruun et une émulation du modèle de Ranasinghe *et al.* (2012) (ci-après désignée : méthode de Ranasinghe) pour calculer le recul associé à l'horizon 2050 (distance linéaire en arrière du trait de côte actuel). Ce recul est de l'ordre de 21 m pour la première méthode et de 4 m pour la seconde (Tableau 5), soit avec un facteur 5 entre les résultats proposés par les deux modèles.

Scénario de changement climatique	Valeurs min/max	Valeur médiane	Valeurs vraisemblables IPCC	Valeurs min/max	Valeur médiane	Valeurs vraisemblables IPCC
Modèle	Loi de Bruun - Pente 1%			Ranasinghe - Pente 5%		
<b>En 2050</b>						
RCP 2.6	6,7 à 38,6 m	19,9 m	13,4 à 26,4 m	1,3 à 7,7 m	4 m	2,7 à 5,3 m
RCP 4.5	7 à 39 m	20,6 m	14 à 27,2 m	1,4 à 7,8 m	4,1 m	2,8 à 5,4 m
RCP 8.5	6,8 à 41,8 m	23,1 m	16,5 à 29,7 m	1,4 à 8,4 m	4,6 m	3,3 à 5,9 m
<b>En 2100</b>						
RCP 2.6	2,8 à 231,2 m	38,3 m	21,3 à 55,1 m	0,6 à 46,2 m	7,7 m	4,3 à 11 m
RCP 4.5	4,7 à 248,9 m	46 m	28 à 64,3 m	0,9 à 49,8 m	9,2 m	5,6 à 12,9 m
RCP 8.5	16,4 à 280,8 m	63,3 m	41,7 à 85,9 m	3,3 à 56,2 m	12,7 m	8,3 à 17,2 m

Tableau 5 - Projections de recul du trait de côte, basées sur la loi de Bruun (1962) et le modèle de Ranasinghe *et al.* (2012), aux horizons 2050 et 2100, pour plusieurs scénarios (RCP 2.6, 4.5, 8.5)

La comparaison des deux approches menée sur le littoral de Nouvelle-Aquitaine souligne le fait que la loi de Bruun tend à maximiser les tendances de recul du trait de côte liées à l'élévation du niveau marin (100 fois l'élévation du niveau de la mer) par rapport au modèle de Ranasinghe (20 fois l'élévation). Plus lourd à mettre en œuvre, le modèle de Ranasinghe pourrait ainsi être approximé par les résultats de l'implémentation de la loi de Bruun divisés par 5.

La mise en œuvre de ces modèles d'impact permet de constater d'une part les limites du cadre probabiliste (confiance faible accordée aux limites inférieures et supérieures) et souligne, d'autre part, l'importance de prendre en compte l'incertitude associée à ces modèles d'impact

(la représentation cartographique proposant par exemple une valeur médiane, associée à une incertitude qualitative sous la forme de curseur adimensionnel).

Sur la base de ces éléments, il a été attribué aux dunes littorales une exposition modérée à l'élévation du niveau de la mer de 0,21 m à l'horizon 2050.

#### **4.2.2. Falaise rocheuse**

Les falaises rocheuses sont généralement constituées d'horizons géologiques compétents (calcaires, grés) et s'élèvent de plusieurs mètres par rapport au niveau marin. Cette configuration de côte conduit à estimer une faible exposition du trait de côte à l'élévation du niveau marin, comparativement à des côtes basses et/ou formées de roches meubles.

Cette faible exposition ne doit cependant pas occulter le caractère aggravant que constitue l'élévation du niveau marin sur l'érosion des falaises rocheuses.

#### **4.2.3. Plage de poche**

Les plages de poche sont le plus souvent des plages de sable encadrées par des éperons rocheux. Le trait de côte est alors marqué par une rupture topographique en haut de plage, de type berme, ou fixé par un ouvrage. L'altitude de ces plages est de quelques mètres tout au plus et leur largeur perpendiculairement au trait de côte est limitée. Il est rappelé que la majorité des plages de poche forment des cellules hydro-sédimentaires à part entière, avec des transferts de sédiments dans le profil essentiellement.

Pour comprendre la réponse de ces plages à une élévation du niveau marin, une analyse de l'environnement géomorphologique et de la topographie en arrière du trait de côte a été conduite. Deux situations sont distinguées :

- la plage est bordée, en arrière du trait de côte, par une falaise rocheuse : l'exposition à l'élévation du niveau de la mer est estimée modérée. En effet, une fois la falaise atteinte par l'océan, la dynamique de recul du trait de côte évoluera d'une érosion de matériaux meubles relativement rapide, vers une érosion de falaise plus lente. Ces plages se rencontrent dans le secteur Pertuis-Estuaire (Illustration 8).

- les formations situées en arrière du trait de côte sont meubles, de type alluvions ou altérites. L'élévation du niveau marin et la disponibilité en sédiments permettent alors à la plage de reculer et de conserver sa dynamique d'évolution. L'exposition à l'élévation du niveau marin vis-à-vis du recul du trait de côte est alors évaluée forte. Cette configuration de plage est présente sur la côte rocheuse basque (Illustration 9).

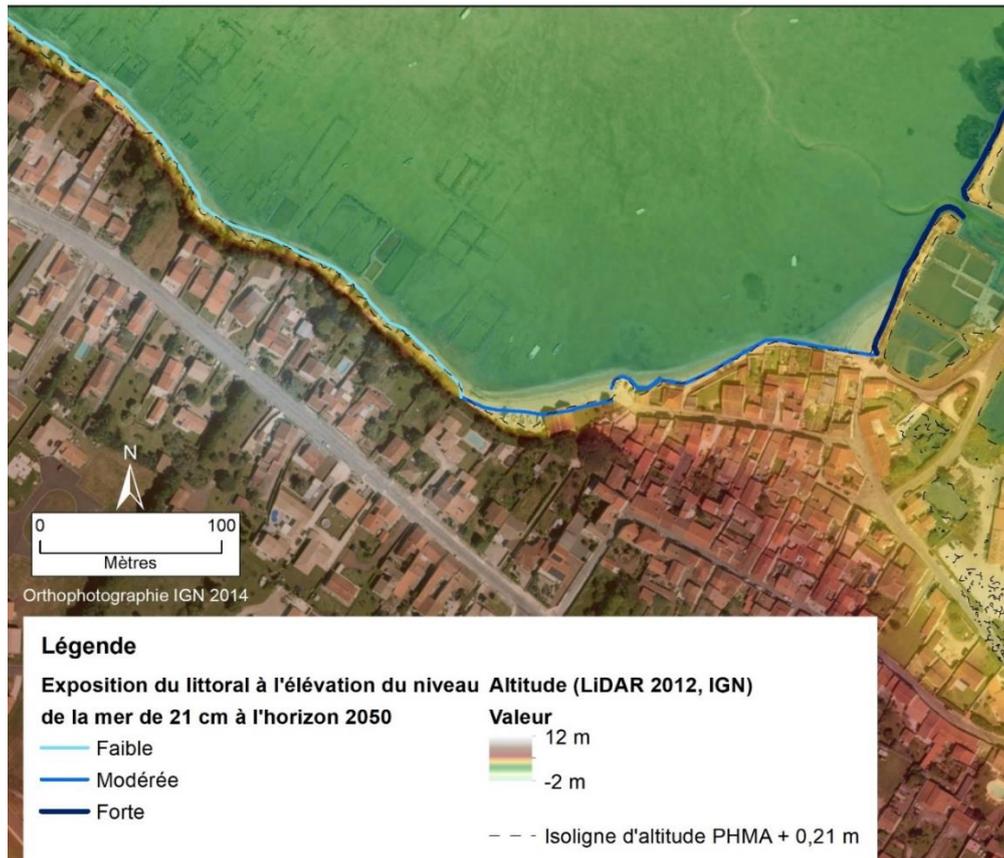
#### **4.2.4. Cordon de galets et cordons sableux**

