

Conséquences du changement climatique sur les risques côtiers en Nouvelle-Aquitaine : état des connaissances

Rapport final

BRGM/RP-66465-FR
Septembre 2016

Conséquences du changement climatique sur les risques côtiers en Nouvelle-Aquitaine : état des connaissances

Rapport final

BRGM/RP-66465-FR
Septembre 2016

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM AP15AQI041

Gonéri Le Cozannet
Avec la collaboration de
Thomas Bulteau, Audrey Bails et Manuel Garcin

Vérificateur :

Nom : Cyril Mallet
Fonction : Ingénieur risques côtiers
Date : 07/08/2017



Approbateur :

Nom : Nicolas Pédron
Fonction : Directeur du BRGM
Nouvelle-Aquitaine
Date : 27/09/2017



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

Mots-clés : changement climatique, élévation du niveau de la mer, Nouvelle-Aquitaine, érosion, submersion, côte sableuse, côte rocheuse, estuaire, zones limono-vaseuses

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

LE COZANNET G., BULTEAU T., BAILLS A. et GARCIN M. (2016) - 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 tabl.

Synthèse

Ce rapport est réalisé dans le cadre du programme complémentaire « Adaptation au Changement Climatique » de l'Observatoire de la Côte Aquitaine, financé par la Région Nouvelle-Aquitaine, la DREAL Nouvelle-Aquitaine, l'Europe (fonds FEDER) et le BRGM. Il est destiné au comité de suivi de l'étude : membres du Comité Technique de l'OCA (BRGM, ONF, Région Nouvelle-Aquitaine, DREAL, Départements de la Gironde, des Landes et des Pyrénées-Atlantiques, Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon), GIP Littoral Aquitain, GIP ATGeRi (Aménagement du Territoire et Gestion des Risques) et DDTMs (Directions Départementales des Territoires et de la Mer de la Gironde, des Landes, des Pyrénées-Atlantiques et de la Charente-Maritime).

L'objectif de ce rapport est de dresser un **état des connaissances concernant l'impact potentiel du changement climatique sur les aléas littoraux** (érosion côtière, recul du trait de côte et submersion marine) **en Nouvelle-Aquitaine, avec un focus particulier sur l'ex-région Aquitaine**. Le projet a en effet été lancé avant la fusion des régions et le programme était initialement circonscrit à l'ex-région Aquitaine. Un effort a néanmoins été porté pour étendre autant que possible l'étude au territoire de Charente-Maritime. Le degré d'exhaustivité des informations contenues dans ce rapport n'est cependant pas identique entre le territoire aquitain et la Charente-Maritime.

Ce rapport constitue donc un **point de départ pour le programme « Adaptation au Changement Climatique » de l'Observatoire de la Côte Aquitaine**, qui prévoit ultérieurement **d'analyser des mesures d'adaptation au regard des effets anticipés du changement climatique**.

Pour l'essentiel, ce rapport se base sur une revue des connaissances à sa date de rédaction (2016). Cependant, il comprend également une analyse de données existantes (ex : séries marégraphiques dans le Chapitre 2), ainsi qu'une première analyse de l'ampleur et de la rapidité des changements à venir, pour quatre systèmes côtiers idéalisés de la région Nouvelle-Aquitaine (Chapitre 4).

Après l'introduction du Chapitre 1, ce rapport examine successivement les questions de l'élévation du niveau de la mer (Chapitre 2), de l'évolution des autres variables hydro-météorologiques (vagues, niveaux d'eau, débit des fleuves ; Chapitre 3), et des conséquences pour les littoraux (Chapitre 4).

Les éléments rassemblés dans ce rapport mettent en évidence que le changement climatique, à travers l'élévation du niveau de la mer, aura des effets majeurs pour la submersion marine et l'érosion côtière pour les côtes sableuses, limono-vaseuses et les estuaires de la région Nouvelle-Aquitaine. Dans tous les cas, il sera nécessaire de s'adapter à des hauteurs d'eau plus élevées lors des tempêtes. En revanche, une aggravation généralisée de l'érosion et la submersion permanente de zones basses peut encore être évitée si le niveau de la mer ne s'élève pas trop vite.

Les conclusions de ce rapport sont présentées ci-dessous.

Le Chapitre 2 examine la **question de l'élévation du niveau de la mer**. Il procède à une revue de la littérature scientifique et à une analyse des données existantes, afin d'apprécier non seulement la composante climatique de l'élévation du niveau marin, mais aussi les effets des mouvements verticaux du sol en zones côtières. Ce chapitre montre que l'élévation du niveau

de la mer en région Nouvelle-Aquitaine est proche de la moyenne globale (3,2 mm/an depuis 1993). Il rappelle que des mouvements verticaux du sol sont suspectés dans certaines zones de la région Nouvelle-Aquitaine (Bassin d'Arcachon), sans qu'il soit aujourd'hui possible de les quantifier précisément. Enfin, il montre que l'élévation du niveau marin se poursuivra au cours des prochaines décennies et siècles. Dans le cas d'une réduction importante des émissions de gaz à effets de serre, conduisant à maintenir le réchauffement climatique en deçà de 2°C par rapport à la période pré-industrielle, le GIEC anticipe qu'il y a deux chances sur trois que le niveau de la mer soit inférieur à 61 cm en 2100, par rapport à la période 1986-2005 (versus 98 cm avec une poursuite des émissions de gaz à effet de serre). Il estime également qu'il y a une chance sur trois que ces seuils soient dépassés dès 2100, si la fonte des calottes polaires antarctique et groenlandaise s'accélère.

Le Chapitre 3 examine les **conséquences du changement climatique sur les autres variables hydrométéorologiques contrôlant les aléas côtiers de submersion marine et d'érosion côtière** : caractéristiques des vagues, régimes de tempêtes et de surcotes, débits des rivières. Pour ce qui concerne la région Nouvelle-Aquitaine, un phénomène majeur est une réduction des débits des rivières, qui pourrait atteindre 20 à 50% en été dès le milieu du XXI^{ème} siècle. Les autres changements demeurent aujourd'hui masqués par la variabilité du climat et les incertitudes des modèles. En revanche, il est certain que les hauteurs d'eau lors de tempête deviendront plus élevées, par simple superposition de l'élévation séculaire du niveau de la mer avec un régime de tempêtes qui serait peu modifié par le changement climatique.

Le Chapitre 4 examine **les conséquences du changement climatique pour quatre sites idéalisés de la région Nouvelle-Aquitaine, notamment en termes de submersion marine, érosion côtière et recul du trait de côte** : grands estuaires (cas de la Gironde), zones limono-vaseuses (telles que le Bassin d'Arcachon), littoraux sableux (tels que la côte sableuse aquitaine) et côtes à falaises (telles que la côte rocheuse basque). Les résultats présentés s'appliquent à de nombreux systèmes côtiers, mais doivent être interprétés en considérant le **contexte local**. Ainsi, une extension de l'analyse des impacts du changement climatique à l'ensemble de la côte de la région Nouvelle-Aquitaine nécessiterait la définition de systèmes côtiers idéalisés représentatifs du littoral charentais¹. Deux périodes de temps peuvent être distinguées :

- actuellement (i.e., pour quelques décennies encore), les aléas côtiers demeureront marqués principalement par la variabilité du climat, les actions humaines et les déficits sédimentaires ;
- ultérieurement (i.e., probablement entre le milieu et la fin du XXI^{ème} siècle), l'élévation du niveau de la mer deviendra le facteur majeur d'aggravation des aléas côtiers, notamment de submersion marine.

Si l'on se réfère aux scénarios d'élévation du niveau de la mer du GIEC, la période critique de transition semble se situer au milieu du XXI^{ème} siècle, pour ce qui concerne les submersions marines. Dans la section 4.1, nous rappelons que, par ailleurs, les impacts du changement climatique pour les écosystèmes côtiers sont déjà avérés dans de nombreuses régions du monde.

En conclusion, si le réchauffement climatique excède le seuil de 2°C par rapport à la période pré-industrielle, l'adaptation aux effets du changement climatique en zones côtières deviendra extrêmement problématique dès le milieu ou la fin du XXI^{ème} siècle. En effet, seuls les scénarios compatibles avec cet objectif des 2°C laissent des chances significatives de limiter la vitesse

¹ Action non prévue lors de la contractualisation.

d'élévation du niveau marin en-deçà de 1 m par siècle. Aussi, la mesure la plus urgente consiste à réduire les concentrations de gaz à effets de serre dans l'atmosphère, via des politiques régionales (transport et énergie notamment) compatibles avec l'accord de Paris sur le climat (COP-21). Au contraire, ce rapport met en évidence que si l'élévation du niveau de la mer suit les prévisions du GIEC, il ne sera nécessaire de mettre en œuvre des mesures d'adaptation spécifiques que dans quelques décennies (probablement entre le milieu et la fin du XXI^{ème} siècle). Les mesures d'adaptation existantes ou envisageables font l'objet d'un autre rapport de ce programme complémentaire de l'Observatoire de la Côte Aquitaine. Elles recouvrent des actions telles que le rehaussement de niveaux de protection (ex. digues) ou des reculs stratégiques. Le présent rapport met en évidence que, pour quelques dizaines d'années encore et si l'élévation du niveau de la mer suit les projections du GIEC, ces mesures d'adaptation ne devront faire face qu'à des phénomènes côtiers représentatifs du climat actuel.

La réglementation actuelle donne un cadre pour examiner simultanément ces questions d'adaptation et d'atténuation à l'échelle régionale (ex : anciens schémas régionaux climat-air-énergie). Dans ces domaines, les atouts de la région Nouvelle-Aquitaine sont nombreux. Ainsi, la dynamique régionale insufflée par la Région, l'État, le GIP Littoral Aquitain, la communauté scientifique (Acclimaterra) et leurs partenaires est exemplaire pour ce qui concerne les questions d'adaptation. Cependant, des opportunités existent également pour ce qui concerne l'atténuation : politique de transports conduisant à réduire les émissions, mesures augmentant l'efficacité énergétique, recours aux énergies renouvelables telles que la géothermie, stockage géologique du CO₂, etc. Pour nos économies, confrontées à la nécessité d'une transition énergétique rapide, il s'agit là d'un enjeu de compétitivité mondiale, dont les acteurs majeurs ne sont pas encore définitivement positionnés.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. CADRE DE L'ETUDE.....	11
1.2. OBJECTIF ET CONTENU DU RAPPORT	11
1.3. PERIMETRE TERRITORIAL CONSIDERE DANS CE RAPPORT	12
2. Les évolutions attendues de l'élévation du niveau de la mer	13
2.1. EVOLUTIONS ATTENDUES AU NIVEAU GLOBAL	13
2.1.1. Ce que l'on observe actuellement	13
2.1.2. Projections globales et régionales de l'élévation du niveau de la mer	16
2.1.3. Incertitudes et sujets de recherche potentiels	19
2.2. EVOLUTIONS ATTENDUES EN NOUVELLE-AQUITAINE.....	20
2.2.1 Ce que l'on observe actuellement	20
2.2.2 Incertitudes et améliorations potentielles	25
2.3. CONCLUSION : QUELLES VALEURS D'ELEVATION DU NIVEAU MARIN UTILISER POUR LA REGION NOUVELLE-AQUITAINE ?	25
3. Evolution des conditions hydrométéorologiques moyennes et extrêmes.....	27
3.1. NIVEAUX MARINS EXTREMES	27
3.1.1. Ce que l'on observe actuellement	27
3.1.2. Évolutions potentielles	27
3.1.3. Dans la région Nouvelle-Aquitaine	28
3.1.4 Incertitudes et sujets de recherche potentiels	32
3.2. INFLUENCE DE CHANGEMENTS DE REGIMES DE TEMPETES, DE VENTS VIOLENTS, DE VAGUES, DE SURCOTES ET DE MAREES.....	32
3.3. DEBITS DES FLEUVES	36
3.4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	37
4. Impacts du changement climatique sur les zones côtières	39
4.1. AU NIVEAU GLOBAL	39
4.2. CONSEQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR QUATRE MILIEUX COTIERS IDEALISES.....	44
4.2.1. Estuaire de la Gironde	44
4.2.2. Secteurs limono-vaseux.....	48
4.2.3. Côte sableuse.....	51

4.2.4. Côte rocheuse	56
4.3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	58
5. Conclusion	59
6. Remerciements	63
7. Bibliographie.....	65

Liste des figures

Illustration 1 - Mesure de l'élévation de la mer au cours du XX ^{ème} siècle et depuis 1992, par analyse des données marégraphiques (figure de gauche) et altimétriques (figure de droite ; tiré de Cazenave et al, 2015).	13
Illustration 2 - Comparaison des vitesses d'élévation du niveau de la mer à différentes échelles de temps (d'après GIEC, WG1, Ch5, 2013).....	14
Illustration 3 - Variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer mesurée par les satellites altimétriques (Source : AVISO - CNES/LEGOS/CLS).	15
Illustration 4 - Phénomènes glaciaires impliqués dans l'ajustement isostatique global (GIA ; source : GIEC, WG1, Ch13, 2013).....	16
Illustration 5 - Projections de l'élévation du niveau de la mer global au XXI ^{ème} siècle : en haut à gauche : scénarios d'élévation du niveau de la mer issus du 5 ^{ème} rapport du GIEC (2013) ; en haut à droite : scénarios probabilistes d'élévation du niveau de la mer prenant en compte la possibilité d'une fonte rapide des calottes polaires ; en bas : densité de probabilité représentant l'élévation du niveau de la mer en 2100 pour le scénario RCP 8.5 (sources : GIEC, 2013 ; Le Cozannet et al., 2015a).....	17
Illustration 6 - Élévation du niveau de la mer en 2081-2100 comparé à 1986-2005. Ces simulations prennent en compte des changements de température, salinité et courants de 21 modèles du GIEC, sous deux scénarios de changement climatique (réduction rapide des émissions de gaz à effets de serre : RCP 2.6 ; poursuite des émissions : RCP 8.5). Elles modélisent également les effets des pertes de masses des glaciers et des calottes polaires, ainsi que les changements de pressions atmosphériques et le GIA. (Sources : GIEC, 2013 ; Slangen et al., 2014).....	18
Illustration 7 - Elévation du niveau de la mer mesurée par les satellites altimétriques, pendant la période 1993-2014, en mm/an, sur la partie ouest du plateau continental européen (données Aviso/CNES/LEGOS ; graphique réalisé sous R).....	20
Illustration 8 - Elévation du niveau de la mer à Arcachon et Port Bloc.	21
Illustration 9 - Elévation du niveau de la mer à La Rochelle et à Saint-Jean de Luz.	22
Illustration 10 -Variations du niveau de la mer induites par le GIA au niveau des marégraphes de la base de données PSMSL ; données fournies par S. Jevrejeva et G. Spada, Jevrejeva et al., 2014 ; Modèles SELEN et ICE-5g - Peltier, 2004 ; graphique réalisé sous R.	23
Illustration 11 - Extrait du rapport 5 du WG2 du GIEC, 2014, d'après la méthode de Hunter et al., (2013) : surélévation des défenses côtières requise pour maintenir une fréquence des événements de submersion identique à l'actuel en 2081-2100 pour 180 ports. Le scénario de niveau de la mer utilisé est celui du RCP 4.5.	28

Illustration 12 - Calcul des périodes de retour des hauteurs d'eau dans le port de La Rochelle (extrait de Bulteau et al., 2015)	29
Illustration 13 - Evolution anticipée des probabilités annuelles de dépassement du seuil critique, dans un cas idéalisé, correspondant à la ville de Palavas-Les-Flots (Occitanie), en prenant en compte toutes les incertitudes pesant sur l'élévation du niveau de la mer future et les processus côtiers locaux (extrait de Le Cozannet et al. (2015a)).	30
Illustration 14 - Indicateur statistique (indices de Sobol' totaux) permettant d'évaluer l'erreur commise si l'on néglige un paramètre donné (extrait de Le Cozannet et al. (2015a)).	31
Illustration 15 - Influence de la variabilité climatique pour les vagues en Aquitaine extrait de Charles et al. (2012a))	34
Illustration 16 - Projections des hauteurs significatives des vagues moyennes, prenant en compte plusieurs modèles climatiques (extrait de Hemer et al. (2013)).	34
Illustration 17 - Cartes présentant les hauteurs, périodes et directions actuelles des vagues dans le golfe de Gascogne, ainsi que les changements anticipés pour un scénario de changement climatique A2 (scénarios du rapport de 2007 du GIEC) (extrait de Charles et al. (2012b)).	35
Illustration 18 - Moyenne des changements de débits moyens (en pourcents) pour 2035-2065 relativement à 1960-1990, pour chaque saison et pour chaque scénario RCP de changement climatique (extrait de Dayon (2015)).	37
Illustration 19 - Risques induits par l'acidification et le réchauffement des eaux de surface vers 2100, pour des organismes vivants et des services écosystémiques critiques (extrait de Gattuso et al. (2015)).	43
Illustration 20 - Evaluation préliminaire des risques physiques clés pour l'estuaire de la Gironde. Le tableau est adapté des évaluations du GIEC. Il est basé sur la revue de la littérature scientifique et technique présentée ci-avant	47
Illustration 21 - Dispositif de mesure de la subsidence et de la sédimentation (ici dans le cas d'une mangrove) recommandé dans le cadre d'une initiative internationale visant à mieux comprendre les effets de l'élévation du niveau de la mer sur la sédimentation (extrait de Webb et al. (2013) ; figure réalisée par James C. Lynch, US National Park Service).	49
Illustration 22 - Evaluation préliminaire des risques physiques clés pour les zones limono-vaseuses. Le tableau est adapté des évaluations du GIEC. Il est basé sur la revue de la littérature scientifique et technique présenté ci-avant.	50
Illustration 23 - Impacts de variations des régimes de vagues sur le transport longitudinal (source : Charles et al., 2012c).	51
Illustration 24 - Projections de recul du trait de côte pour des plages sableuses de haute énergie et sans ouvrage, pour différents scénarios de changement climatique (extrait de Le Cozannet et al. (2016a)).	53
Illustration 25 - Evaluation préliminaire des risques physiques clés pour la côte sableuse. Le tableau est adapté des évaluations du GIEC. Il est basé sur la revue de la littérature scientifique et technique présenté ci-avant. La légende est identique aux Illustrations précédentes.	55
Illustration 26 - Marnes maastrichtiennes de Bidart. Pour ce qui concerne la côte à falaise du Pays Basque, le type géomorphologique le plus vulnérable à l'élévation du niveau de la mer est le type 2 dans la classification de Genna et al. (2005).	56
Illustration 27 - Evaluation préliminaire des risques physiques clés pour la côte rocheuse. Le tableau est adapté des évaluations du GIEC. Il est basé sur la revue de la littérature scientifique et technique présenté ci-avant.	57

Liste des tableaux

Tableau 1 - Contribution des principaux processus causant l'élévation du niveau marin entre 1993 et 2010 et comparaison aux observations (Source : GIEC, WG1, Ch13, 2013).	15
Tableau 2 - Scénarios d'élévation du niveau de la mer globaux, excluant tout mouvement vertical du sol ou phénomène océanique régional (et donc n'incluant pas les +/- 20 cm supplémentaires d'incertitude locale vers 2100, indiqués dans l'illustration 6). Ces scénarios sont recommandés pour la plupart des régions peu affectées par les effets du GIA (cas de la plupart des côtes françaises métropolitaines et d'outre-mer). (Sources : GIEC, 2013 ; Golledge et al., 2015 ; Winkelmann et al. 2015 ; Ritz et al., 2015 ; Hansen et al., 2015 ; Jevrejeva et al., 2014 ; Horton et al., 2014).	19
Tableau 3 : Conséquences actuelles et futures du changement climatique pour les zones côtières : facteurs de forçages physiques et chimiques, projections et tendances et progrès effectués depuis l'AR4 (adapté et traduit du 5 ^{ème} rapport du GIEC : table 5-1 du rapport 5 du WG2, 2014).	41

1. Introduction

1.1. CADRE DE L'ETUDE

Ce rapport est rédigé dans le cadre du programme « Adaptation au changement climatique », complémentaire aux activités de l'Observatoire de la Côte Aquitaine (OCA). Ce programme est financé par la Région Nouvelle-Aquitaine, la DREAL Nouvelle-Aquitaine, l'Europe (fonds FEDER) et le BRGM. Le présent rapport s'adresse au comité de suivi de l'étude : membres du Comité Technique de l'OCA (BRGM, ONF, Région Nouvelle-Aquitaine, DREAL, Départements de la Gironde, des Landes et des Pyrénées-Atlantiques, Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon), GIP Littoral Aquitain, GIP ATGeRi (Aménagement du Territoire et Gestion des Risques) et DDTMs (Directions Départementales des Territoires et de la Mer).