Les cordons littoraux se forment par l'atterrissement en haut de plage des sédiments (sableux ou galets) mobilisés lors d'épisodes tempétueux par la houle et le vent. Ils forment alors des bourrelets topographiques, peu élevés et minces, qui ferment les anses actuelles.

Dans le pertuis charentais, la dynamique des cordons littoraux en réponse à l'élévation du niveau marin est un recul régulier vers l'intérieur des terres durant l'Holocène. On trouve actuellement, sous les vases flamandaises (appelées localement « bri »), d'anciens cordons littoraux, témoins d'un niveau marin historique plus bas que l'actuel. Ainsi, l'élévation du niveau marin induit une migration du bourrelet vers l'intérieur des terres. Si l'élévation du niveau marin

est rapide, il est probable que le cordon littoral s'amincisse, susceptible alors d'augmenter le risque de brèche lors de tempêtes.

L'exposition des cordons littoraux à l'élévation du niveau de la mer a été définie essentiellement au regard de la topographie située en arrière du cordon. Plus la zone située en arrière est topographiquement basse et étendue, plus l'exposition est forte. L'illustration 55 représente ces différentes configurations en arrière de cordons de galets sur la commune de Bourcefranc-le-Chapus.



*Illustration 55 - Analyse de la topographie en arrière de cordons de galets sur la commune de Bourcefranc-le-Chapus (17). D'est en ouest, l'altitude des zones situées en arrière du cordon augmente (de polders vers une falaise rocheuse) : l'exposition du trait de côte à l'élévation du niveau de la mer diminue. PHMA : plus haute marée astronomique (RAM, 2016).*

#### 4.2.5. Flèches sableuses

Par définition mobiles, les petites flèches sableuses ont été caractérisées "fortement exposées" à l'élévation du niveau marin. En effet, la faible profondeur du fond environnant étant un paramètre à l'origine de leurs formations, ces petites flèches sont très sensibles à l'élévation du niveau marin.

#### **4.2.6. Grandes flèches sableuses**

Les grandes flèches sableuses de Gatseau et du Cap Ferret ont été caractérisées "fortement exposées" à l'élévation du niveau marin à leur extrémité, du fait de leur forte dynamique d'évolution dans ces secteurs.

En amont de ces extrémités fortement mobiles, les grandes flèches sableuses ont été qualifiées de "modérément exposées" à l'élévation du niveau marin ; leur dynamique d'évolution s'apparentant plutôt à des environnements de type dune littorale.

#### **4.2.7. Marais maritime**

Les marais maritimes sont de vastes plaines de basse altitude faiblement inclinées vers l'océan. Ces caractéristiques ont conduit à estimer que l'élévation du niveau de la mer impliquera des reculs significatifs ; l'exposition à ce phénomène est ainsi évaluée "forte". Par ailleurs, cette élévation induira une intensification des phénomènes de submersion marine. Bien que non étudiée ici, la submersion marine induit une érosion des terrains, notamment par ressuyage et mise à nu du sol (destruction de la végétation).

#### **4.2.8. Polder**

Les polders sont des zones artificielles construites sur l'espace maritime par un maillage de digues. Ces ouvrages ne sont pas considérés pérennes à l'horizon 2050, conformément à l'hypothèse suivie dans cette étude pour caractériser l'évolution du trait de côte. Par ailleurs, les polders sont, à l'instar des marais maritimes, de larges territoires avec une cote altitudinale généralement en dessous du niveau des plus hautes mers. Pour ces raisons, les polders ont été caractérisés "fortement exposés" à l'élévation du niveau de la mer.

#### **4.2.9. Port**

L'hypothèse adoptée dans cette étude considère que les ouvrages portuaires ont une forte exposition à l'élévation du niveau de la mer.

### **4.3. CARTOGRAPHIE DE L'EXPOSITION DU LITTORAL DU BASSIN ADOUR-GARONNE A L'ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER**

Les résultats sont présentés sur l'illustration 56 et dans le Tableau 6.

Sur un linéaire total de 625 km du littoral Adour-Garonne, 96,2 km, soit 15,4 %, sont faiblement exposés à l'élévation du niveau marin. Par analyse topographique et géomorphologique présentée ci-avant, les environnements concernés sont les falaises rocheuses (10,5 %), les cordons sableux (2,4 %), les dunes littorales (2,1 %) et les cordons de galets (0,4 %).

Les secteurs modérément exposés couvrent plus de la moitié du littoral Adour-Garonne (350,8 km, soit 56,1 % du linéaire total). Ils sont largement représentés par les environnements de dunes littorales (50,2 %), présents de l'Île d'Oléron au nord à la pointe Saint Martin au sud. Les 5,9 % restants sont répartis sur les environnements de cordon sableux (3,4 %), de grande flèche sableuse (1,4 %) de cordon de galets (1,1 %) et de plage de poche (0,1 %).

Enfin, une exposition forte à l'élévation du niveau de la mer de 0,21 m à l'horizon 2050 a été déterminée sur 178,0 km, soit 28,5 % du linéaire côtier total du bassin Adour-Garonne. Cette

forte exposition concerne tous les environnements géomorphologiques distingués dans cette étude, à l'exception des côtes à falaises rocheuses, à savoir : les polders (10,9 %), les ports (5,9 %), les marais maritimes (0,6 %), les cordons sableux (4,76 %), les petites flèches sableuses (2,8 %), les plages de poche (1,3 %), les cordons de galets (1,2 %), les grandes flèches sableuses (0,9 %) et les dunes littorales (0,2 %).

Exposition du littoral à l'élévation du niveau de la mer de 21cm en 2050	Linéaire	%
Faible	96,2	15,4%
Modérée	350,8	56,1%
Forte	178,0	28,5%
<b>Total</b>	<b>625,0</b>	<b>100,0%</b>

Tableau 6 - Linéaires du littoral du bassin Adour-Garonne et exposition à l'élévation du niveau marin à l'horizon 2050

D'un point de vue cartographique, la majorité des sites fortement exposés se trouvent dans les secteurs Pertuis-Estuaire et du Bassin d'Arcachon ; c'est en effet dans ces secteurs relativement abrités des houles que les environnements portuaires et poldérisés sont les plus développés.

D'après la caractérisation de l'impact de l'élévation du niveau marin de 21 cm à 2050 adoptée dans cette étude, la côte sableuse et le littoral océanique ouvert du secteur Pertuis-Estuaire sont globalement modérément exposés.

Enfin, la côte rocheuse basque est, à l'exception des quelques plages de poche, essentiellement formée de falaises rocheuses, justifiant une exposition faible à l'élévation du niveau marin. Ces côtes rocheuses couvrent des linéaires non négligeables dans le secteur Pertuis-Estuaire, comme par exemple les falaises calcaires et marneuses jurassiques de la pointe de Chassiron (nord de l'île d'Oléron) ou encore les falaises calcaires du Maastrichtien (Crétacé supérieur) de la rive droite de l'estuaire de la Gironde.

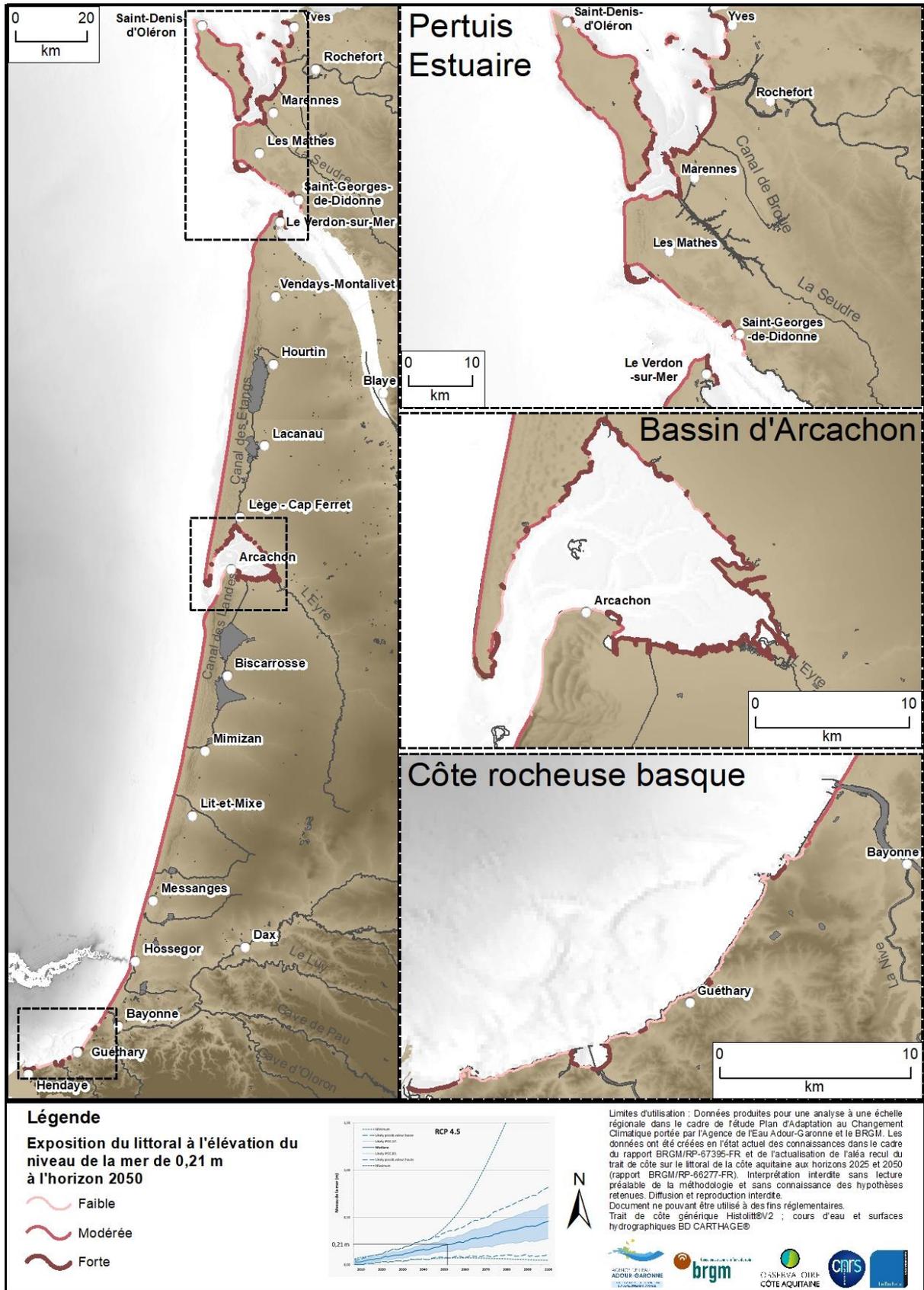


Illustration 56 - Exposition du littoral du bassin Adour-Garonne à l'élévation du niveau marin à l'horizon 2050

## 5. Détermination de la vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte dans un contexte de changement climatique

### 5.1. METHODE DE CARACTERISATION

Les chapitres précédents ont permis de déterminer, sur tout le linéaire côtier du bassin Adour-Garonne :

- d'une part, des distances potentielles de recul du trait de côte à l'horizon 2050, traduisant la sensibilité du littoral à ce phénomène ;
- d'autre part, une élévation du niveau marin de 0,21 m à l'horizon 2050 (valeur médiane des projections d'élévation selon le scénario 4.5 du GIEC). Les conséquences potentielles de cette élévation sur les environnements littoraux du bassin Adour-Garonne ont été étudiées et définissent l'exposition du littoral à ce phénomène.

La vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte dans un contexte de changement climatique a été caractérisée par combinaison de ces deux paramètres, comme le présente la matrice du Tableau 7. Quatre classes de vulnérabilité ont ainsi été déterminées : faible, modérée, forte, très forte.

Exposition du littoral à l'élévation du niveau marin (0,21m à 2050) \ Sensibilité du littoral au recul du trait de côte à l'horizon 2050	Faible	Modérée	Fort
Inférieure à 30 m	Faible	Modérée	Forte
30 m à 60 m	Modérée	Modérée	Forte
60 m à 90 m	Forte	Forte	Très forte
Supérieure à 90 m	Très forte	Très forte	Très forte

Tableau 7 - Définition de la vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte dans un contexte de changement climatique à l'horizon 2050 : combinaison de la sensibilité du littoral au recul du trait de côte avec l'exposition du littoral à l'élévation du niveau marin

### 5.2. RESULTATS

Les résultats sont présentés sur l'illustration 57 et dans le Tableau 8. Ils sont développés dans des paragraphes distincts par classe de vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte en lien avec une élévation du niveau marin de 0,21 m à l'échéance 2050.

Ces classes de vulnérabilité apparaissent relativement bien distribuées sur l'ensemble de l'emprise géographique étudiée.

Vulnérabilité	Environnement	Littoral Adour-Garonne	
		Linéaire (km)	% du linéaire total
Faible	<i>Cordon de galets</i>	2,3	0,4%
	<i>Cordon sableux</i>	8,1	1,3%
	<i>Dune littorale</i>	0,1	0,0%
	<i>Falaise rocheuse</i>	52,7	8,4%
<b>Total Faible</b>		<b>63,2</b>	<b>10,1%</b>
Modérée	<i>Cordon de galets</i>	6,7	1,1%
	<i>Cordon sableux</i>	22,9	3,7%
	<i>Dune littorale</i>	136,2	21,8%
	<i>Falaise rocheuse</i>	13,1	2,1%
	<i>Plage de poche</i>	0,9	0,1%
<b>Total Modérée</b>		<b>179,8</b>	<b>28,8%</b>
Forte	<i>Cordon de galets</i>	7,4	1,2%
	<i>Cordon sableux</i>	34,3	5,5%
	<i>Dune littorale</i>	107,8	17,3%
	<i>Flèche sableuse</i>	2,4	0,4%
	<i>Grande flèche sableuse</i>	0,1	0,0%
	<i>Marais maritime</i>	3,7	0,6%
	<i>Plage de poche</i>	8,2	1,3%
	<i>Polder</i>	68,1	10,9%
	<i>Portuaire</i>	36,0	5,8%
<b>Total Forte</b>		<b>268,0</b>	<b>42,9%</b>
Très forte	<i>Cordon sableux</i>	0,3	0,1%
	<i>Dune littorale</i>	83,9	13,4%
	<i>Flèche sableuse</i>	15,2	2,4%
	<i>Grande flèche sableuse</i>	13,9	2,2%
	<i>Portuaire</i>	0,7	0,1%
<b>Total Très forte</b>		<b>114,0</b>	<b>18,2%</b>
<b>Total général</b>		<b>625,0</b>	<b>100,0%</b>

Tableau 8 - Classes de vulnérabilité du littoral du bassin Adour-Garonne au recul du trait de côte, en lien avec l'élévation du niveau marin de 0,21 m à l'horizon 2050 : linéaires par environnement côtier

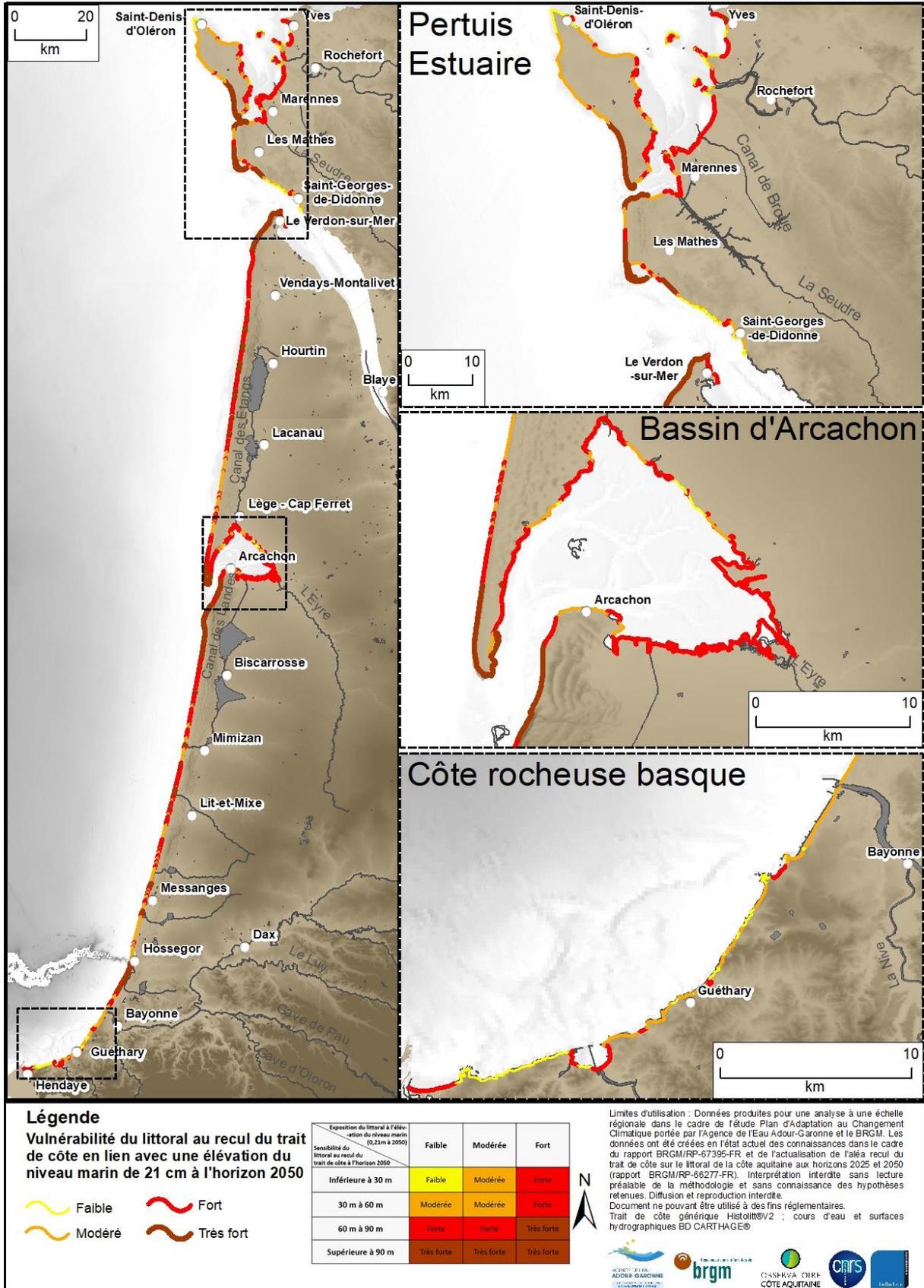


Illustration 57 - Cartographie de la vulnérabilité du littoral du bassin Adour-Garonne au recul du trait de côte, en lien avec l'élévation du niveau marin de 0,21 m à l'horizon 2050