1.2. OBJECTIF ET CONTENU DU RAPPORT

De par sa rapidité, le changement climatique actuel est sans équivalent dans les archives géologiques actuellement disponibles. Il est causé par une modification de la composition de l'atmosphère (augmentation des concentrations de gaz à effet de serre), essentiellement due aux activités humaines (recours aux énergies fossiles, pratiques agricoles). Puisque ses effets sont déjà perceptibles aujourd'hui (exemple : canicules, élévation du niveau de la mer), une adaptation est incontournable, quels que soient les efforts pour limiter le réchauffement (exemple : réduction des émissions de gaz à effets de serre).

L'objectif de ce rapport est de **procéder à un inventaire des conséquences du changement climatique pour les zones côtières en région Nouvelle-Aquitaine, avec un focus particulier sur l'ex-région Aquitaine**. Il s'agit ici de proposer **une revue des connaissances, sur lesquelles le programme complémentaire de l'OCA s'appuiera ultérieurement afin d'évaluer les mesures d'adaptation**.

Le changement climatique a pour conséquences une augmentation des températures moyennes et extrêmes, une modification des régimes de précipitations et une augmentation de l'élévation du niveau de la mer. Pour les zones côtières, d'autres effets (ex. modification des régimes de vent et des vagues) peuvent avoir des conséquences. Cependant, l'élévation du niveau de la mer revêt un caractère particulier pour qui s'intéresse aux phénomènes côtiers. En effet, avec la fonte des calottes Antarctique et du Groenland, des scénarios d'élévation du niveau de la mer de 1 à 3 m par siècle sont désormais reconnus comme possibles. Aucune autre manifestation du changement climatique ne peut remodeler les côtes de la région Nouvelle-Aquitaine (et plus de 90% des côtes mondiales) de manière aussi importante.

Ce rapport part du constat que l'élévation du niveau de la mer est la manifestation du changement climatique qui induira les impacts les plus significatifs dans les zones côtières (Chapitre 2). Néanmoins, il reconnaît que compte tenu de la très forte inertie de ce phénomène d'élévation du niveau marin (le niveau de la mer met plusieurs centaines d'années à s'ajuster à de nouvelles conditions climatiques), d'autres conséquences du changement climatique pour les paramètres hydrométéorologiques côtiers, tels que des effets sur les niveaux marins extrêmes, les vagues, les surcotes marines et les débits des rivières, sont susceptibles d'induire des impacts visibles sur le littoral (Chapitre 3). Enfin, le Chapitre 4 procède à une revue et une analyse des connaissances actuelles sur la question des conséquences pour les aléas côtiers (submersion marine et érosion côtière), en l'absence d'adaptation.

Ce rapport est une synthèse qui n'a pas vocation à être exhaustive. Cette synthèse a été effectuée au printemps 2016 conformément au calendrier du projet. Elle se base essentiellement sur des travaux de recherche publiés dans des revues à comité de lecture (cf. liste des références). Dans ces revues, le processus de validation consiste à faire évaluer l'article par deux ou trois relecteurs, spécialistes du sujet, avant publication ou rejet de la publication. Certains rapports n'ont pas suivi ce processus de validation : ils sont facilement identifiables dans la liste des références (absence de nom de journal scientifique). Ceux qui sont cités dans ce rapport ont été rédigés par des experts des effets du changement climatique sur les zones côtières, et sont devenus des références dans le domaine (ex. Hulme et al., 2002).

Ce rapport ne se substitue pas à d'autres revues plus complètes auxquelles le lecteur pourra se référer : rapports du GIEC (IPCC WG1, chapitres 5 et 15 notamment), rapport régional aquitain du groupement scientifique d'étude du changement climatique, élaboré sous la coordination d'H. Le Treut (Le Treut et al., 2013), ou encore rapport national sur le niveau de la mer et ses impacts (Planton et al., 2015).

1.3. PERIMETRE TERRITORIAL CONSIDERE DANS CE RAPPORT

Le projet ayant été engagé en 2015 avant la réforme territoriale, le périmètre d'étude était initialement restreint à l'Aquitaine, c'est-à-dire de l'estuaire de la Gironde au nord jusqu'à l'embouchure de la Bidassoa au sud. Pour ce qui concerne les Chapitres 2 (élévation du niveau de la mer) et 3 (autres variables climatiques), ce rapport examine l'intégralité du nouveau périmètre régional. En revanche, le Chapitre 4 examine les impacts du changement climatique pour des systèmes côtiers idéalisés de l'ex-région Aquitaine : grands estuaires (cas de la Gironde), zones limono-vaseuses (telles que le Bassin d'Arcachon), littoraux sableux (tels que la côte sableuse aquitaine) et côtes à falaises (telles que la côte rocheuse basque). Si les différentes conclusions de cette analyse demeurent largement valables, il resterait à les placer dans le contexte de l'ex-région Poitou-Charentes en définissant et en analysant des systèmes côtiers idéalisés représentatifs du littoral charentais.

2. Les évolutions attendues de l'élévation du niveau de la mer

Dans ce chapitre, nous introduisons brièvement le phénomène d'élévation du niveau de la mer observé depuis la fin du XIX^{ème} siècle, ses causes et sa variabilité régionale. Par la suite, nous examinons plus particulièrement le cas de la côte aquitaine, en procédant à une analyse des données disponibles.

2.1. EVOLUTIONS ATTENDUES AU NIVEAU GLOBAL

2.1.1. Ce que l'on observe actuellement

Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, les données marégraphiques et des satellites altimétriques montrent que le niveau de la mer s'élève en s'accélégrant (Church et White, 2006 ; 2011 ; Illustration 1) : les vitesses d'élévation du niveau de la mer sont estimées à 1,7 mm/an au cours du XX^{ème} siècle, et 3,3 mm/an depuis 1992 (Cazenave et al., 2014)². Il s'agit d'une rupture majeure avec la situation de relative stabilité du niveau marin qui prévalait lors des 2000 dernières années (ex : Kemp et al., 2011 ; Grinsted et al., 2010, Kopp et al., 2016).

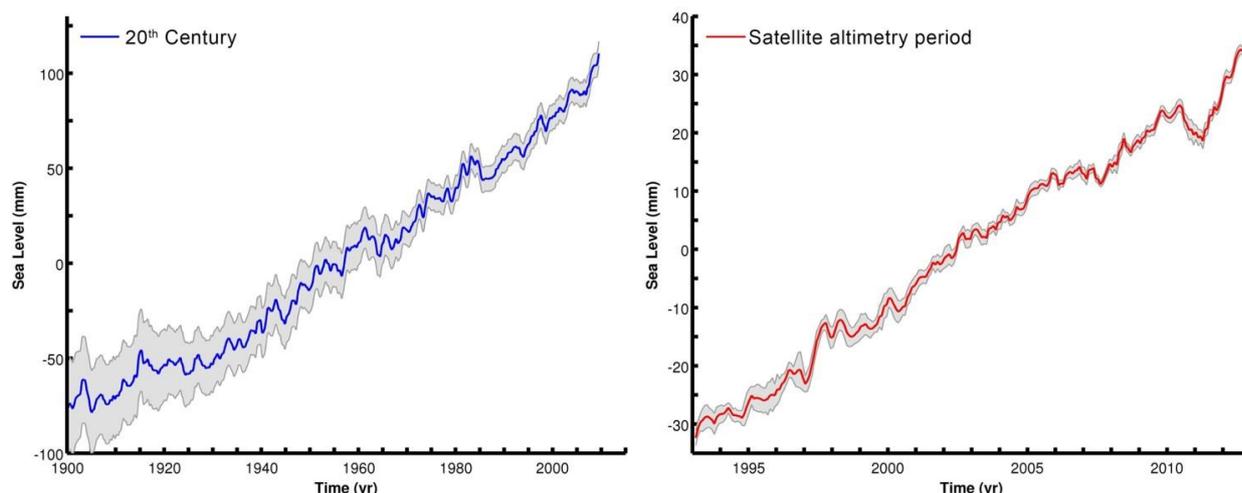


Illustration 1 - Mesure de l'élévation de la mer au cours du XX^{ème} siècle et depuis 1992, par analyse des données marégraphiques (figure de gauche) et altimétriques (figure de droite ; tiré de Cazenave et al, 2015).

L'illustration 2 compare les taux d'élévation du niveau de la mer observés actuellement à ceux des périodes géologiques les plus récentes. Si l'élévation du niveau marin actuel apparaît comme un phénomène nouveau par rapport aux deux derniers millénaires, les taux observés actuellement demeurent relativement modérés comparativement à ceux de la dernière transgression post-glaciaire (-21000 à -6000 ans), au cours de laquelle des taux allant de un à

² De récentes estimations ont été publiées en 2015 (Hay et al., 2015 ; Watson et al., 2015). Ces études suggèrent que l'élévation du niveau de la mer a été moins rapide au cours du XX^{ème} siècle. Elles concluent donc que l'accélération de l'élévation du niveau de la mer est plus marquée que ce que l'on pensait jusqu'à présent. En attendant que de nouvelles études viennent apporter de nouveaux éléments, les valeurs que nous indiquons dans le rapport sont celles retenues pour le 5^{ème} rapport du GIEC.

plusieurs centimètres par an ont été observés (ex : Bard et al., 1996). Ainsi, ce ne sont pas les taux observés actuellement qui préoccupent les gestionnaires des zones côtières, mais bien le retour à des taux comparables à ceux de la dernière transgression post-glaciaire (Nicholls et Lowe, 2004).

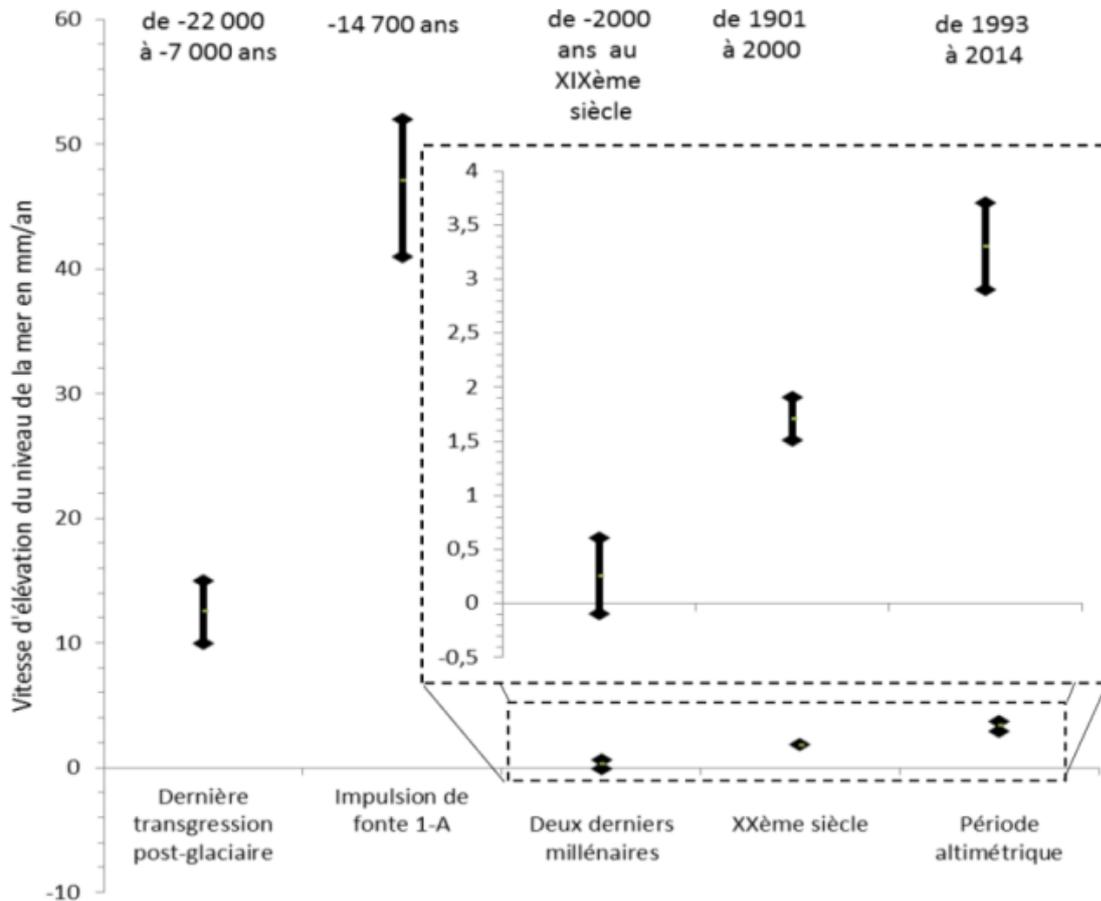


Illustration 2 - Comparaison des vitesses d'élévation du niveau de la mer à différentes échelles de temps (d'après GIEC, WG1, Ch5, 2013).

La cause principale de l'élévation du niveau de la mer observée actuellement est le réchauffement climatique lié aux émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique (GIEC, WG1, Ch. 13, 2013). En effet, ce phénomène de réchauffement climatique cause :

- un réchauffement de l'océan, impliquant sa dilatation et une élévation du niveau de la mer sans apport supplémentaire d'eau dans les océans ;
- la fonte des glaciers de montagne, polaires et des calottes, qui accroissent le volume d'eau des océans.

Pour la période 1993-2010, ces deux processus expliquent la plus grande partie de l'élévation du niveau de la mer observée (Tableau 1). On peut noter par exemple que la contribution des échanges entre l'océan et les eaux souterraines et de surface ne contribue que pour 0,4 mm/an environ, ce qui est l'ordre de grandeur des incertitudes de la mesure du niveau marin global par altimétrie (Ablain et al., 2015).

Processus	Expansion thermique (modélisée)	Fonte glaciers de montagne (modélisée)	Fonte calotte Groenland (observée)	Fonte calotte Antarctique (observée)	Echanges avec les eaux continentales et souterraines	Somme	Observations
Hausse du niveau de la mer (mm/an)	1,49	0,78	0,33	0,27	0,38	3,25	3,3 +/- 0,4

Tableau 1 - Contribution des principaux processus causant l'élévation du niveau marin entre 1993 et 2010 et comparaison aux observations (Source : GIEC, WG1, Ch13, 2013).

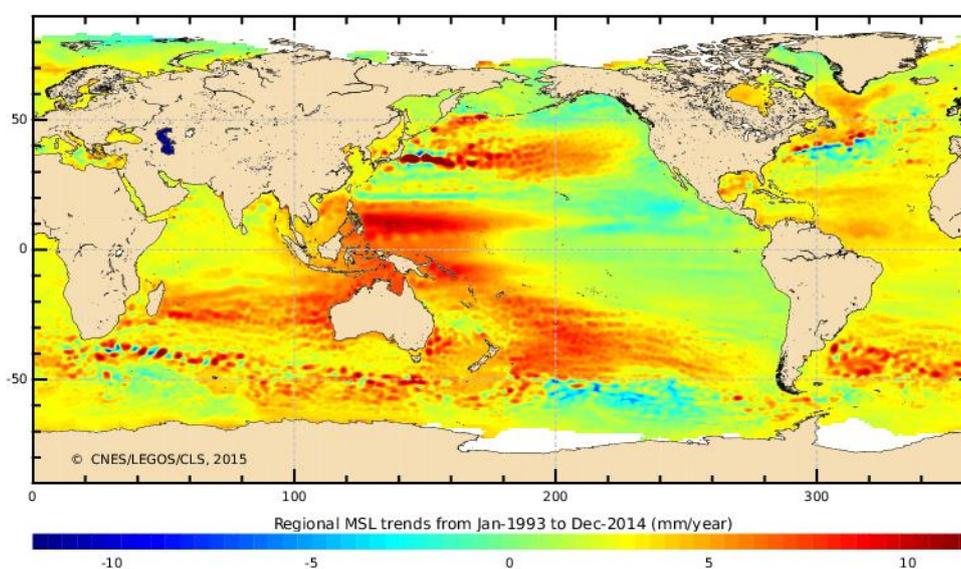


Illustration 3 - Variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer mesurée par les satellites altimétriques (Source : AVISO - CNES/LEGOS/CLS).