### 5.2.1. Faible vulnérabilité

Les faibles vulnérabilités du littoral au recul du trait de côte en lien avec une élévation du niveau de la mer de 0,21 m à l'horizon 2050 s'étendent sur 63,2 km (10,1 % du linéaire du bassin Adour-Garonne). Elles se concentrent essentiellement sur les secteurs Pertuis-Estuaire et de la côte rocheuse basque, où les falaises rocheuses sont présentes. Dans cette classe de vulnérabilité, ces falaises rocheuses représentent à elles-seules 52,7 km (soit plus de 80 % du linéaire de cette classe). Elles constituent en effet des zones où les distances de recul à l'horizon 2050 sont généralement faibles, du fait de taux de recul moyens annuels peu élevés (inférieurs à 0,5 m/an) et d'une faible exposition à l'élévation du niveau marin.

Les cordons sableux sont qualifiés par de faibles vulnérabilités sur 8,1 km (soit 12,8 % du linéaire de cette catégorie). Ils sont situés dans des zones très localisées des secteurs Pertuis-Estuaire et du Bassin d'Arcachon. A noter que les secteurs présentant une faible vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte dans un contexte de changement climatique peuvent par ailleurs être exposés à une vulnérabilité plus forte vis-à-vis de la submersion marine (faisant l'objet d'une étude menée en parallèle par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne dans le cadre du PACC, basée sur la cartographie des zones basses du Cerema). Enfin, quelques 2,3 km (0,4 % du total de cette classe) sont des cordons de galets très localisés dans le secteur Pertuis-Estuaire, et une centaine de mètres de dunes littorales, négligeables, ont également été caractérisés par une faible vulnérabilité.

### 5.2.2. Vulnérabilité modérée

179,8 km soit 28,8 % du linéaire étudié, sont caractérisés "modérément vulnérables" au recul du trait de côte en lien avec une élévation du niveau marin de 0,21 m à l'horizon 2050. Plus des  $\frac{3}{4}$  de ce linéaire - 136,2 km - correspondent à des secteurs de dunes littorales qui parcourent les côtes de l'île d'Oléron, de la presqu'île d'Arvert, du sud du département de la Gironde et le littoral landais. Ces zones sont classiquement caractérisées par une sensibilité au recul du trait de côte modérée (avec des taux moyens de reculs de l'ordre de 1 m/an), et par une exposition à l'élévation du niveau marin également modérée.

Le quart restant du linéaire de cette classe de vulnérabilité est distribué dans les environnements :

- de cordons sableux à hauteur de 22,9 km, soit plus de 12 % du linéaire modérément vulnérable, répartis au sein des secteurs Pertuis-Estuaire et du Bassin d'Arcachon ;
- de falaises rocheuses, situées uniquement sur la côte rocheuse basque, entre Biarritz et Saint-Jean-de-Luz, sur 13,1 km (7,3 % du total de cette classe) ;
- de cordons de galets, couvrant 6,7 km (3,7 % de cette classe) de côte sur le secteur Pertuis-Estuaire (pointe de l'Aiguille à Fouras, ou encore de la pointe de Chapus par exemple) ;
- de plages de poche sur des linéaires très réduits, de l'ordre de 900 mètres au total (0,5 % de cette classe), localisées au creux de quelques anses de la rive droite de l'estuaire de la Gironde, telle que la baie du Pigeonnier à proximité de la pointe du Chay.

### 5.2.3. Forte vulnérabilité

Tous les environnements côtiers étudiés sont tout ou partiellement affectés par une forte vulnérabilité au recul du trait de côte, en lien avec l'élévation du niveau marin de 0,21 m à

l'horizon 2050. Cette classe de forte vulnérabilité est la mieux représentée sur le littoral Adour-Garonne, couvrant 268,0 km au total soit 42,9 % des 625,0 km de côte.

L'environnement de dunes littorales constitue, à hauteur de 107,8 km (40,2 % des 268,0 km de cette classe), la fraction la plus importante de ce linéaire fortement vulnérable. Les dunes littorales fortement vulnérables occupent de grands linéaires côtiers de la Gironde et des Landes, particulièrement dans la moitié nord de ces départements. Les distances de recul potentielles à l'horizon 2050 y sont élevées (60 m à 90 m) et l'exposition à l'élévation du niveau marin à cette même échéance est modérée. Quelques dunes littorales situées dans les secteurs Pertuis-Estuaire et du Bassin d'Arcachon sont également incluses dans cette classe.

Les environnements artificiels de polders et portuaires sont également bien représentés dans cette classe de vulnérabilité, occupant respectivement 68,1 km et 36,0 km (25,4 % et 13,4 % du linéaire fortement vulnérable) du linéaire côtier du Bassin d'Arcachon et du secteur Pertuis-Estuaire pour l'essentiel.

Les cordons sableux fortement vulnérables se retrouvent, pour la plupart, sur la façade continentale inter-pertuis de la zone Pertuis-Estuaire, et sur la façade interne nord-ouest du Bassin d'Arcachon, sur 34,3 km (12,8 %) du littoral de cette classe.

Les plages de poches de la côte basque ont été caractérisées fortement vulnérables du fait essentiellement d'une forte exposition à l'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2050 ; 8,2 km sont concernés (3,0 %). Près de la moitié des cordons de galets présents sur le territoire, dans le secteur Pertuis-Estuaire, sont inclus dans cette classe et couvrent 7,4 km (2,8 %).

Les autres environnements fortement vulnérables parcourent des portions plus restreintes et localisées du littoral. Parmi eux se rencontrent exclusivement les marais maritimes (3,7 km, soit 0,6 % du total de cette classe), aux faibles distances potentielles de recul mais à la forte exposition à l'élévation du niveau marin ; et les flèches sableuses (flèches sableuses : 2,4 km soit 0,4 % ; grandes flèches sableuses : 0,1 km, négligeable).

#### **5.2.4. Très forte vulnérabilité**

Les très fortes vulnérabilités sont présentes sur 114,0 km soit 18,2 % des 625,0 km du littoral du bassin Adour-Garonne. Elles se situent sur des secteurs comportant généralement une dynamique d'évolution très forte, et notamment les secteurs d'embouchure fluviale et de pertuis. Ainsi, les dunes littorales (83,9 km, soit près des  $\frac{3}{4}$  du linéaire de cette classe), situées à proximité du pertuis de Maumusson, de la pointe de Grave, des passes du Bassin d'Arcachon et des courants landais, sont très fortement vulnérables. C'est également dans ces secteurs que se sont développées les grandes flèches sableuses formant les pointes de Gatseau et du Cap Ferret, caractérisées à leurs extrémités par cette très forte vulnérabilité, sur 13,9 km soit 12,2 % du linéaire de cette classe.

Cette classe contient enfin la majorité des petites flèches sableuses recensées sur le territoire étudié, occupant 15,2 km (13,3 %) du littoral très fortement vulnérable. Ce caractère pour cet environnement est justifié en raison, à l'instar des grandes flèches sableuses, d'une dynamique d'évolution forte, liée à une embouchure fluviale ou à un changement brutal d'orientation du trait de côte.

Quelques centaines de mètres appartenant aux environnements de ports et de cordons sableux, anecdotiques (respectivement 0,7 km et 0,3 km), complètent les 114,0 km de littoral qualifiés très fortement vulnérables.



## 6. Conclusion

Cette étude s'inscrit en complémentarité d'actions relatives à la caractérisation de l'aléa recul du trait de côte et de l'impact du changement climatique réalisées en Nouvelle-Aquitaine. Elle permet par ailleurs de contribuer au volet « Littoral » du Plan d'Adaptation au Changement Climatique élaboré par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne.

Elle propose une cartographie de la vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte, en tenant compte des effets du changement climatique. Le territoire d'étude correspond à la façade océanique du littoral Adour-Garonne : de la baie d'Yves au nord, à l'estuaire de la Bidassoa au sud, où les agents météo-marins sont les principaux moteurs de l'évolution du littoral.

Pour ce faire, après détermination des différents environnements géomorphologiques existants sur le littoral Adour-Garonne, l'analyse s'est déroulée en 3 étapes :

1. Caractérisation de la sensibilité du littoral au recul du trait de côte à l'horizon 2050 ;
2. Caractérisation de l'exposition du littoral au changement climatique à l'horizon 2050, traduite par l'exposition à l'élévation du niveau marin à cette échéance calculée spécifiquement pour cette étude à 0,21 m (valeur médiane selon le scénario RCP 4.5) ;
3. Combinaison des deux paramètres précédents pour déterminer la vulnérabilité du littoral au recul du trait de côte en lien avec l'élévation du niveau de la mer de 0,21 m à l'échéance 2050.

Sur les 625,0 km du littoral Adour-Garonne étudié, la vulnérabilité au recul du trait de côte en tenant compte d'une élévation du niveau marin de 0,21 m à l'échéance 2050 a été qualifiée de :

- **faiblement vulnérable sur 63,2 km soit 10,1 % du littoral**, correspondant pour plus de 80 % à des zones de falaises rocheuses ;
- **modérément vulnérable sur 179,8 km soit 28,8 % du littoral**, dont  $\frac{3}{4}$  sont des cordons dunaires situés sur l'île d'Oléron, la presqu'île d'Arvert, le sud du département de la Gironde et le littoral landais ;
- **fortement vulnérable sur 268,0 km soit 42,9 % du littoral**, regroupant pour l'essentiel des environnements de dunes littorales (40,2 %), de ports (25,4 %) et de polders (13,4 %) ;
- **très fortement vulnérable sur 114,0 km soit 18,2 % du littoral**, où près des  $\frac{3}{4}$  du linéaire concerné sont formés par les dunes littorales et les flèches sableuses indifférenciées situées aux embouchures fluviales/estuariennes du bassin, où la dynamique d'évolution du trait de côte est particulièrement active.



## 7. Bibliographie

**AUBIE S., MALLET C. et FAVENNEC J. avec la collaboration de 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 ill. 97 p., 2 Ann.

**AULY T. et VEIGA J. (2010)** - Le Bassin d'Arcachon : un milieu naturel menacé ? Editions Confluences, Fédérations départementales des chasseurs de la Gironde, 277 p.

**ARTELIA (2016)** - Etude des aléas et enjeux du bassin de la Seudre et des marais de Brouage : 6 cartes des évolutions du trait de côte et du taux d'érosion par tronçons

**BAMBER J.L., ASPINALL W.P. (2013)** - An expert judgement assessment of future sea level rise from the ice sheets. *Nat. Clim. Change*, 3, pp 424–27.

**BECKER M., MEYSSIGNAC B., LETETREL C., LLOVEL W., CAZENAVE A., DELCROIX T., (2012)** - Sea level variations at tropical pacific islands since 1950. *Glob. Planet. Chang.*, 80–81, pp 85–98.

**BERNON N., MALLET C., BELON, R., avec la collaboration de HOAREAU A., BULTEAU T. et GARNIER C. (2016)** - Caractérisation de l'aléa recul du trait de côte sur le littoral de la côte aquitaine aux horizons 2025 et 2050. Rapport final. BRGM/RP-66277-FR, 99 p., 48 Ill., 16 tab., 2 ann., 1 CD.

**BLIARD F., BERTIN X. (2016)** - Evolution pluri-décennale des littoraux adjacents au pertuis de Maumusson (Charente - Maritime). Mémoire de stage, 60 p., 3 ann.

**BRL Ingénierie (2013)** - Révision du plan de prévention des risques naturels de l'île d'Oléron - PHASE 4 : Quantification des aléas. 16 p.

**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.

**BULTEAU T., MUGICA J., MALLET C., GARNIER C., ROSEBERY D., MAUGARD F., NICOLAE LERMA A., NAHON A., avec la collaboration de MILLESCAMPS B. (2014)** - Evaluation de l'impact des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la morphologie de la côte aquitaine. Rapport final. BRGM/RP-63797-FR, 68 p., 138 fig., 8 tab., 2 ann.

**CARSON M., KOHL A., STAMMER D., SLANGEN A.B.A., KATSMAN C.A., VAN DE WAL R.S.W., CHURCH J., WHITE N. (2016)** - Coastal sea level changes, observed and projected during the 20th and 21st century. *Clim. Chang.*, 134, pp 269–281.