Loin d'être homogène à l'échelle du globe, l'élévation du niveau de la mer présente des disparités régionales (Meyssignac et Cazenave, 2012 ; Stammer et al., 2013. Illustration 3). Cette variabilité régionale est liée en premier lieu au réchauffement inhomogène des couches superficielles des océans. Cependant, d'autres processus jouent un rôle, tels que les variations de salinité de l'océan et les déformations du géoïde induites par les redistributions de masses passées et actuelles (fonte des glaciers et des calottes). En effet, si l'on s'intéresse à l'élévation du niveau de la mer relativement à la côte (i.e. telle qu'elle pourrait être mesurée à l'aide d'un marégraphe), les mouvements verticaux du sol doivent être pris en compte. Ces mouvements du sol correspondent à une multitude de processus s'exprimant à des échelles spatiales locales, régionales et globales. Les phénomènes globaux de déformations de la terre solide sont la conséquence des changements climatiques passés et actuels : il s'agit de la réponse de la croûte terrestre aux redistributions de masses des calottes entre les périodes glaciaires et interglaciaires (Illustration 4 ; Tamisiea, 2011). Ainsi, lors de la dernière déglaciation, la calotte fennoscandienne³ s'est retirée, ce qui a libéré les contraintes qui s'exerçaient sur la croûte terrestre. Le sol se rehausse (surrection) là où se trouvait précédemment la calotte. Au contraire, il peut s'affaisser au niveau de ses marges (Illustration 4). Ce phénomène est connu

³ Ensemble formé de la péninsule scandinave, de la Finlande et de la Laponie.

sous le nom d'ajustement isostatique global et il est noté GIA (pour *Global Isostatic Adjustment*) ci-après. Il est actuellement non seulement observé par des mesures géodésiques (ex : GPS), mais aussi modélisé. On peut noter que le réchauffement climatique actuel causera⁴ également des phénomènes similaires (Slangen et al., 2014 ; GIEC, WG1, Ch13 2013). Ces mêmes références montrent que les redistributions de masses consécutives à la fonte des glaciers et des calottes modifient le champ de gravité. La conséquence est une baisse du niveau de la mer à proximité de la source (ex : calotte groenlandaise), et au contraire une hausse sensiblement plus rapide que la moyenne à distance du lieu de fonte (plus de 7500 km).

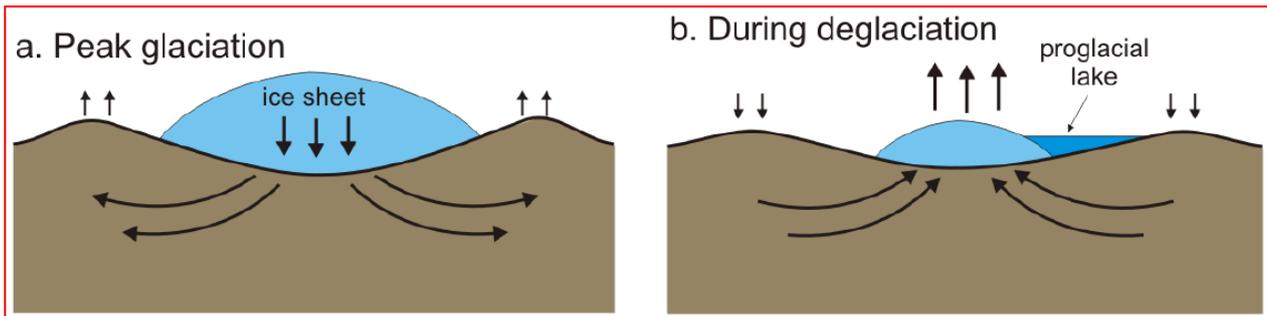


Illustration 4 - Phénomènes glaciaires impliqués dans l'ajustement isostatique global (GIA ; source : GIEC, WG1, Ch13, 2013).

À l'opposé, aux échelles régionales et locales, on trouve toute une série de mouvements verticaux du sol. Ceux-ci peuvent être d'origine naturelle (volcanique, tectonique, variations naturelles) ou anthropogénique (extractions de fluides du sous-sol, mouvements de remblais...). Ces mouvements sont généralement mal connus et ne peuvent pas être modélisés. La seule possibilité pour les caractériser est donc de disposer d'observations (Wöppelmann et al., 2013 ; Wöppelmann et Marcos, 2016).

Pour résumer, on peut considérer que le niveau de la mer, tel qu'il serait mesuré par un marégraphe au niveau de la côte, est la somme des composantes suivantes (Nicholls et al., 2014) :

$$\xi_{local} = \xi_{global} + \Delta\xi_{regional} + \Delta\xi_{grav} + \Delta\xi_{mvs} \quad (1)$$

Dans laquelle le niveau marin relatif ξ_{local} est la somme du niveau marin global et de trois termes, correspondant aux déviations régionales dues aux facteurs hydrométéorologiques, aux effets des changements du champ de gravité et aux déformations du sol actuelles (y compris GIA).

2.1.2. Projections globales et régionales de l'élévation du niveau de la mer

Tous les modèles climatiques montrent que le réchauffement climatique en cours se poursuivra au XXI^{ème} siècle. Par conséquent, le niveau de la mer continuera à s'élever au cours du XXI^{ème} siècle et au-delà, et très probablement en s'accélégrant.

⁴ En réalité, la théorie prévoit une réponse de la terre solide au réchauffement climatique actuel. Cependant, cette réponse n'est que partiellement observée aujourd'hui (ex : modification de la vitesse de rotation de la terre induite par les redistributions de masse des glaciers (ex : Mitrovica et al., 2015)).

Les valeurs d'élévation du niveau de la mer global en 2100, par rapport à une période de référence 1986-2005, sont présentées dans le rapport du GIEC de 2013 pour la fin du XXI^{ème} siècle. Elles sont les suivantes (Illustration 5) :

- 28 à 61 cm vers 2100 sous le scénario à 2°C (RCP 2.6) ;
- 52 à 98 cm vers 2100 sous le scénario à 4-6°C (RCP 8.5).

Les valeurs données par le GIEC ne sont pas des bornes supérieures et inférieures. Au contraire, le GIEC estime qu'il existe 1/3 de chances que le niveau de la mer se situe en dehors de ces intervalles (Church et al., 2013). En particulier, si la fonte des calottes polaires s'accélère, le niveau de la mer pourrait atteindre des niveaux supérieurs à +1 m en 2100. On estime aujourd'hui que la valeur maximale possible en 2100 est comprise entre 1,5 et 3 m environ (Kopp et al., 2014 ; Jevrejeva et al., 2014). En revanche, il est important de remarquer que si de tels niveaux sont atteints en 2100, cela signifiera que le niveau de la mer s'élève de plus de 1 cm par an vers la fin du XXI^{ème} siècle. Ceci implique par exemple qu'entre 2100 et 2120, l'élévation du niveau de la mer global sera au moins équivalente à celle qui a été observée entre 1870 et 2015.

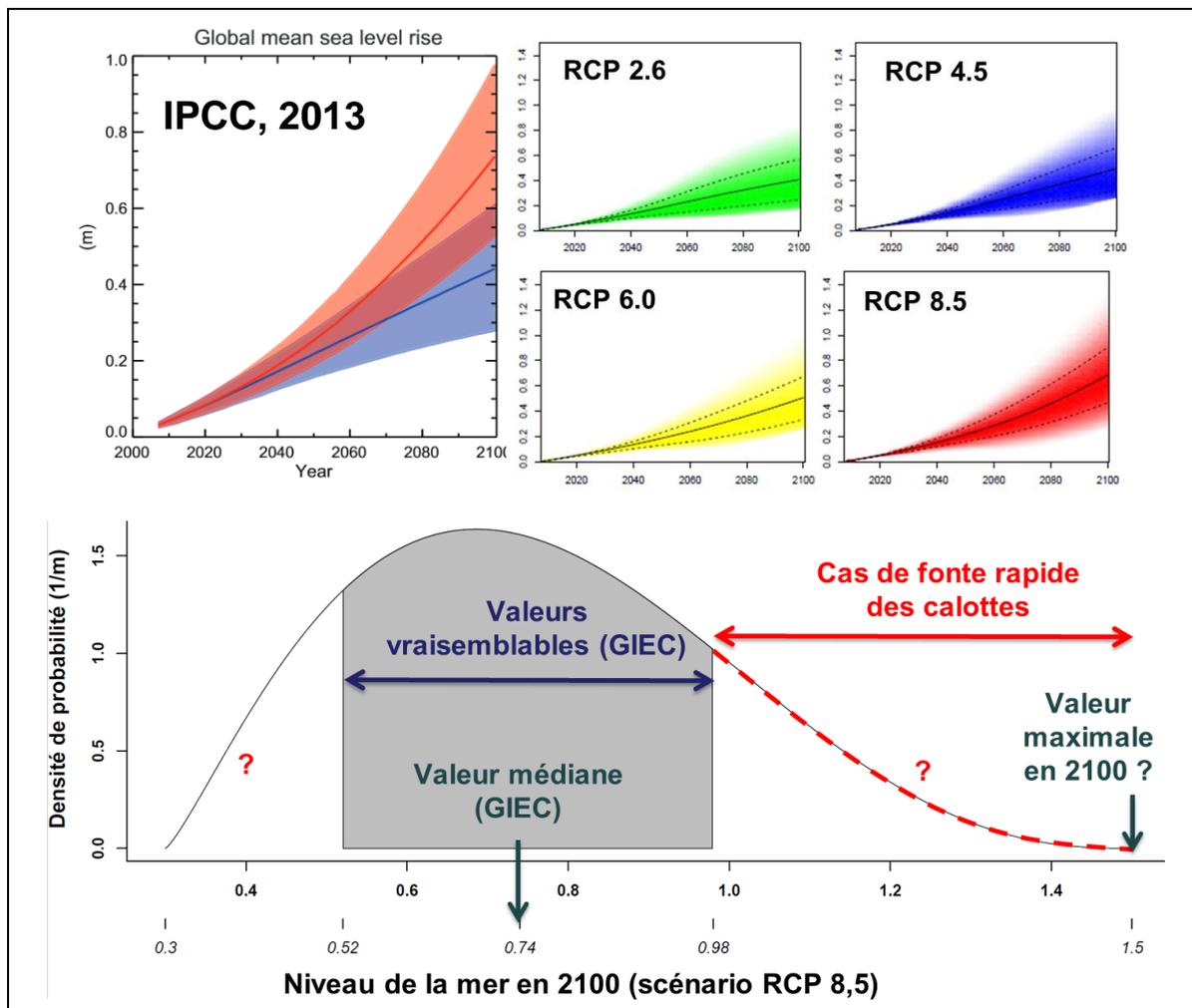


Illustration 5 - Projections de l'élévation du niveau de la mer global au XXI^{ème} siècle : en haut à gauche : scénarios d'élévation du niveau de la mer issus du 5^{ème} rapport du GIEC (2013) ; en haut à droite : scénarios probabilistes d'élévation du niveau de la mer prenant en compte la possibilité d'une fonte rapide des calottes polaires ; en bas : densité de probabilité représentant l'élévation du niveau de la mer en 2100 pour le scénario RCP 8.5 (sources : GIEC, 2013 ; Le Cozannet et al., 2015a).

Que sait-on de l'évolution future de la variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer ? Examinons les résultats de modélisation présentés par le rapport du GIEC de 2013⁵ : à l'exception des zones polaires ou affectées par des subsidences ou des surrections importantes telles que le GIA, on estime aujourd'hui que la variabilité de l'élévation du niveau marin peut induire un écart à la moyenne globale qui est de l'ordre de +/-20 cm en 2100 (Illustration 6). Par ailleurs, les subsidences locales les plus importantes sont généralement observées lorsque des extractions souterraines (eau, pétrole...) sont effectuées. Dans ce cas, des subsidences de plusieurs centimètres par an peuvent être observées. Elles sont en général constatées de manière évidente sur le terrain, en examinant les dommages au bâti. Cependant, quel que soit le site considéré, on ne peut exclure des subsidences (ou des surrections) de l'ordre de quelques millimètres par an (Wöppelmann et al., 2013 ; Le Cozannet et al., 2015b ; Wöppelmann et Marcos, 2016).

Pour résumer, dans la plupart des régions côtières, les phénomènes de mouvements verticaux du sol et de variabilité régionale peuvent être actuellement du même ordre de grandeur ou supérieurs aux effets de l'élévation du niveau de la mer global. Pour le XXI^{ème} siècle et au-delà, c'est bien l'élévation du niveau marin global qui est le sujet de préoccupation majeur.

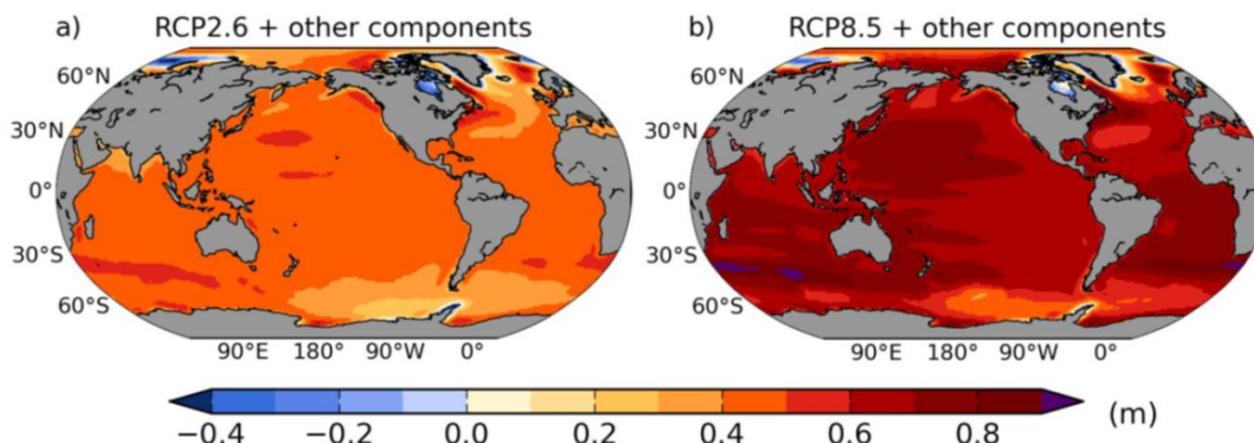


Illustration 6 - Élévation du niveau de la mer en 2081-2100 comparé à 1986-2005. Ces simulations prennent en compte des changements de température, salinité et courants de 21 modèles du GIEC, sous deux scénarios de changement climatique (réduction rapide des émissions de gaz à effets de serre : RCP 2.6 ; poursuite des émissions : RCP 8.5). Elles modélisent également les effets des pertes de masses des glaciers et des calottes polaires, ainsi que les changements de pressions atmosphériques et le GIA. (Sources : GIEC, 2013 ; Slangen et al., 2014).

Finalement, en l'absence de mouvements verticaux du sol, nous proposons de retenir les scénarios d'élévation du niveau de la mer du GIEC (Illustration 5, Tableau 2), en retenant que la variabilité régionale peut induire des variations de l'ordre de +/-20 cm supplémentaires. D'autres scénarios existent (ex : Kopp et al., 2014) : ils sont généralement plus rapides que ceux du GIEC, surtout à partir de la 2^{ème} moitié du XXI^{ème} siècle et au-delà.

⁵ Ces résultats sont basés sur l'article de Slangen et al., (2014).

Evolution possible	2030	2050-2060	2080-2100	Elévation du niveau de la mer après 2100
Poursuite des émissions de gaz à effets de serre (RCP 8.5)	5 - 10 cm	10 - 50 cm	50 cm à 1 m, voire davantage si les calottes polaires fondent rapidement (jusqu'à 2 m)	entre 1 et 3 m par siècle
Réduction très importante des émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6)	5 - 10 cm	10 - 50 cm	20 à 60 cm, voire davantage si les calottes polaires fondent rapidement (jusqu'à 2 m)	entre 0 et 3 m par siècle

Tableau 2 - Scénarios d'élévation du niveau de la mer globaux, excluant tout mouvement vertical du sol ou phénomène océanique régional (et donc n'incluant pas les +/- 20 cm supplémentaires d'incertitude locale vers 2100, indiqués dans l'illustration 6). Ces scénarios sont recommandés pour la plupart des régions peu affectées par les effets du GIA (cas de la plupart des côtes françaises métropolitaines et d'outre-mer). (Sources : GIEC, 2013 ; Gollidge et al., 2015 ; Winkelmann et al. 2015 ; Ritz et al., 2015 ; Hansen et al., 2015 ; Jevrejeva et al., 2014 ; Horton et al., 2014).

2.1.3. Incertitudes et sujets de recherche potentiels

Pour ce qui concerne l'élévation du niveau de la mer au niveau global, les incertitudes concernent :

- l'élévation du niveau de la mer passée : le niveau de la mer s'est-il élevé de 20 cm depuis 1870 (Church et White, 2011 ; GIEC, 2013) ou plutôt de 15 cm (Wöppelmann et al., 2009 ; Hay et al., 2015) ? Pour répondre à cette question, un élément clé est de mieux comprendre quelles sont les contributions des mouvements verticaux du sol locaux aux mesures marégraphiques qui sont les données de base pour calculer cette élévation (Wöppelmann et Marcos, 2016).
- l'élévation du niveau de la mer global futur : le niveau de la mer global suivra-t-il les scénarios du GIEC ou bien s'élèvera-t-il plus rapidement comme suggéré par Rahmstorf (2007), Kopp et al. (2014), Horton et al. (2014) et d'autres études ? Pour répondre à cette question, il est nécessaire d'étudier la dynamique de la fonte des calottes groenlandaises et antarctiques (Rignot et al., 2011; Ritz et al., 2015), mais aussi le bilan radiatif de la Terre (Von Schuckmann et al., 2016).
- Quelle sera la variabilité régionale de l'élévation du niveau de la mer ? Des modélisations couplées climatiques - déformation de la terre solide sont nécessaires (Slangen et al., 2014 ; Kopp et al., 2014) et l'un des enjeux est ici de mieux valider ces modèles sur les observations passées en préalable à leur utilisation pour la prospective.