**CAZENAVE A., LE COZANNET G. (2014)** - Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2, pp 15-34.

**CHAUMILLON E., BIGOT A. (2016)** - Etude des évolutions morphologiques interannuelles et séculaires de 37 plages de Charente - Maritime (année 2016). 27 p., 36 ann.

**CHURCH J.A., CLARK P.U., CAZENAVE A., GREGORY J.M., JEVREJEVA S., LEVERMANN A., MERRIFIELD M.A., MILNE G.A., NEREM R.S., NUNN P.D., PAYNE A.J., PFEFFER W.T., CHAUMILLON E., BERTIN X., POIRIER Clément et SAUZEAU T. (2010)** - Rivages inconstants : interactions homme-environnement du havre de Brouage à la baie de Marennes-Oléron (Apports des archives sédimentaires et historiques).

**Communauté d'Agglomération Royan Atlantique (2014)** - Observatoire de la côte royannaise : Etude du trait de côte Hiver 2013/2014. 49 p.

**COWELL P.J., THOM B.G. (1994)** - Morphodynamics of coastal evolution. In : R. W. G. Carter & C. D. Woodroffe (Eds), Coastal evolution, late quaternary shoreline morphodynamics. Cambridge : Cambridge University Press.

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

**DIENG H.B., CAZENAVE A., MEYSSIGNAC B., ABLAIN M. (2017)** - New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach. *Geophysical Research Letters*, vol. 44, Issue 8, pp 3744-3751. DOI: 10.1002/2017GL073308

**DUBOIS D. (2007)** - Uncertainty theories: a unified view. *IEEE Cybernetic Systems Conf. (Dublin, Ireland)*, Invited Paper, pp 4–9.

**FÜRST J.J., DURAND G., GILLET-CHAULET F., TAVARD L., RANKL M., BRAUN M., GAGLIARDINI O. (2016)** - The safety band of Antarctic ice shelves. *Nature Climate Change*, 6, pp 479–482. doi:10.1038/nclimate2912

**GARNIER C., MILLESCAMPS B. (2014-a)** - Agglomération Côte Basque Adour : Évaluation de l'aléa érosion côtière en 2023 et 2043 dans le cadre de la stratégie locale de gestion de la bande côtière. Rapport final BRGM/RP-63780-FR, 78 p., 78 fig., 5 tab., 4 ann.

**GARNIER C., MILLESCAMPS B. (2014-b)** – Agglomération Sud Pays Basque : Evaluation de l'aléa érosion côtière en 2023 et 2043 dans le cadre de la stratégie locale de gestion de la bande côtière. Rapport final BRGM/RP-63588-FR, 116 p., 63 fig., 2 tableaux, 3 ann.

**GAUDEFROY J., CHAUMILLON E. (2017)** - Etude des évolutions morphologiques décennales et séculaires de 37 plages de Charente - Maritime. Mémoire de stage, 29 p., 1 ann.

**GUILCHER A. (1979)** - Marshes and estuaries in different latitudes. *Interdisciplinary Sci. Rev.*, pp . 158-168.

**IDIER D., PARIS F., LE COZANNET G., BOULAHYA F., DUMAS F. (2017)** - Sea-level rise impacts on the tides of the European Shelf. *Cont. Shelf Res.*, 137, pp 56–71.

**JACKSON L.P., JEVREJEVA S. (2016)** - A probabilistic approach to 21st century regional sea-level projections using RCP and high-end scenarios. *Glob. Planet. Change*, 146, pp 179–89.

**KOPP R. E., HORTON R. M., LITTLE C. M., MITROVICA J. X., OPPENHEIMER M., RASMUSSEN D. J., TEBALDI C. (2014)** - Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's Future*, 2, pp 383–406.

**LARSON M., ERIKSON L., HANSON H. (2004)** - An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. *Coastal Engineering*, vol. 50, issues 8-9, pp 675-696.

**LE COZANNET G., MANCEAU J.-C., ROHMER J. (2017a)** - Bounding probabilistic sea-level projections within the framework of the possibility theory. *Environmental Research Letters*, IOP Publishing, 12 (1), pp 014-012.

**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. (2017b)** - Sea level change and coastal climate services: the way forward. *Journal of Marine Science and Engineering*, 33 p.

**LE COZANNET G., BULTEAU T., BAILLS A. et GARCIN M. (2017c)** - Conséquences du changement climatique sur les risques côtiers en Nouvelle-Aquitaine : état des connaissances. Rapport final BRGM/RP-66465-FR, 74 p., 27 ill., 3 tab.

**LE COZANNET G., BULTEAU T. (2017)** - Uncertainties of shoreline change projections along the sandy coast of Aquitaine (South-Western France). *International WCRP/IOC Conference 2017, Regional Sea Level Changes and Coastal Impacts*, July 10-14 2017, New York City.

**MALLET C., MICHOT A. avec la collaboration de DE LA TORRE Y., LAFON V., ROBIN M. et PREVOTEAUX B. (2012)** - Synthèse de référence des techniques de suivi du trait de côte - Rapport BRGM/RP-60616-FR, 226 p., 101 fig., 7 ann.

**MARZEION B., JAROSCH A.H., HOFER M. (2012)** - Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers. *The Cryosphere*, 6, pp 1295-1322. doi:10.5194/tc-6-1295-2012

**MELET A., MEYSSIGNAC B., ALMAR R., LE COZANNET G. (soumis)** - Underestimated wave contribution to sea level rise and changes at the coast.

**MEYSSIGNAC B., BECKER M., LLOVEL W., CAZENAVE A. (2012)** - An assessment of two-dimensional past sea level reconstructions over 1950–2009 based on tide-gauge data and different input sea level grids. *Surv. Geophys.*, 33, pp 945–972.

**Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, et de l'Energie (2014)** – Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux, 169 p.

**MUGICA J., PARIS F., NICOLAE LERMA A., PEDREROS R., AYACHE B., GARCIN M., BULTEAU T., HOAREAU A. (2016)** – Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon – Approche dynamique avec prise en compte des ouvrages de protection côtière. Rapport final. BRGM/RP-64807-FR, 122 p., 117 fig., 10 tab., 8 ann., 1 CD.

**NEDELLEC JL, ZORNETTE N., MATHON C., collaboration AUBIE S. et IMBAULT MH. (2005)** - Observatoire de la Côte Aquitaine - Evaluation et cartographie de l'aléa mouvements de terrain sur la Côte Basque. BRGM/RP-52783-FR rapport final, 9 illustrations, 2 ann., 41 p.

**PASKOFF R. (2006)** - Les littoraux. Impacts des aménagements sur leur évolution. Edition Armand Collin. Troisième édition revue et corrigée. 260 p.