Le financement de tels projets passe par des initiatives nationales et internationales, dont le World Climate Research Programme, qui implique de nombreuses équipes internationales. En France, le BRGM, mais aussi le LEGOS (Observatoire Midi-Pyrénées), contribuent au challenge « Sea level rise and coastal impacts » de ce programme.

2.2. EVOLUTIONS ATTENDUES EN NOUVELLE-AQUITAINE

Cette section procède à une revue des connaissances relatives au niveau marin en Nouvelle-Aquitaine. Pour cette revue, nous effectuons non seulement une revue bibliographique, mais aussi une analyse des données disponibles (GPS et marégraphes).

2.2.1 Ce que l'on observe actuellement

Élévation du niveau de la mer

L'élévation du niveau de la mer dans la région Nouvelle-Aquitaine est mesurée par des satellites altimétriques et des marégraphes. Les mesures altimétriques (Illustration 7) indiquent une élévation du niveau de la mer de l'ordre de 3 mm/an depuis 1993 le long des côtes de la région Nouvelle-Aquitaine. Cette valeur est proche de la moyenne globale. Cette mesure se rapporte à un référentiel géocentrique, i.e. par rapport au centre de la Terre. Les incertitudes qui pèsent sur une mesure altimétrique régionale sont de l'ordre du millimètre par an (Ablain et al., 2015).

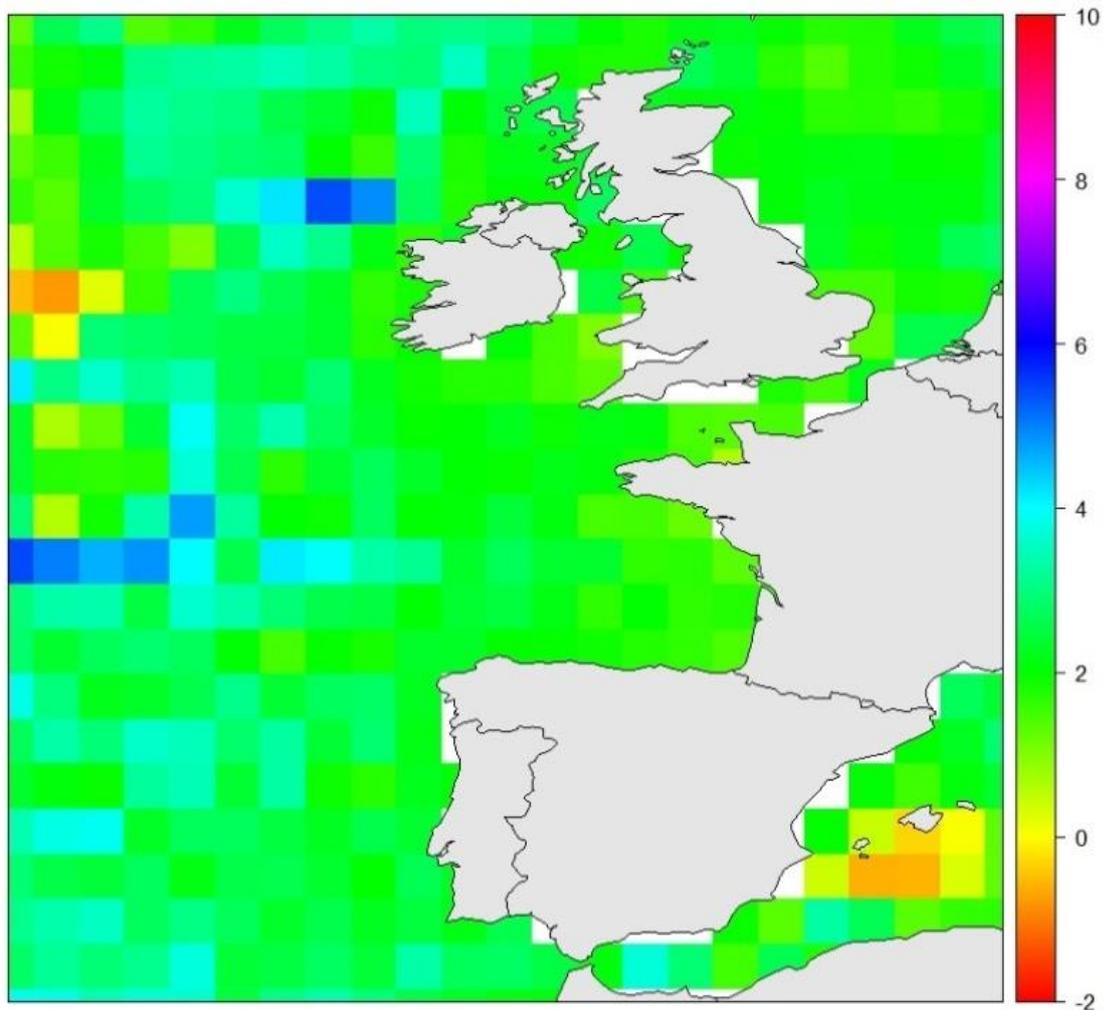


Illustration 7 - Élévation du niveau de la mer mesurée par les satellites altimétriques, pendant la période 1993-2014, en mm/an, sur la partie ouest du plateau continental européen (données Aviso/CNES/LEGOS ; graphique réalisé sous R).

Les marégraphes mesurent quant à eux le niveau de la mer dans un référentiel terrestre, c'est-à-dire par rapport à une référence fixe au sol. Nous examinons les données de quatre marégraphes de la région Nouvelle-Aquitaine dans les Illustrations 8 et 9.

L'illustration 8 présente les moyennes annuelles des mesures marégraphiques d'Arcachon et Port-Bloc. Même si l'on observe une élévation du niveau de la mer, les incertitudes sont importantes car la période d'observation est trop courte à Arcachon ; tandis que la série marégraphique de Port-Bloc présente des lacunes et des valeurs très dispersées dans les années 1970. Cette dispersion des mesures est appelée « bruit de mesure ». Cependant, nous disposons également d'une information supplémentaire pour affiner notre estimation : nous savons que le niveau de la mer augmente de quelques millimètres par an approximativement (Illustrations 1 et 7). Ces deux informations peuvent être utilisées pour estimer l'évolution du niveau de la mer (courbe rouge de l'illustration 8), en utilisant une technique de filtrage appelée « filtre de Kalman ». Cette évaluation du niveau marin est finalement relativement précise à Arcachon et Port-Bloc, malgré le bruit de mesure (voir les barres d'incertitudes représentées par les courbes rouges fines sur l'illustration 8). Pour ces deux marégraphes, il serait possible d'améliorer légèrement les estimations en exploitant les données mensuelles des années incomplètes et en reproduisant l'approche de Frederikse et al. (2016), consistant à prendre en compte les données mensuelles et les évolutions saisonnières du niveau marin annuel.

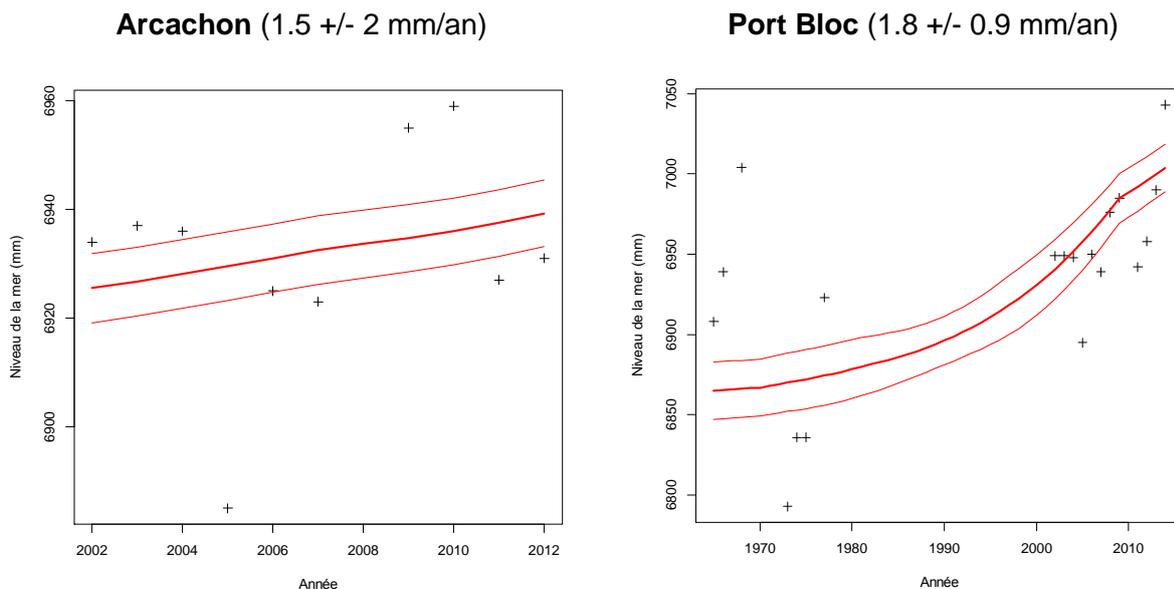


Illustration 8 - Elévation du niveau de la mer à Arcachon et Port Bloc.

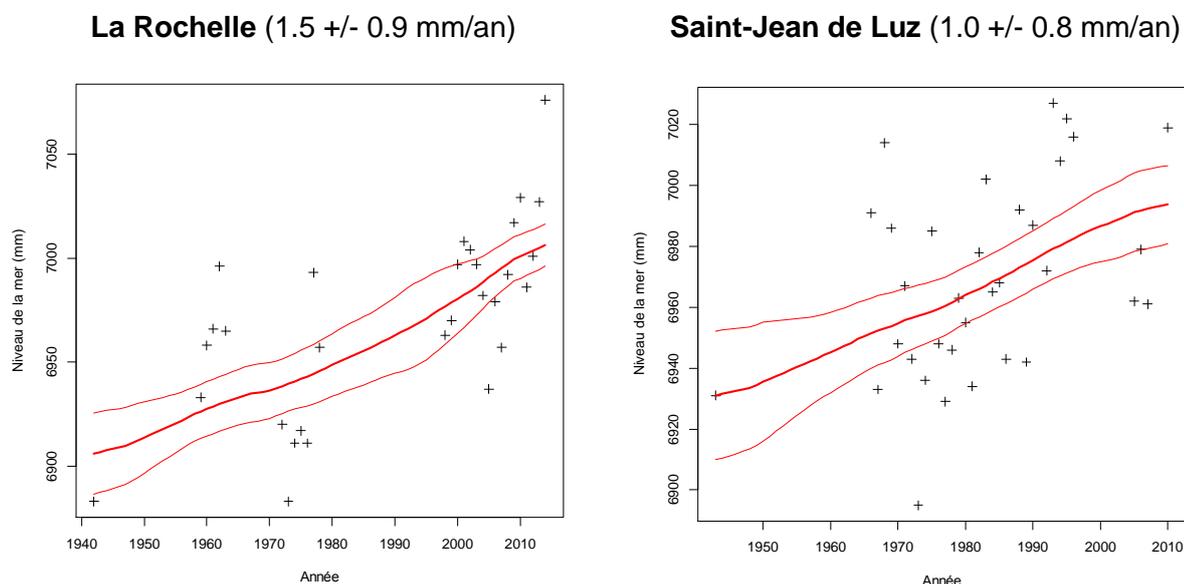
Les croix noires indiquent les moyennes annuelles, tandis que la ligne rouge épaisse indique le niveau de la mer estimé à l'aide d'un filtre de Kalman aller-retour⁶ (données DREAL/GPM Bordeaux/DDTM Gironde/SHOM distribuées par le SHOM et le PSMSL⁷). Les barres d'erreurs (lignes rouges supérieures et inférieures) sont à 1 écart type. Les taux d'élévation du niveau de la mer correspondent à la vitesse moyenne de l'élévation du niveau de la mer sur la période observée, avec leur erreur formelle associée.

Graphique réalisé sous R.

⁶ Le filtre de Kalman estime le niveau d'eau annuel en tenant compte du bruit de mesure, du caractère autorégressif des séries temporelles et de leur caractère faiblement non-linéaire.

⁷ Permanent Service for Mean Sea-Level.

L'illustration 9 présente les données d'élévation du niveau de la mer à La Rochelle et à Saint-Jean-de-Luz. Le marégraphe de La Rochelle est particulièrement intéressant, car il est très peu affecté par des mouvements verticaux du sol (www.sonel.org). Il indique une élévation du niveau de la mer de l'ordre de 1,5 +/- 0,9 mm/an pour la période 1942-2014. D'autres estimations ont pu être publiées par ailleurs, soit parce qu'elles utilisent d'autres méthodes pour calculer les tendances (Visser et al., 2015), soit parce qu'elles prennent en compte les données mensuelles. Dans tous les cas, il est important de bien prendre la mesure des incertitudes qui pèsent sur l'estimation de la vitesse d'élévation du niveau de la mer : ici, ces incertitudes, calculées à partir du filtre de Kalman, signifient que compte tenu de nos estimations du bruit de mesure et du bruit d'autocorrélation, il y a environ deux chances sur trois que la vraie valeur d'élévation du niveau de la mer soit comprise entre 0,6 et 2,4 mm/an, quelle que soit l'année sélectionnée entre 1942 et 2014. Le marégraphe de Saint-Jean-de-Luz indique une élévation du niveau de la mer de 1 mm/an environ, mais les mesures sont très bruitées. À nouveau, il serait possible d'améliorer ces estimations en prenant en compte les données mensuelles.



*Illustration 9 - Elévation du niveau de la mer à La Rochelle et à Saint-Jean de Luz.
Légende identique à l'illustration 8 ; données CD Pyrénées Atlantiques/GPM-La Rochelle/SHOM
distribuées par le SHOM et le PSMSL. Graphique réalisé sous R.*

Mouvements verticaux du sol

Plusieurs sources d'information peuvent renseigner sur les mouvements verticaux du sol :

- les modèles globaux de GIA (Ajustement isostatique global) (Peltier, 2004) ;
- les indices géologiques, tels que des paléo-niveaux marins (exemple : Leorri et al, 2012) ;
- les données GPS⁸, éventuellement complétées par des mesures de nivellement ou l'interférométrie radar satellitaire (Wöppelmann et al., 2009, 2013)

⁸ Les mouvements verticaux du sol peuvent également être déduits de la différence entre les mesures d'altimétrie satellitaire et marégraphiques. La mesure est alors analogue à ce que l'on obtiendrait avec un GPS permanent. Cependant, compte tenu des incertitudes qui pèsent sur les données marégraphiques revues dans le paragraphe précédent, mais aussi sur les données altimétriques régionales (Ablain et al., 2015), il ne nous semble pas utile de procéder à cette analyse pour les marégraphes de la région Nouvelle-Aquitaine.

- **Modèles de GIA**

Pour cette étude, nos collègues Svetlana Jevrejeva et Giorgio Spada (Universités de Liverpool et d'Orbino) nous ont donné accès à des données donnant les valeurs des modèles de GIA au niveau des marégraphes de la base de données PSMSL (Permanent Service for Mean Sea-Level). Ces données ont été publiées dans l'article de Jevrejeva et al. (2014).

Nous souhaitons examiner si une anomalie de GIA est identifiée en Aquitaine. Nous extrayons ici la quantité correspondant aux variations du niveau marin induites par le GIA. Cette quantité est une contribution au terme $\Delta\xi_{grav} + \Delta\xi_{mvs}$ dans l'équation (1). L'illustration 10 présente ces résultats. Elle montre qu'actuellement, la contribution du GIA à l'élévation du niveau de la mer est négligeable le long des côtes de la région Nouvelle-Aquitaine.

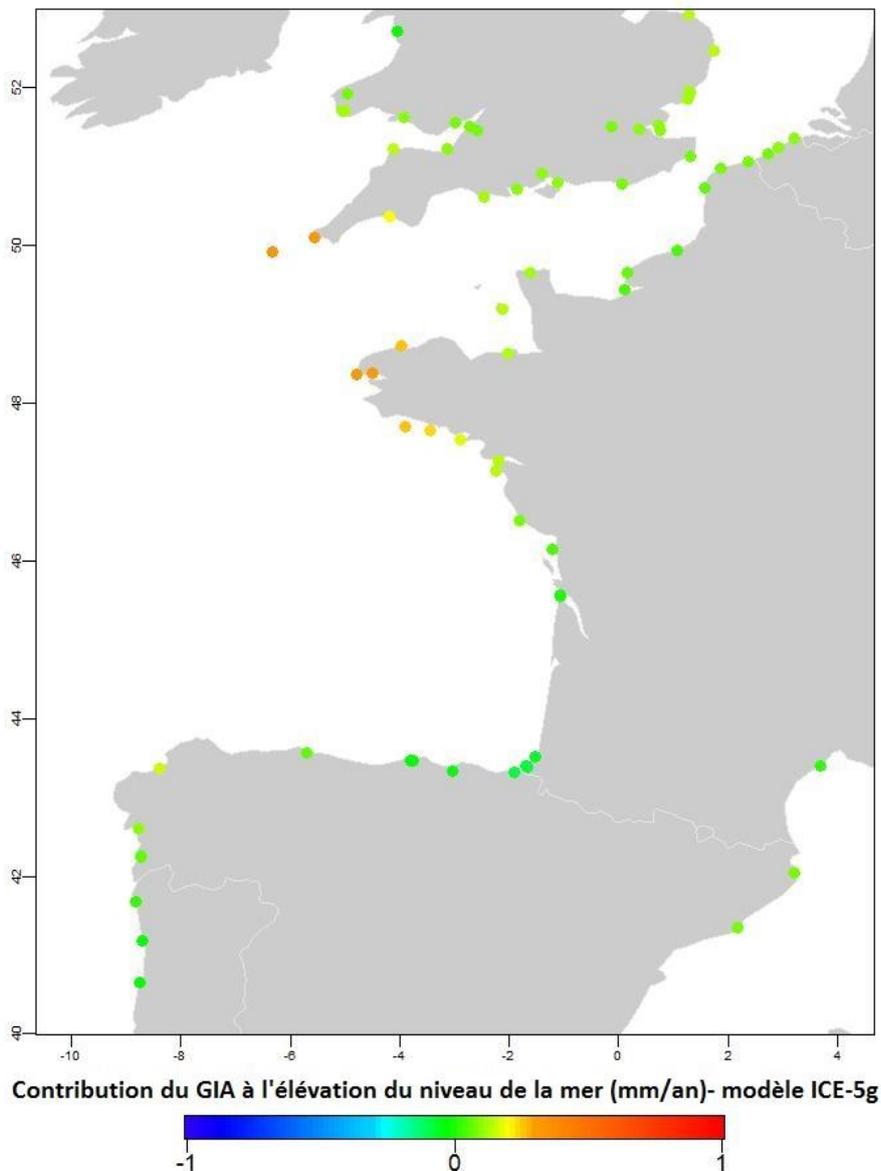


Illustration 10 -Variations du niveau de la mer induites par le GIA au niveau des marégraphes de la base de données PSMSL ; données fournies par S. Jevrejeva et G. Spada, Jevrejeva et al., 2014 ; Modèles SELEN et ICE-5g - Peltier, 2004 ; graphique réalisé sous R.

- **Indices géologiques**

L'illustration 10 montre les mouvements du sol actuels induits par le GIA. Or, il existe des indices géologiques de paléo-niveaux marins, datant de 4000 ans environ, et situés à quelques mètres sous le niveau de la mer actuel. Ceux-ci pourraient être la trace de mouvements passés, dus à la réponse de la terre solide à la déglaciation et à l'élévation du niveau marin depuis 7000 ans. L'article de Leorri et al. (2012) procède à une revue des connaissances concernant les paléo-niveaux marins dans le Golfe de Gascogne. Leur étude suggère que le niveau marin a atteint son niveau actuel il y a environ 7000 ans. L'élévation du niveau marin depuis cette période est de l'ordre de 0,3 à 0,7 mm/an, mais probablement avec des périodes de montée et de baisse du niveau marin. Plusieurs processus sont en jeu (effets régionaux et globaux de la glacio-isostasie⁹ et de l'hydro-isostasie¹⁰ ; Mitrovica et Milne, 2002), et pourraient donc effectivement expliquer les paléo-niveaux marins situés quelques mètres sous les niveaux actuels, par exemple dans le Bassin d'Arcachon. Cependant, la mise en cohérence de ces données avec des indices de paléo-niveaux marins collectés dans des travaux de recherche menés dans la région Nouvelle-Aquitaine (ex : Féliès, 1984 ; Clavé, 2001, Allard et al., 2009) n'est pas immédiate. Ce point pourrait faire l'objet d'une analyse complémentaire.

- **Données de nivellement**

A ces phénomènes globaux et régionaux se superposent des mouvements verticaux et locaux du sol, qui peuvent être analysés par diverses méthodes géodésiques. Une première approche consiste à comparer deux campagnes de nivellement. En particulier, on dispose en France d'une première campagne de nivellement effectuée entre 1884 et 1922, suivie par une seconde entre 1962 et 1985. Ces données ont permis la réalisation d'un programme national d'évaluation des mouvements verticaux du sol par le BRGM (Lenôtre et al., 1999). Malheureusement, les données le long de la côte Aquitaine sont trop éloignées de la côte pour être directement exploitables. Néanmoins, d'autres données de nivellement suggèrent l'existence d'une subsidence de -1 à 0 mm/an dans le bassin versant de la Leyre (Klingebiel et Legigan, 1992).

- **Données de GPS**

Les données GPS sont issues de la base de données SONEL de l'Université de La Rochelle (www.sonel.org). Les chercheurs de l'Université calculent des champs de vitesse GPS (appelées solutions) à partir de cette base de données : leur 5^{ème} solution a été publiée en 2012. En Aquitaine, cette 5^{ème} solution suggère que le GPS de Socoa (Saint-Jean-de-Luz) est stable, mais avec des incertitudes importantes et des discontinuités probablement dues à des problèmes de matériel. Le GPS de La Rochelle, quant à lui, indique une stabilité de la surface du sol (-0,03 +/- 0,17 mm/an). A la date de rédaction de cette note, la 6^{ème} solution de l'Université de La Rochelle n'est pas publique. Cependant, Guy Wöppelmann (Université de La Rochelle) nous a donné accès à ces données. Nous avons pu constater que le GPS du Cap-Ferret indique une subsidence de 1,3 mm/an, avec des incertitudes qui peuvent être de +/- 1 mm/an. Le GPS installé à proximité du marégraphe de La Rochelle indique quant à lui une remarquable stabilité.

⁹ réponse de la croûte continentale aux variations de la charge glaciaire qu'elle supporte.

¹⁰ réponse de la croûte continentale aux variations de la charge de la colonne d'eau qu'elle supporte.

En conclusion, cette analyse des mouvements verticaux du sol suggère que :

- L'élévation du niveau de la mer le long des côtes de la région Nouvelle-Aquitaine est proche de la moyenne globale (3,3 mm/an entre 1992 et 2015, 1,2 à 1,7mm/an au XX^{ème} siècle, c.f. Illustration 1) ;
- Les phénomènes de déformation de la terre solide (effets globaux et régionaux de la glacio et de l'hydro-isostasie) ont eu une contribution significative aux variations du niveau marin depuis 7000 ans. Ils sont cependant négligeables aujourd'hui (très inférieurs au millimètre par an) ;
- Les mouvements verticaux du sol locaux sont mal connus. Ils sont suspectés d'être de l'ordre du millimètre par an pour le Bassin d'Arcachon et le bassin de la Leyre et négligeables au niveau du marégraphe de La Rochelle. Les données disponibles sont insuffisantes pour conclure de manière définitive.

Aussi, en première approximation et pour les analyses de sensibilité qui seront effectuées dans le cadre de ce projet, nous proposons de retenir que d'une manière générale, la contribution des mouvements verticaux du sol en Aquitaine pourrait être de +/-1 mm/an.

2.2.2 Incertitudes et améliorations potentielles

La section 2.1 a montré comment réduire les incertitudes des projections d'élévation du niveau de la mer régionales et globales. Au niveau de la région Nouvelle-Aquitaine, nous recommandons de mieux évaluer les mouvements verticaux du sol en zones côtières. Le BRGM peut contribuer à ces études en procédant à des analyses d'interférométrie radar, qui permettent de compléter les données GPS et de nivellement existantes par des cartes de déformations sur les zones urbaines. Du point de vue géologique, une zone d'étude intéressante pour une telle étude pourrait être le Bassin d'Arcachon. En effet, plusieurs phénomènes peuvent induire des subsidences autour du bassin (extractions de fluides, fluctuation de niveau de nappe souterraine, présence d'une contrainte géologique structurale due à la présence de l'anticlinal de Villagrains-Landiras au nord du Bassin), et le GPS du Cap-Ferret semble confirmer cette hypothèse. Néanmoins, un tel projet ne pourrait être qu'exploratoire, car la présence de forêts autour des zones urbanisées du Bassin posera vraisemblablement des difficultés de traitement. D'autres sites d'étude pourraient être les villes de Bordeaux ou de La Rochelle, qui seraient plus adaptées du point de vue de l'interférométrie radar. En revanche, au cours de cette revue, nous n'avons pas identifié d'indications que des phénomènes de subsidence du sol sont à l'œuvre à Bordeaux ou La Rochelle. Il est donc possible qu'une étude d'interférométrie radar sur ces sites n'indique aucun mouvement vertical du sol. De la même manière, et en anticipant sur les résultats ultérieurs du présent projet, les données disponibles au pays Basque ne permettent pas de trancher concernant l'existence et l'ampleur de mouvements verticaux du sol à l'œuvre dans cette région.

2.3. CONCLUSION : QUELLES VALEURS D'ELEVATION DU NIVEAU MARIN UTILISER POUR LA REGION NOUVELLE-AQUITAINE ?

L'élévation du niveau de la mer actuellement observée en région Nouvelle-Aquitaine est de l'ordre de **2 à 3 mm/an**, ce qui est proche de la moyenne globale.

Si l'on s'en tient aux scénarios globaux, nous pouvons retenir que le niveau de la mer devrait s'élever **vraisemblablement de 28 à 61 cm en 2100** dans le cas du scénario RCP 2.6, où les émissions de gaz à effets de serre sont fortement réduites, et de **52 à 98 cm** dans le cas du scénario RCP 8.5, si les émissions de gaz à effet de serre se poursuivent.

Enfin, l'élévation du niveau de la mer **se poursuivra pendant plusieurs siècles**. Il s'agit donc d'une conséquence majeure du changement climatique, à laquelle il sera nécessaire de s'adapter dans tous les cas.

En première approximation, les scénarios globaux d'élévation du niveau de la mer peuvent convenir pour la région Nouvelle-Aquitaine, en tenant compte d'une contribution supplémentaire de +/- 20 cm à partir de la seconde moitié du XXI^{ème} siècle, due à la **variabilité régionale** de l'élévation du niveau de la mer et d'une autre contribution de +/- 1 mm/an due à d'éventuels phénomènes de **subsidence**.

3. Evolution des conditions hydrométéorologiques moyennes et extrêmes

Au-delà de l'élévation séculaire du niveau de la mer, le changement climatique est susceptible de modifier les régimes de tempêtes, les vents, les vagues, les surcotes marines... Ici, la question clé est de savoir si ces phénomènes peuvent être négligés devant l'élévation du niveau de la mer, notamment en ce qui concerne les niveaux marins extrêmes. Dans cette partie, nous examinons cette question en faisant l'état des connaissances pour chacun de ces facteurs, au niveau global et dans le golfe de Gascogne.

3.1. NIVEAUX MARINS EXTREMES

3.1.1. Ce que l'on observe actuellement

Plusieurs études ont montré que **les niveaux marins extrêmes ont augmenté** au cours des dernières décennies (Marcos et al., 2009; Menendez et Woodworth, 2010; Woodworth et al., 2011; Woodworth et Menendez, 2015). Cette augmentation est attribuée à l'élévation du niveau marin moyen, induite par le changement climatique. Les conséquences attendues de ce phénomène sont des submersions marines plus fréquentes et plus intenses. Ainsi, l'élévation du niveau de la mer a déjà des conséquences pour l'un des phénomènes à l'origine des submersions marines : le niveau marin maximal lors d'évènements de tempête.

À l'augmentation des niveaux marins extrêmes due à l'élévation du niveau de la mer, se superpose une variabilité interannuelle. Marcos et al. (2015) montrent que cette variabilité interannuelle a une certaine cohérence spatiale, ce qui suggère l'existence d'autres influences climatiques. Les grands modes de variabilité climatique tels que **l'Oscillation Atlantique Nord** semblent être des variables explicatives de ces évolutions interannuelles.

Pour résumer, les observations des niveaux marins extrêmes sont aujourd'hui affectées par l'élévation du niveau de la mer au premier ordre. Au second ordre, elles semblent être modulées par les grands modes de la variabilité climatique (ex : Oscillation Atlantique Nord).

3.1.2. Évolutions potentielles

Les sections précédentes ont non seulement rappelé que l'on observe déjà les effets de l'élévation du niveau de la mer sur les niveaux marins extrêmes, mais aussi que le niveau de la mer continuera à augmenter, quelles que soient les niveaux d'émission de gaz à effet de serre. En conséquence et en l'absence d'adaptation et de modification des régimes de tempêtes météorologiques, **les submersions marines deviendront plus fréquentes et plus intenses à l'avenir. Cette évolution sera d'autant plus importante que le niveau de la mer augmentera rapidement.**

Au niveau global, Hunter et al. (2013) et le GIEC ont estimé les besoins minimums en surélévation de défenses côtières afin de maintenir le même nombre de débordements qu'actuellement en 2100 pour 180 ports. La carte de l'illustration 11 montre les résultats pour un niveau de la mer correspondant aux projections de niveau de la mer régionalisées du scénario RCP 4.5, c'est-à-dire pour lequel les émissions de gaz à effet de serre sont fortement

réduites, mais l'objectif de 2°C n'est pas forcément atteint¹¹ (« more likely than not », selon la terminologie utilisée par le GIEC). On peut raisonnablement penser que ces niveaux sont des minima, et qu'il sera en réalité nécessaire de rehausser les défenses davantage pour maintenir des niveaux de services équivalents, notamment dans les secteurs exposés aux vagues (Sergent, 2012).

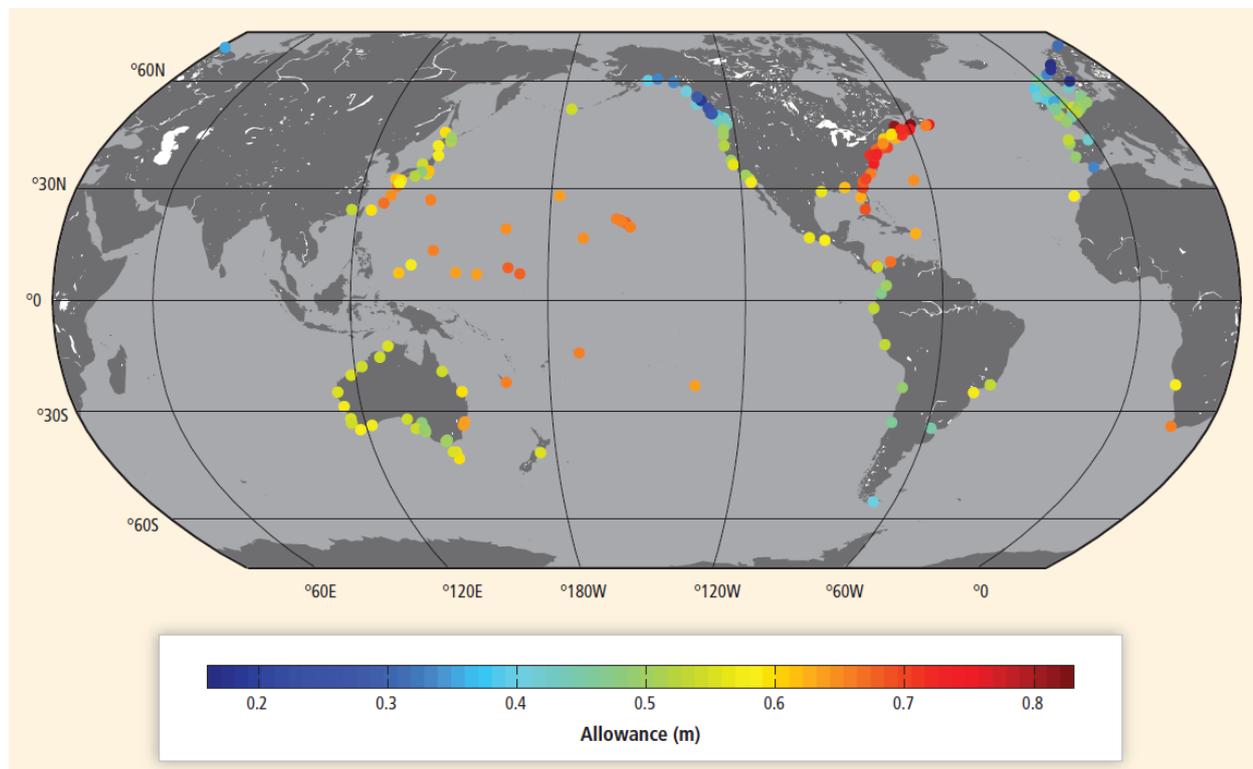


Illustration 11 - Extrait du rapport 5 du WG2 du GIEC, 2014, d'après la méthode de Hunter et al., (2013) : surélévation des défenses côtières requise pour maintenir une fréquence des événements de submersion identique à l'actuel en 2081-2100 pour 180 ports. Le scénario de niveau de la mer utilisé est celui du RCP 4.5.

3.1.3. Dans la région Nouvelle-Aquitaine

La plupart des études globales portant sur les niveaux marins extrêmes utilise la base de données du PSMSL (Permanent Service for Mean Sea-Level). Ce service fournit des données marégraphiques validées pour un ensemble de ports dans le monde. Or, le marégraphe mesure toutes les composantes du niveau de la mer : niveau de la marée astronomique, surcote atmosphérique, surcote liée au déferlement des vagues (wave setup), ainsi que les effets d'autres écoulements (effets d'un fleuve ou d'écluses) pouvant intervenir à l'intérieur des ports (Pedreros et al., 2014)¹². Il est donc nécessaire d'analyser ces données avec prudence (voir notamment les recommandations de Woodworth, 2010).

¹¹ Le GIEC indique qu'il est « plus vraisemblable que l'inverse » (more likely than not) que les 2°C soient dépassés avec ce scénario.

¹² Ce rapport n'est pas encore accessible à la date de rédaction de ce rapport. Néanmoins, ses résultats peuvent être consultés sur le lien suivant : http://refmar.shom.fr/documents/10227/427945/Rodrigo-Pedreros_Journees-REFMAR-2016.pdf

Aussi, les études qui s'intéressent à un site en particulier visent généralement à estimer plus précisément la contribution de chacun des processus à l'origine des niveaux marins extrêmes. Par exemple, dans la région Nouvelle-Aquitaine, de nombreux niveaux marins extrêmes de référence sont connus par les études des PPR (Plans de Prévention des Risques).

D'une manière générale, **une grande partie de notre méconnaissance des niveaux marins extrêmes est due au manque de données marégraphiques longues et pérennes**. Pour compléter cette information incomplète, Bulteau et al. (2015) ont proposé une méthode pour estimer les niveaux marins extrêmes en combinant des données historiques tirées d'archives (souvent partielles) et des données marégraphiques.

Ce faisant, ils montrent que **la période de retour du niveau d'eau maximum atteint lors de la tempête Xynthia dans le port de La Rochelle est de l'ordre de 200 ans**, alors que les seules données de la période instrumentée ne permettent pas de calculer de période de retour ayant un sens physique. En combinant données marégraphiques et informations historiques, la distribution de probabilité estimée permet de rendre compte d'un évènement tel que la tempête Xynthia, en lui attribuant une période de retour réaliste. De telles études sont très importantes pour estimer précisément l'impact potentiel d'évènements de référence pour le littoral.