**PICKERING M.D., HORSBURGH K.J., BLUNDELL J.R., HIRSCHI J.M., NICHOLLS R.J., VERLAAN M., WELLS N.C. (2017)** - The impact of future sea-level rise on the global tides. *Cont. Shelf Res.*, 142, pp 50–68.

**PLUS M., DANIELE M., STANISIERE J.-Y., DUMAS F. (2006)** - Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'une lagune mésotidale, le Bassin d'Arcachon. Rapport IFREMER RST/LER/AR/06.007

**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.

**RAUCOULES D., LE COZANNET G., WÖPPELMANN G., DE MICHELE M., GRAVELLE M., DAAG A., MARCOS M. (2013)** - High nonlinear urban ground motion in Manila (Philippines) from 1993 to 2010 observed by DInSAR: implications for sea-level measurement. *Remote Sens. Environ.*, 139, pp 386–97.

**RITZ C., EDWARDS T.L., DURAND G., PAYNE A.J., PEYAUD V., HINDMARSH R.C. (2015)** - Potential sea-level rise from Antarctic ice-sheet instability constrained by observations. *Nature*, 528, 115–8.

**ROSATI J.D., DEAN R.G., WALTON T.L. (2013)** - The modified Bruun Rule extended for landward transport. *Marine Geology*, 340, pp 71-81.

**SANTAMARIA-GOMEZ A., GRAVELLE M., COLLILIEUX X., GUICHARD M., MIGUEZ B.M., TIPHANEAU P., WÖPPELMANN G. (2012)** - Mitigating the effects of vertical land motion in tide gauge records using a state-of-the-art GPS velocity field. *Glob. Planet. Change*, 98–99, pp 6–17.

**SHOM (2016)** - Références altimétriques Maritimes, Edition 2016.

**SOGREAH (2010)** - Elaboration d'un document « Eléments de mémoire et retour d'expérience de l'évènement XYNTHIA, Atlas cartographiques. 86 planches.

**STAMMER D., UNNIKRISHNAN A.S. (2013)** - IPCC AR5 WG1 Ch 13: Sea Level Change. *In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F.; Qin, D.; Plattner, G.-K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Nauels, A.; Xia, Y.; Bex, V. ;P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013, pp. 1137–1216, doi:10.1017/ CBO9781107415324.026.*

**DE VRIES H., VAN DE WAL R.S. (2015)** - How to interpret expert judgment assessments of 21st century sea-level rise. *Clim. Change*, 130, pp 87–100.

**WOODWORTH P.L. (2010)** - A survey of recent changes in the main components of the ocean tide. *Cont. Shelf Res.*, 30, pp 1680–1691.

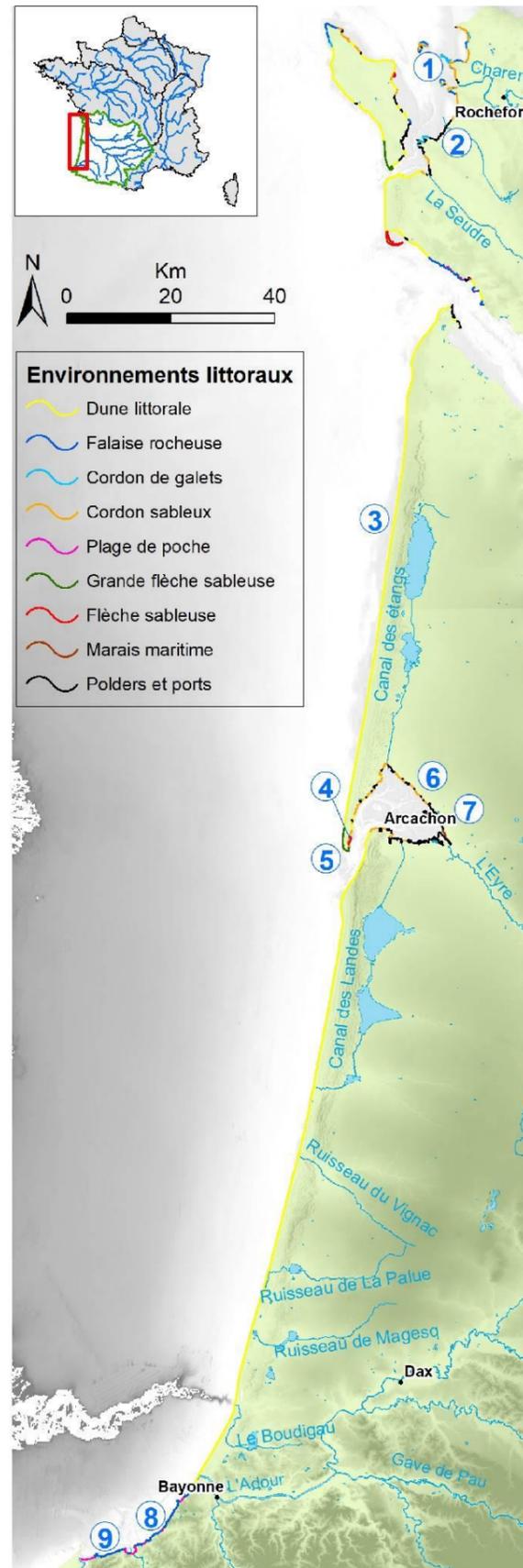
**WÖPPELMANN G., MARCOS M. (2016)** - Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Rev. Geophys*, 54, pp 64–92.

## **Annexe 1**

# **Cartographie et illustration des environnements littoraux distingués sur le littoral Adour-Garonne**



## Environnements littoraux du bassin Adour-Garonne



\* Une grande flèche sableuse se distingue d'une petite flèche sableuse par sa taille (quelques km) et sa dynamique d'évolution plus importante (plusieurs dizaines à centaines de mètres sur plusieurs dizaines d'années).

\*\* Parmi les cordons littoraux ont été différenciés les dunes littorales, situées en milieu océanique ouvert, des cordons sableux mis en place dans des secteurs abrités (pertuis, Bassin d'Arcachon), du fait d'échelles et de dynamique d'évolution distinctes.

Crédits photographiques :  
 1 et 2 : Orthophotographie 2014 ©IGN  
 3 à 8 : ULM Sud Basain, 2017 ©OCA  
 Document produit dans le cadre du rapport BRGM/RP-67395-FR







Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009

45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale Nouvelle-Aquitaine**

Parc Technologique Europarc  
24, Avenue Léonard de Vinci

33600 - Pessac - France

Tél. : 05 57 26 52 70