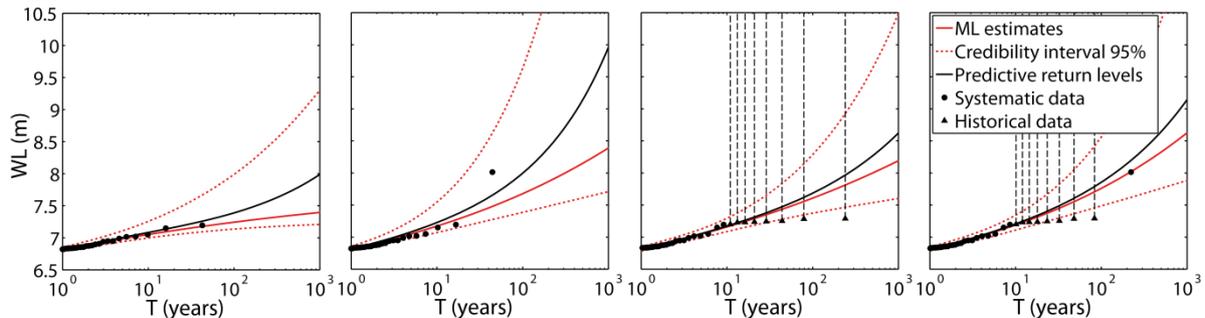


Illustration 12 - Calcul des périodes de retour des hauteurs d'eau dans le port de La Rochelle (extrait de Bulteau et al., 2015)

en prenant en compte (b1) : uniquement les observations marégraphiques avant la tempête Xynthia ; (b2) : uniquement les observations marégraphiques, y compris la tempête Xynthia ; (b3) : les observations marégraphiques et les évènements historiques connus, sauf la tempête Xynthia, et (b4) : les observations marégraphiques et les évènements historiques connus, y compris la tempête Xynthia. Ces résultats montrent que la prise en compte des évènements historiques connus permet de relativiser le caractère exceptionnel de la hauteur d'eau de Xynthia (8,01 m CM) dans le port de La Rochelle et de lui attribuer une période de retour de 220 ans environ.

Ainsi, beaucoup d'études considèrent qu'en première approximation, **les niveaux marins extrêmes futurs résulteront de la superposition de deux phénomènes : un régime de niveaux extrêmes inchangé et l'élévation du niveau de la mer**.

Cette hypothèse de travail est-elle raisonnable ? Autrement dit : peut-on concevoir une modification des régimes de niveaux extrêmes qui mettrait en défaut l'hypothèse de superposition d'un régime de niveaux extrêmes inchangé avec l'élévation du niveau de la mer ? Nous avons étudié cette question dans l'article Le Cozannet et al. (2015), en utilisant les données disponibles sur la ville de Palavas-les-Flots, assemblées lors du projet ANR Miseeva. Dans cette étude, nous avons évalué le nombre de tempêtes conduisant à des submersions marines dont les hauteurs d'eau dépassent un seuil critique¹³, mais en considérant tous les

¹³ Ceci revient à ne considérer que les tempêtes pour lesquelles on a débordement avec un niveau du plan d'eau supérieur à l'altitude des défenses, et donc à exclure les submersions par franchissement par paquets de mer.

phénomènes pouvant altérer notre capacité à évaluer les périodes de retour des submersions marines futures :

- période de retour des niveaux marins actuels : incertitudes dues au manque de données et à une éventuelle modification des régimes de tempêtes ;
- valeur du wave-setup : incertitudes sur la surélévation du plan d'eau lors des tempêtes, qui change selon la pente de la plage et les caractéristiques des tempêtes ; cette source d'incertitudes peut également conduire à une évolution des pentes de plage, induite par l'élévation du niveau de la mer ou des bilans sédimentaires plus ou moins favorables ;
- variabilités interannuelle et régionale de l'élévation du niveau de la mer : incertitudes sur leur ampleur sur le site d'étude ;
- élévation du niveau de la mer : incertitudes sur le scénario de changement climatique, sur les valeurs d'élévation du niveau de la mer possibles pour chaque scénario de changement climatique, et sur le niveau de la mer maximum envisageable dans le pire des cas (i.e. dans le cas d'une fonte très rapide des calottes polaires).

L'illustration 13 montre que même si toutes ces incertitudes sont prises en compte (y compris celles correspondant à d'éventuelles modifications de régimes de tempêtes), les périodes de retour des submersions marines augmenteront de manière importante : elles seraient environ 10 fois plus fréquentes en 2100, par rapport à aujourd'hui, dans le scénario RCP 2.6, si aucune mesure d'adaptation n'est adoptée. Cependant, pour le scénario RCP 8.5, l'illustration 13 montre une aggravation encore plus importante. Or, pour la situation actuelle, ce type d'évènement pour lequel le niveau d'eau dépasse le niveau des défenses est extrêmement improbable (moins d'une chance sur 100 chaque année).

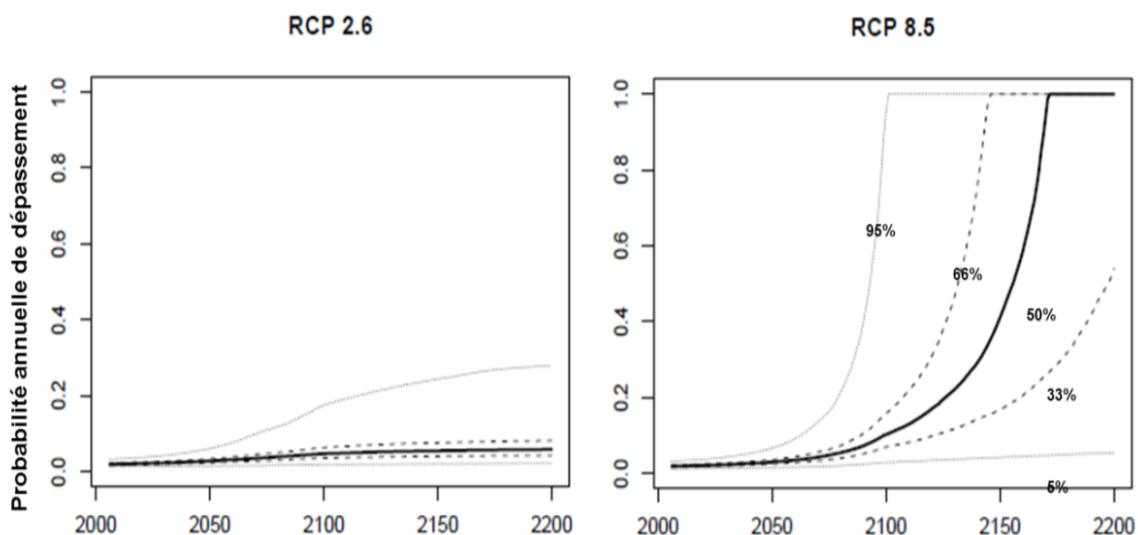


Illustration 13 - Evolution anticipée des probabilités annuelles de dépassement du seuil critique, dans un cas idéalisé, correspondant à la ville de Palavas-Les-Flots (Occitanie), en prenant en compte toutes les incertitudes pesant sur l'élévation du niveau de la mer future et les processus côtiers locaux (extrait de Le Cozannet et al. (2015a)).

Dans cette étude, on considère uniquement les submersions par débordement, pour lesquelles le niveau d'eau est supérieur au seuil critique (altitude des ouvrages de défense).

Notre étude et l'illustration 13 ont montré que trois périodes de temps se dégagent sur ce site d'étude :

- actuellement et pendant encore une vingtaine d'années, les sources d'incertitudes dominantes sont les facteurs côtiers locaux : méconnaissance des niveaux d'eau extrêmes et du wave set-up ;
- à partir de la fin du XXI^{ème} siècle, les sources d'incertitudes dominantes se trouvent dans l'élévation du niveau de la mer, conditionnée par le scénario de changement climatique choisi (donc les émissions de gaz à effets de serre) ;
- entre les deux, toutes les sources d'incertitudes sont importantes.

Cette étude porte sur la région Occitanie et n'a pas été déployée en Nouvelle-Aquitaine¹⁴. Cependant, on peut raisonnablement penser que ces résultats sont assez généraux, même si les dates auxquelles ces phénomènes se produiront seront différentes selon les sites côtiers. **Ainsi, il existe bien une date à partir de laquelle l'élévation du niveau de la mer induit des évolutions si importantes que toutes les incertitudes relatives aux autres processus peuvent être négligées.**

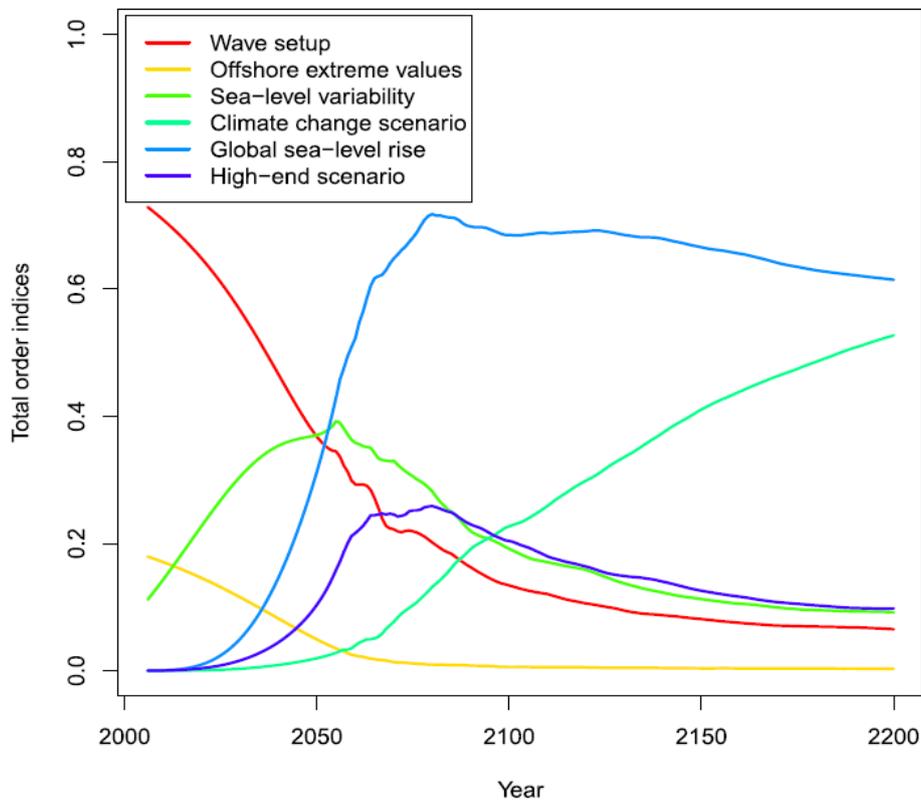


Illustration 14 - Indicateur statistique (indices de Sobol' totaux) permettant d'évaluer l'erreur commise si l'on néglige un paramètre donné (extrait de Le Cozannet et al. (2015a)).

Lorsque les courbes sont proches de zéro, il est possible de négliger la variabilité d'un paramètre donné sans effets sur la valeur de la période de retour des événements de submersion. Par exemple, si l'on s'intéresse à la submersion marine en l'absence d'adaptation, notre méconnaissance des niveaux extrêmes au large n'a guère d'importance après 2050.

¹⁴ Il serait possible de réaliser le même type d'étude sur un site Atlantique.

3.1.4 Incertitudes et sujets de recherche potentiels

Nous avons vu que les études qui s'intéressent aux effets du changement climatique sur les niveaux marins extrêmes font des hypothèses simplificatrices. Généralement, elles ne considèrent que la superposition de l'élévation du niveau de la mer avec un régime de tempêtes inchangé. Etant donné l'ampleur de l'élévation du niveau de la mer à venir et des incertitudes associées, ces hypothèses simplificatrices semblent raisonnables en première approximation pour les études s'intéressant à la fin du XXI^{ème} siècle. En revanche, pour les études s'intéressant à la première moitié du XXI^{ème} siècle, il est nécessaire de considérer tous les processus intervenant dans la fréquence et l'intensité des niveaux extrêmes. En particulier, on peut se poser les questions suivantes :

- Dispose-t-on de suffisamment de données pour estimer les niveaux d'eau de grandes périodes de retour ? Existe-t-il des informations historiques qui permettraient de mieux estimer les périodes de retour des tempêtes ? L'hypothèse que la fréquence d'apparition des événements suit une loi de Poisson stationnaire est-elle vérifiée ?
- Quelle est l'influence de la variabilité et du changement climatique sur les autres facteurs influençant les niveaux marins extrêmes ?

La première question peut faire l'objet de projets de recherche. La suite de ce chapitre examine la littérature scientifique et technique disponible relative à la seconde question.

3.2. INFLUENCE DE CHANGEMENTS DE REGIMES DE TEMPETES, DE VENTS VIOLENTS, DE VAGUES, DE SURCOTES ET DE MAREES

Le dernier rapport du GIEC (2014) indique qu'il est « improbable que le nombre total de tempêtes extratropicales baisse de plus de quelques pourcents en raison du changement climatique d'origine anthropique ». D'une manière générale, **on s'attend à un décalage vers le nord des trajectoires des tempêtes.**

Cependant, pour ce qui concerne l'Atlantique Nord, le GIEC considère qu'il est peu probable que la réponse du système soit aussi simple que cela, même si en l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible d'apporter plus d'information. Ainsi, en dehors des zones tropicales et **tout particulièrement dans l'Atlantique Nord, l'hypothèse la plus fréquemment retenue est que le régime des tempêtes variera peu.** Une étude récente questionne cette hypothèse (Hansen et al., 2015) et évoque la possibilité d'effets abrupts du changement climatique pour un réchauffement de 2°C seulement, avec des effets majeurs sur les tempêtes et l'élévation du niveau de la mer¹⁵. Finalement, sur le territoire métropolitain, les évolutions des vents violents présentent des caractéristiques différentes selon les modèles considérés (Ouzeau et al., 2014). Ainsi, en l'état actuel des connaissances, il est possible de considérer que les tempêtes et les vents violents affectant la France métropolitaine seront peu affectés par le changement climatique.

La hauteur, la période et la direction des vagues en Aquitaine résultent des régimes de vents sur le bassin Atlantique Nord-Est. Aussi, **exception faite des sites abrités, l'étude des vents locaux ne suffit pas si l'on s'intéresse aux vagues. Il faut au contraire analyser les régimes de vents à l'échelle des bassins océaniques.** Les réanalyses et les mesures effectuées en mer suggèrent que la hauteur moyenne des vagues s'est élevée en Atlantique

¹⁵ L'étude de Hansen et al. (2015) mentionne la possibilité d'une élévation du niveau de la mer de plusieurs mètres vers 2050-2150.

Nord-Est entre 1958 et 2002 (GIEC, 2013). Ces évolutions sont largement dues à l'influence de grands modes de la variabilité climatique, et notamment l'Oscillation Atlantique Nord (ou *NAO*, Illustration 15). Les évolutions observées spécifiquement en Aquitaine sont exposées dans l'article de Charles et al. (2012a).

Quelles évolutions doit-on anticiper pour le futur ? Dans une étude récente, Hemer et al. (2013) ont montré que **le changement climatique devrait induire des changements de hauteur, période et direction des vagues** (Illustration 16). Les augmentations les plus marquées de hauteur de vagues sont **dans l'hémisphère sud et pendant l'hiver austral** dans le Pacifique Sud¹⁶. Au contraire, **les diminutions de hauteur de vagues sont marquées en Atlantique Nord**.

Cependant, d'une manière générale, la communauté scientifique s'accorde pour conclure que les incertitudes sur les régimes de vagues futures sont élevées. L'enjeu actuel est de quantifier ces incertitudes, en identifiant celles qui sont issues des désaccords entre modèles de climat, de la variabilité interne du système climatique et du scénario de changement climatique. Cette analyse permettra peut-être de déterminer si un signal robuste émerge des projections de vagues océaniques. Ces efforts de recherche sont portés au niveau international par le groupe COWCLIP (Coordinated Ocean Wave Climate Project).

En Europe occidentale, nous disposons de plusieurs exercices de régionalisation des vagues futures. Charles et al. (2012b) ont forcé un modèle de vagues avec des vents du modèle Arpège-Climat de Météo-France. Dans le cas du scénario de changement climatique A2 (scénario de fortes émissions de gaz à effets de serre retenu par le GIEC en 2007), ils obtiennent une baisse des hauteurs de vagues de 5 à 11% dans le golfe de Gascogne, ainsi qu'un décalage vers le nord d'environ 5° des directions des vagues (Illustration 17).

¹⁶ D'autres études montrent une augmentation des hauteurs de vagues en mer de Béring et en Arctique, du fait de la moindre présence de glaces de mer.

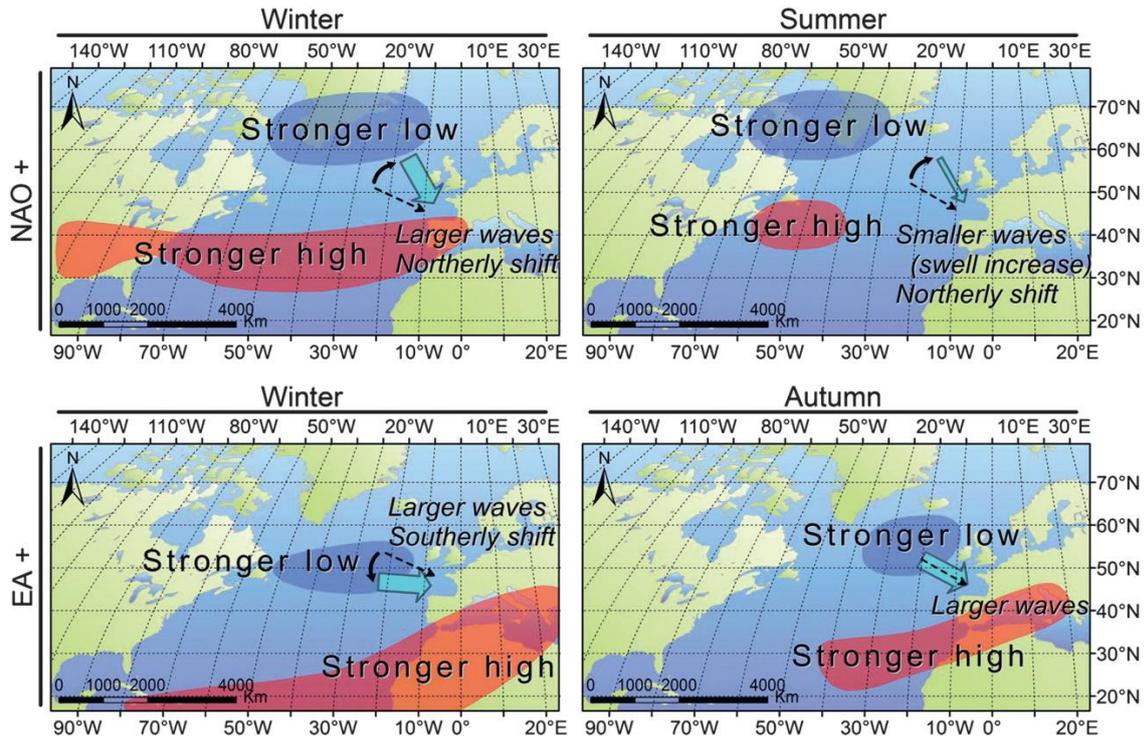


Illustration 15 - Influence de la variabilité climatique pour les vagues en Aquitaine
 extrait de Charles et al. (2012a))

Cette illustration indique par exemple que lorsque l'indice NAO est positif, on observe des vagues plus hautes et davantage orientées nord en hiver (plus petites et davantage orientées nord en été).

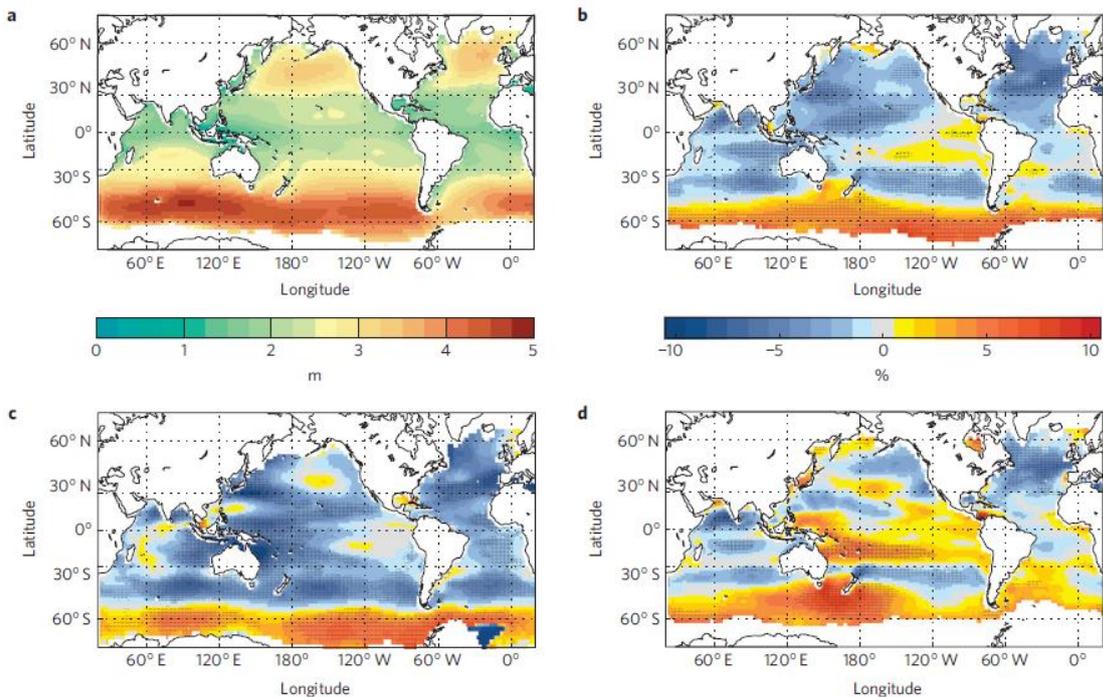


Illustration 16 - Projections des hauteurs significatives des vagues moyennes, prenant en compte plusieurs modèles climatiques (extrait de Hemer et al. (2013)).

a : moyenne annuelle des hauteurs significatives, en mètres, pour le climat actuel (1979-2009). b : changements (en %) pour 2070-2100 par rapport à la période actuelle, selon des projections des modèles de climat ; c : idem, pour janvier-février-mars ; d : idem, pour juillet-aout-septembre.

Depuis cet exercice, plusieurs autres études ont été réalisées. Tout d'abord, Laugel et al. (2014) ont montré qu'il était possible d'avoir recours à une régionalisation statistique des vagues pour effectuer des projections. Dans cette approche, les champs de pressions sont utilisés comme prédicteur des vagues dans le golfe de Gascogne. L'idée générale est que la confiance dans les champs de pression de modèles de climat est bien supérieure à celle des champs de vents. Ceci compense partiellement la perte de précision due à l'utilisation d'une régionalisation statistique plutôt que dynamique, comme dans l'étude de Charles et al. (2012b). Effectivement, Laugel et al. (2014) montrent que les régionalisations dynamiques et statistiques sont en relativement bon accord dans le golfe de Gascogne, mais notent des différences importantes en été. Plus récemment, Martínez-Asensio et al. (2016) ont montré que les régionalisations statistiques peuvent encore être améliorées en utilisant à la fois les champs de pression et les vents comme prédicteurs. Ils montrent que cette approche permet de mieux reproduire la variabilité interannuelle et les tendances anticipées par un modèle dynamique. Ces études ouvrent la porte à l'utilisation de plusieurs modèles climatiques pour effectuer des projections de vagues. Comme au niveau global, on s'attend à ce que de telles études nous permettent de mieux réaliser l'ampleur des incertitudes qui pèsent sur les projections de vagues futures au niveau régional.

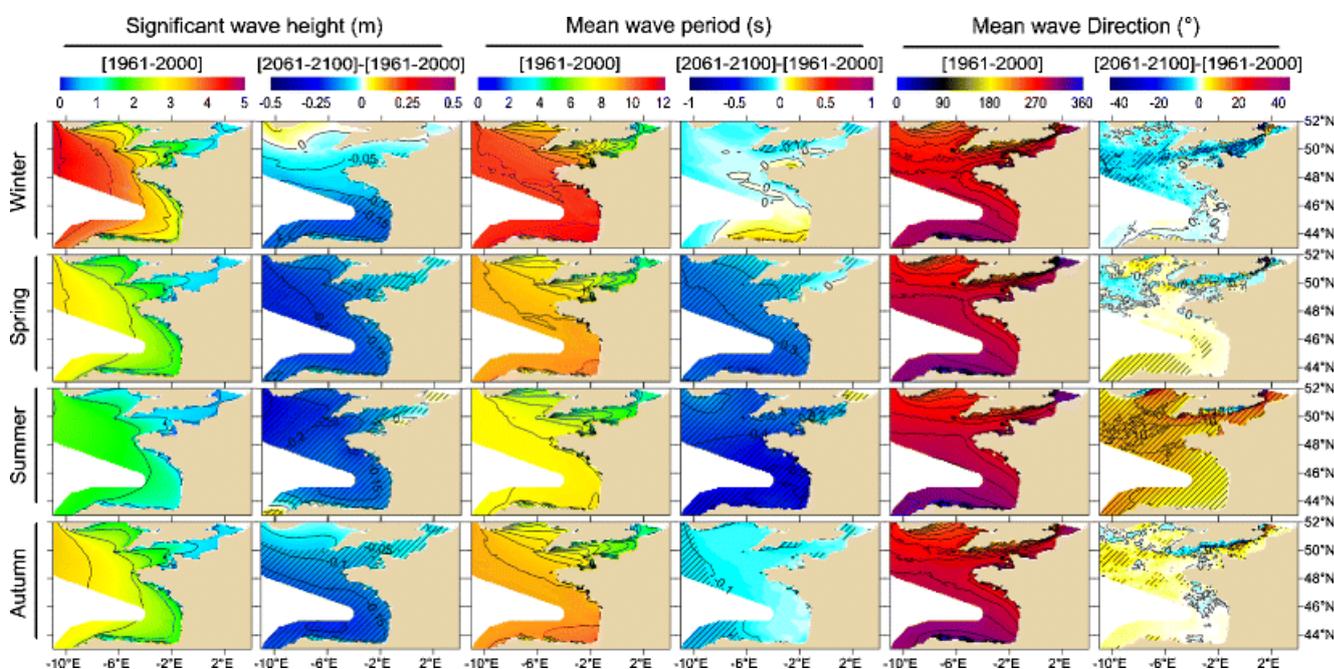


Illustration 17 - Cartes présentant les hauteurs, périodes et directions actuelles des vagues dans le golfe de Gascogne, ainsi que les changements anticipés pour un scénario de changement climatique A2 (scénarios du rapport de 2007 du GIEC) (extrait de Charles et al. (2012b).

Ces projections sont basées sur le modèle Arpège-Climat de Météo-France. Les zones hachurées indiquent un changement significatif à 95%.

Entre temps, les projections climatiques effectuées pour le 5^{ème} rapport du GIEC ont été mises à disposition des océanographes. Or, le décalage vers le nord des trajectoires de tempêtes en Atlantique Nord est moins marqué dans les données de 2013 (scénarios RCP) que dans celles de 2007 (scénarios A1B, A2, etc.) (GIEC, 2013). On pourrait penser que ceci se traduit par une réduction des changements anticipés pour les vagues futures. Les premiers résultats d'études basées sur la régionalisation statistique et une approche multi-modèles confirment au contraire les résultats des études précédentes, avec une baisse des hauteurs de vague dans le golfe de Gascogne (Perez et al., 2015).

Pour conclure, **il existe de nombreuses études sur les changements de vagues dans le golfe de Gascogne. Elles suggèrent une baisse des hauteurs de vagues de 5 à 11% et des changements de directions allant jusqu'à 5°. Il est difficile d'imaginer que ces changements puissent avoir des effets aussi importants que l'élévation du niveau de la mer d'au moins quelques dizaines de centimètres à la fin du XXI^{ème} siècle. En revanche, la variabilité interannuelle des régimes de vagues pourrait avoir des effets importants sur le littoral, pendant les quelques dizaines d'années à venir au cours desquelles le GIEC n'anticipe pas une accélération majeure de l'élévation du niveau de la mer.**

Comparativement à l'étude des vagues, on dispose de beaucoup moins d'informations sur l'influence du changement climatique sur les surcotes marines. La question est ici de savoir si le changement climatique peut avoir un effet sur les régimes de surcotes. L'étude de Marcos et al. (2011) suggère une baisse des surcotes pour la fin du siècle. Plus précisément, Marcos et al. (2012) montrent que le nombre d'événements baisserait légèrement, mais l'amplitude des surcotes elle-même ne changerait pas. D'autres études sont en cours pour estimer l'impact du changement climatique sur les régimes de surcotes (Laborie et al., 2015). Néanmoins, on peut anticiper un résultat très général : la réduction anticipée des surcotes lors de tempêtes, quelle que soit son origine et son ampleur, ne suffira pas à compenser les « surcotes » dues à l'élévation du niveau de la mer. Ce point est montré très clairement par Marcos et al. (2012) dans le cas du golfe de Gascogne et pour les scénarios climatiques de 2007, qui supposaient une élévation du niveau marin modérée.

3.3. DEBITS DES FLEUVES

Nous reprenons pour cette section les résultats de la thèse de G. Dayon (2015), qui a porté sur l'étude du cycle hydrologique continental en France et son évolution actuelle et future (Illustration 18). En moyenne, les précipitations devraient baisser sur le bassin versant de la Garonne. L'augmentation de l'évapotranspiration est moins marquée que pour d'autres bassins versants. Cela se traduit par une réduction des débits qui est particulièrement marquée sur la Garonne, puisqu'elle atteint 20 à 50% dès le milieu du XXI^{ème} siècle en été. Ces évolutions s'accompagnent par ailleurs d'une réduction des débits d'étiage et, peut-être, de crue¹⁷. Elles seront généralement d'autant plus importantes que le changement climatique sera marqué. Finalement, le bassin de la Garonne apparaît donc bel et bien comme la région de France métropolitaine où les changements de cycles hydrologiques sont les plus marqués.

¹⁷ Pour ce qui concerne les débits de crue, Dayon (2015) précise que l'approche utilisée ne permet pas de reproduire des événements de pluie différents de ceux observés actuellement. Les incertitudes concernant les débits de crue futurs demeurent donc plus importantes que celles qui pèsent sur les résultats moyens.

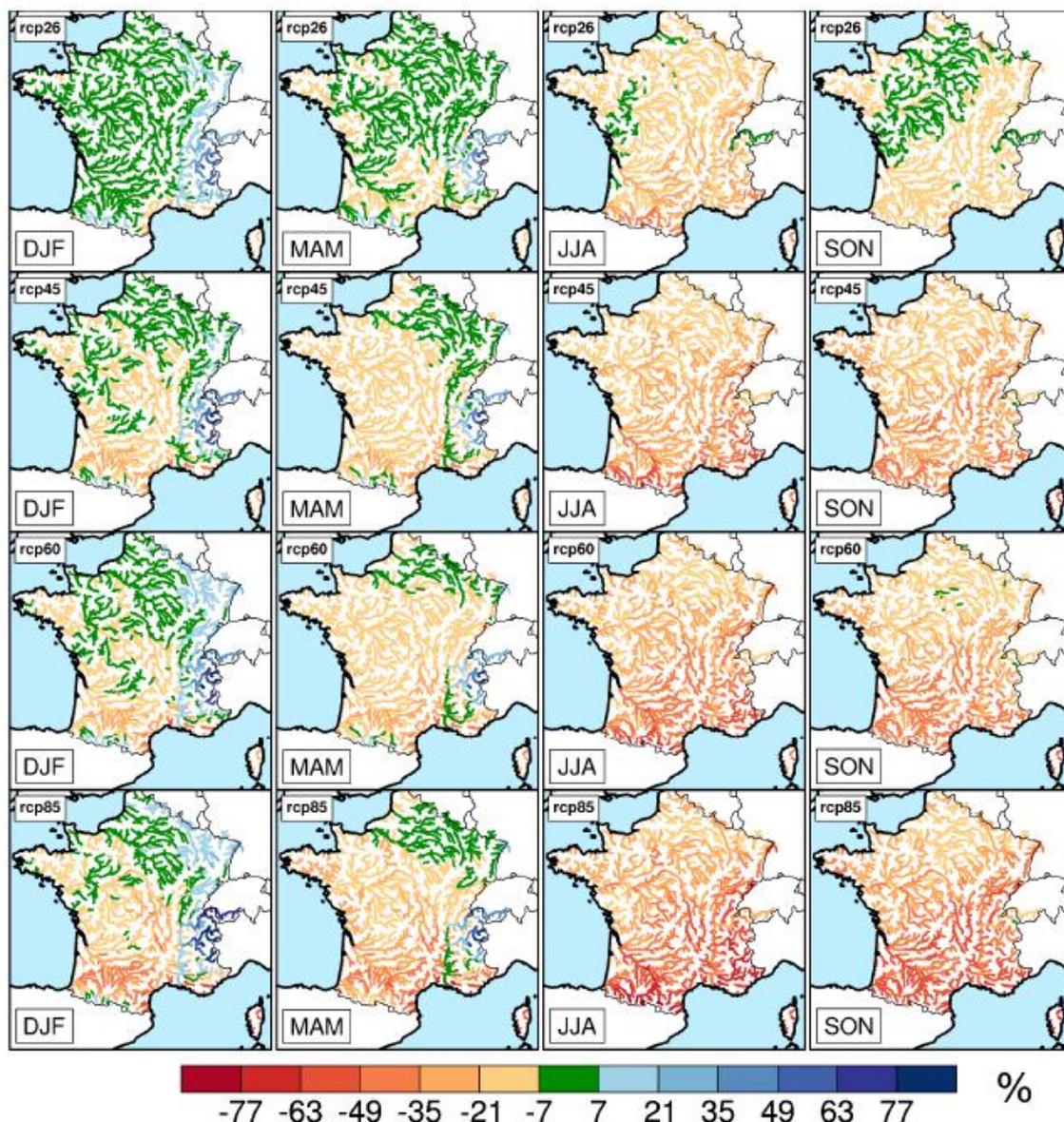


Illustration 18 - Moyenne des changements de débits moyens (en pourcents) pour 2035-2065 relativement à 1960-1990, pour chaque saison et pour chaque scénario RCP de changement climatique (extrait de Dayon (2015)).

3.4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les efforts de recherche actuels visant à améliorer la compréhension et les connaissances des conséquences du changement climatique sur les conditions hydrométéorologiques sont importants. Ils font notamment de plus en plus appel à des **approches « multi-modèles »**, dans lesquelles des résultats de plusieurs modèles de climat sont comparés. Ces études permettent d'examiner si un signal caractéristique du changement climatique peut être identifié malgré les diverses sources d'incertitudes. Ce type de recherche ne peut être mené qu'en collaboration, **en associant les océanographes, hydrologues et les spécialistes de la modélisation climatique, de la morphodynamique côtière, des risques et de l'adaptation**. Elles doivent donc être **coordonnées au niveau international**. Parmi les groupes internationaux structurants sur ces questions, on peut citer COWCLIP (Coordinated Ocean

Wave Climate Project), qui examine la question des vagues et auquel plusieurs organismes de recherche français participent, dont le CNRS et le BRGM. Même s'il est relativement clair que l'élévation du niveau de la mer est le principal risque d'aggravation des risques côtiers pour la fin du XXI^{ème} siècle, à travers notamment son impact sur les niveaux marins extrêmes, il est indispensable que la communauté française continue à contribuer et à échanger avec des groupes de recherche tels que COWCLIP, ne serait-ce que pour mieux comprendre les effets potentiels de la variabilité climatique au cours des prochaines décennies.

Pour ce qui concerne la région Nouvelle-Aquitaine, les incertitudes sur les changements de conditions hydrométéorologiques moyennes et extrêmes **demeurent bien évidemment importantes.**

Dans le cas particulier des estuaires aquitains, et notamment de l'**estuaire** de la Gironde, il faut anticiper des **réductions importantes des débits** (de l'ordre de 20 à 50% en été pour la Garonne dès le milieu du XXI^{ème} siècle)¹⁸.

Pour toutes les autres zones côtières érodables ou submersibles, deux périodes peuvent être distinguées :

- une première période, au cours de laquelle les changements observés sur le littoral aquitain demeureront dominés par les tendances actuelles et la variabilité climatique des régimes de houle et de tempêtes ;
- une seconde période au cours de laquelle c'est l'élévation du niveau de la mer qui induira les changements les plus importants pour l'érosion et la submersion.

La période de transition de la première situation vers la seconde n'est pas connue précisément. D'une manière générale, on peut considérer que **le milieu du XXI^{ème} siècle marquera une accentuation de beaucoup d'effets du changement climatique.** En pratique, **tout dépend de l'aléa considéré (submersion, érosion), mais aussi du scénario climatique.** Le chapitre suivant examine la question des impacts du changement climatique sur les aléas côtiers.

¹⁸ Notons que dans certaines zones tropicales cycloniques ou sur les côtes françaises de la Méditerranée, il serait plus difficile de parvenir à la même conclusion.

4. Impacts du changement climatique sur les zones côtières

Ce chapitre concerne les impacts du changement climatique pour les littoraux. Dans un premier temps, nous revisitons **les conclusions du rapport du GIEC de 2014**, afin de présenter une vision la plus complète possible des enjeux. Dans un second temps, nous analysons plus précisément les **conséquences relatives aux risques côtiers en région Nouvelle-Aquitaine**.

Pour cela, nous examinons successivement **comment les risques érosion et submersion marine pourraient évoluer pour quatre types de côte** idéalisés :

- les grands estuaires (cas de la Gironde),
- les milieux limono-vaseux (tels que le Bassin d'Arcachon),
- les littoraux sableux (tels que la côte sableuse aquitaine),
- et les côtes à falaises (telles que la côte rocheuse basque).

4.1. AU NIVEAU GLOBAL

Le 5^{ème} rapport du GIEC, publié en 2013 et 2014, procède à une revue des conséquences du changement climatique pour les zones côtières. Ses messages principaux peuvent être résumés dans le Tableau 3, que nous avons traduit et adapté.

Ce tableau confirme que pour des régions tempérées comme la Nouvelle-Aquitaine, l'élévation du niveau de la mer demeure le sujet de préoccupation principal pour les risques côtiers (érosion et submersion marine). Les autres évolutions des régimes de vagues et de tempêtes semblent pouvoir être négligées dans une première approche. Les impacts pour le vivant sont majeurs, et ne sont que brièvement abordés dans la suite de cette section.

D'une manière générale, on peut classer les risques induits par l'élévation du niveau de la mer de la manière suivante (Planton et al., 2015) :

- Submersions marines lors de tempêtes : les submersions marines lors de tempêtes deviendront plus fréquentes et plus intenses. Pour fixer les ordres de grandeur, une élévation du niveau de la mer de 50 cm induit en général une multiplication par au moins 10 du nombre d'évènements de submersion marine en l'absence d'adaptation (GIEC, 2014). Le chapitre 2 de ce rapport a montré qu'une telle élévation du niveau de la mer est possible, quel que soit le scénario de changement climatique.
- Erosion côtière et recul du trait de côte : même si l'analyse est rendue complexe par le manque de données et de modèles, il est possible d'affirmer que l'élévation du niveau de la mer favorise l'érosion et le recul du trait de côte. L'incertitude porte sur l'ampleur du phénomène. D'une manière générale, on soupçonne qu'une aggravation généralisée du recul du trait de côte peut encore être évitée si le niveau de la mer ne monte pas trop vite (Le Cozannet et al., 2016b). Ceci n'est possible que dans le cas du scénario RCP 2.6, où les émissions de gaz à effets de serre sont réduites rapidement et de manière importante.

Quelle politique publique permet de faire face à ces évolutions ? Cette question a été examinée dans les études de Nicholls et Lowe (2004) et de Paradaens et al., (2011) : pour ces auteurs, l'adaptation seule paraît particulièrement délicate, dans le cas d'une élévation du niveau de la mer de l'ordre du centimètre par an. En revanche, elle semble possible si le niveau de la mer ne s'élève que de quelques dizaines de centimètres d'ici la fin du siècle. Ainsi, il est clair que la

mitigation (réduction des émissions de gaz à effets de serre) est une politique publique indispensable et urgente pour faire face aux enjeux du changement climatique.

Variable climatique	Effets sur les zones et milieux côtiers (chapitre 4 de ce rapport)	Tendance due au changement climatique	Projections	Progrès depuis l'AR-4	Chapitres de ce rapport relatifs à cette variable climatique
Élévation du niveau de la mer	Submersions permanentes et temporaires (lors de tempêtes), érosion, intrusions salines, montée des niveaux piézométriques, altération des écoulements des eaux continentales.	Elévation du niveau de la mer global, induite en particulier par le réchauffement des océans, et la fonte des glaciers et des calottes.	Le niveau de la mer continuera à augmenter, probablement en accélérant, et avec des disparités régionales.	Davantage de confiance dans la contribution des différents processus à l'élévation du niveau de la mer. Meilleures connaissances sur la variabilité régionale.	Chapitre 2
Régimes de tempêtes extra-tropicales	Submersions marines temporaires, effets des vagues, érosion, dommages aux infrastructures côtières, pertes de biodiversité.	Peu de confiance dans d'éventuels changements d'intensité ; phénomène général de décalage vers les pôles des trajectoires des tempêtes (incertain en Atlantique Nord).	Il est improbable que le nombre de tempêtes baisse de plus de quelques pourcents en raison du changement climatique.	Confiance plus faible dans la significativité des tendances observées. Davantage d'informations sont disponibles sur les évolutions aux échelles des sous-bassins océaniques (ex : Atlantique Nord-Est).	Chapitre 3
Régimes de vents	Changements de courants, des vagues, submersions marines plus fréquentes et plus intenses lors de tempêtes, augmentation des dommages dans les zones côtières.	Confiance faible dans l'existence de tendances sur les vents moyens et extrêmes.	Confiance faible dans les changements de vents moyens.	Les vents n'avaient pas été examinés dans le détail pour l'AR4.	Chapitre 3
Régimes de vagues	Erosion côtière, submersion marine lors de tempêtes.	Augmentation vraisemblable des hauteurs de vagues aux hautes latitudes (n'affecte pas la région Nouvelle-Aquitaine).	Confiance faible dans les tendances sur les vagues en général, mais confiance moyenne que les hauteurs de vagues augmenteront dans l'océan austral.	Nombreuses études sur les vagues depuis l'AR4.	Chapitre 3
Niveaux marins extrêmes	Submersions marines lors de tempêtes, érosion côtière, intrusions salines dans les aquifères.	Les niveaux extrêmes augmentent du fait de l'élévation du niveau de la mer (confiance haute).	La fréquence et l'intensité des niveaux marins extrêmes augmenteront en raison de l'élévation du niveau de la mer (confiance haute). Confiance faible dans d'éventuels changements dus à des modifications des régimes de tempêtes.	Reconnaissance du fait que les mouvements verticaux du sol peuvent induire des contributions importantes à l'élévation du niveau de la mer.	Chapitre 2 et 3
Température des eaux de surface	Changements de stratification et de circulation, migration des espèces vers les pôles, accroissement de la mortalité et du blanchissement des coraux, intensification des efflorescences algales, réduction de l'extension de la banquise.	Les eaux côtières se réchauffent plus rapidement que les eaux de surface à l'échelle du globe (confiance haute).	La température de surface des eaux côtières continuera à augmenter, d'autant plus que le climat se réchauffera (confiance haute)	Davantage d'informations concernant les eaux côtières.	Brièvement abordé dans la section 4.1 ; Voir Gatusso et al. (2015) pour une revue détaillée.
Apports d'eaux douces en zones côtières	Modification des risques d'inondations dans les plaines basses côtières ; salinisation des eaux de surface (impacts pour la qualité de la ressource) ; modification des apports sédimentaires d'origine fluviale ; modification de la circulation et des apports de nutriments.	Déclin des apports d'eaux douces en zones côtières (confiance moyenne, manque de données).	Augmentation des apports d'eau douce aux hautes latitudes et dans les zones tropicales humides ; baisse des apports d'eau douce dans les autres régions tropicales (confiance moyenne).	L'information concernant les apports d'eau douce n'est disponible que depuis l'AR5.	Chapitre 3
Acidification des océans	Risques importants pour le vivant (coraux, herbiers marins, krill, ptéropodes, bivalves, poissons...).	Le pH de l'océan a baissé globalement, avec de fortes disparités régionales.	Le pH des océans continuera à s'abaisser, avec des disparités régionales.	L'acidification en zones côtières n'avait pas été spécifiquement étudiée pour l'AR4. Des progrès importants ont été faits pour estimer les impacts chimiques et biologiques.	Brièvement abordé dans la section 4.1 ; Voir Gatusso et al. (2015) pour une revue détaillée.

Tableau 3 : Conséquences actuelles et futures du changement climatique pour les zones côtières : facteurs de forçages physiques et chimiques, projections et tendances et progrès effectués depuis l'AR4 (adapté et traduit du 5^{ème} rapport du GIEC : table 5-1 du rapport 5 du WG2, 2014).

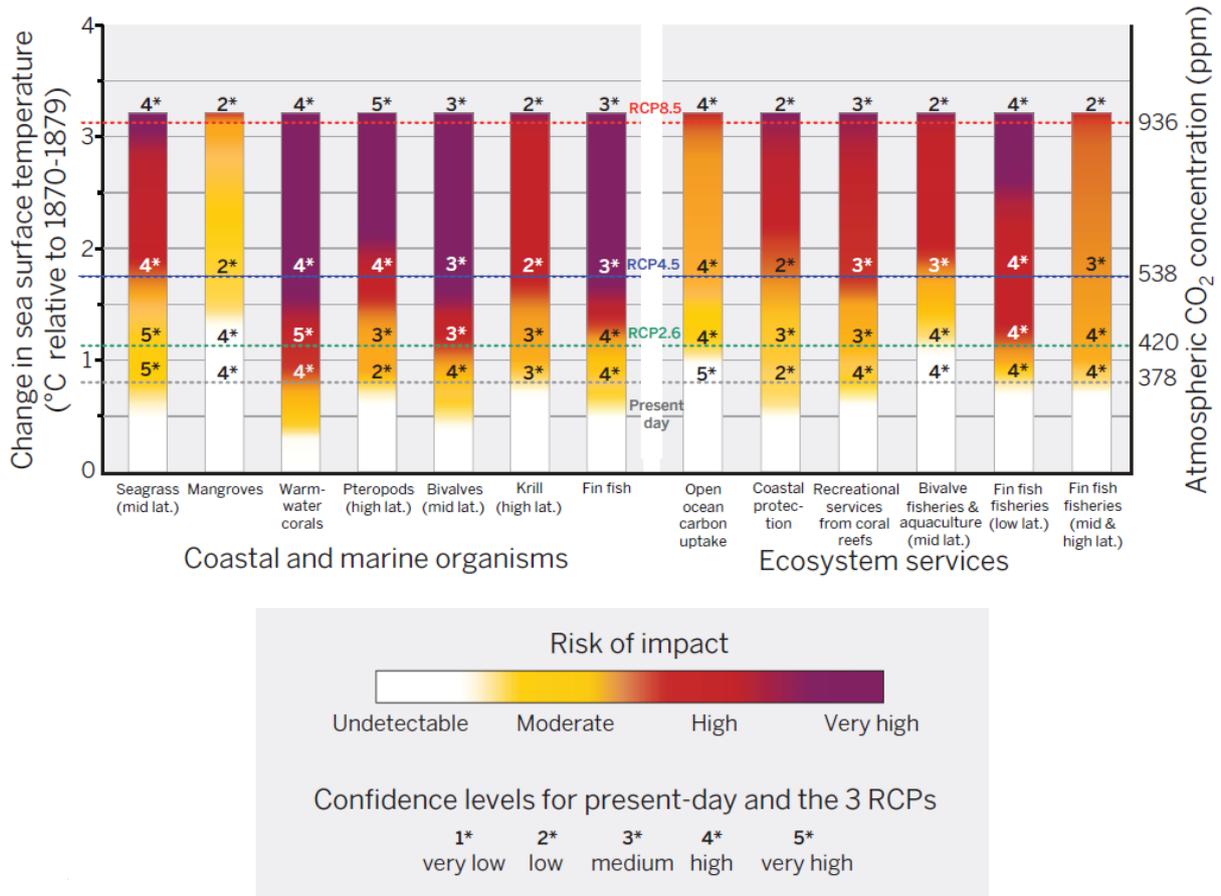


Illustration 19 - Risques induits par l'acidification et le réchauffement des eaux de surface vers 2100, pour des organismes vivants et des services écosystémiques critiques (extrait de Gattuso et al. (2015)).

Si l'on élargit l'analyse à l'ensemble des conséquences du changement climatique, il apparaît clairement que les impacts pour le vivant sont tout particulièrement préoccupants. Gattuso et al. (2015) ont effectué une revue des impacts du changement climatique pour les océans et les zones côtières. Ils montrent que si les émissions de gaz à effet de serre ne sont pas limitées fortement, les impacts pour le vivant auront dépassé des niveaux de risque critiques avant 2100 (Illustration 19). En limitant les émissions de gaz à effet de serre de manière importante, les impacts seront réels, mais le potentiel d'adaptation existe. Les différences entre ces scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6 à 8.5) ne seront pas perceptibles avant 2035.

L'illustration 19 montre que les impacts de l'acidification et du réchauffement des océans sont déjà avérés pour les coraux tropicaux, mais aussi pour les bivalves aux latitudes moyennes. Pour ces organismes, les risques deviennent élevés vers 2100, même dans le cas du scénario RCP 2.6 (limitation des températures à 2°C). Le réchauffement des eaux de surface conduit par ailleurs à une migration des espèces vers les pôles. Cette migration sera 65% plus rapide dans le cas du scénario RCP 8.5, que pour le scénario 2.6 (Gattuso et al., 2015). Si les risques sont plus importants pour les espèces spécialisées des milieux polaires et tropicaux, l'illustration 19 montre également que des espèces des latitudes moyennes seront affectées. En particulier, le phénomène de migration des espèces vers le nord est déjà observé en région Nouvelle-Aquitaine, phénomène associé à un remplacement progressif des espèces d'eaux froides par des espèces d'eaux chaudes (Le Treut et al., 2013).

L'objet de ce rapport n'est pas de faire une revue complète des impacts du changement climatique pour le vivant. Cependant, il est déjà possible de tirer une conclusion importante des éléments présentés dans cette section : comme pour ce qui concerne l'élévation du niveau de la mer, on retrouve l'idée que l'adaptation n'est possible que si les émissions de gaz à effet de serre sont diminuées de manière importante, jusqu'à parvenir à une réduction de leurs concentrations dans l'atmosphère. La première urgence d'une politique publique vis-à-vis du changement climatique reste donc de réduire les émissions de gaz à effets de serre. Le GIEC et de nombreux travaux de recherche auquel il fait référence ont montré que des solutions existent pour y parvenir.

4.2. CONSEQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR QUATRE MILIEUX COTIERS IDEALISES

Cette section examine plus en détails les conséquences du changement climatique pour quatre systèmes côtiers de la région Nouvelle-Aquitaine :

- les grands estuaires, tels que l'estuaire de la Gironde,
- les autres rivages limono-vaseux, tels que le bassin d'Arcachon,
- les littoraux sableux, tels que la côte sableuse aquitaine,
- les côtes à falaise, telles que la côte rocheuse basque.

Même si les sites côtiers idéalisés ont été conçus à partir d'exemples emblématiques de la côte ex-Aquitaine, une grande partie des conclusions présentées ci-dessous sont valables pour l'ensemble de la région Nouvelle-Aquitaine.

Pour chaque système côtier, une évaluation préliminaire des impacts futurs pour les risques côtiers (érosion et recul du trait de côte, submersion marine) est proposée, sous des conditions contrastées :

- dans deux scénarios de changement climatique, correspondant d'une part à une forte réduction des émissions de gaz à effets de serre (scénario RCP 2.6 du GIEC), d'autre part à la poursuite des tendances actuelles (scénario RCP 8.5 du GIEC) ;
- à différentes échéances de temps : 2030-2040, fin du XXI^{ème} siècle, et dans quelques siècles ;
- avec ou sans adaptation.

Ces évaluations sont présentées dans les illustrations 20, 22, 25 et 27 ci-dessous. Elles se basent sur une analyse de la bibliographie scientifique et technique, qui bénéficie largement du travail de synthèse effectué dans le cadre du rapport sur le changement climatique en Aquitaine de 2013 (Le Treut et al., 2013), et ne prétend pas le reproduire. Dans ces tableaux de synthèse, pour chaque risque identifié, des potentiels d'adaptation principaux sont présentés et assortis des évolutions majeures attendues (principales mesures à prendre) tant au niveau des milieux que des modes de gestion.

4.2.1. Estuaire de la Gironde

L'estuaire de la Gironde est fortement aménagé. Les enjeux exposés sont forts et de natures diverses : industriels, humains, économiques et écologiques. Nous avons vu dans les chapitres précédents que l'estuaire est soumis à deux influences contradictoires, conséquences du changement climatique : une élévation du niveau de la mer dans sa partie aval, et une réduction des débits dans sa partie amont. En termes de chronologie des événements, les études disponibles suggèrent que le phénomène de réduction forte des débits précèdera de quelques dizaines d'années au moins une élévation du niveau de la mer importante.

Morphodynamique de l'estuaire

Quelle sera la réponse de l'estuaire de la Gironde à ces changements ? Les études de l'IFREMER donnent une première réponse à cette question et montrent qu'un facteur très important est l'apport de sédiments depuis la partie amont de l'estuaire (Le Hir et al., 2014) :

- Si peu de sédiments parviennent à l'estuaire depuis sa partie amont, les chenaux auront tendance à s'élargir à mesure que le niveau de la mer augmente, tandis que les zones intertidales seront partiellement submergées et se réduiront.
- Si suffisamment de sédiments parviennent à l'estuaire, le système peut se traduire verticalement (par sédimentation), du moins dans la partie de l'estuaire où les processus morphodynamiques sont actifs.

Les sources d'incertitudes importantes sont donc la disponibilité sédimentaire à l'intérieur du bassin versant, les apports depuis l'amont (et éventuellement depuis la mer sur certains secteurs) et la gestion de ce milieu très anthropisé.

Se pose également la question de l'impact d'une modification des flux de sédiments sur l'érosion des côtes sableuses au débouché de l'estuaire. L'actualisation en cours des catalogues sédimentologiques confirme la littérature de référence et indique un apport actuel de sable fluviatile à l'océan, par la Gironde, relativement modéré. Une diminution de cet apport n'aurait donc pas un impact majeur sur l'évolution des côtes sableuses adjacentes.

Submersions dans l'estuaire

Les facteurs clés induisant des submersions marines dans l'estuaire sont : (1) des grandes marées ; (2) des débits du fleuve importants ; (3) une surcote due à des conditions hydrométéorologiques extrêmes et (4) des vents forts. Dans les tempêtes historiques documentées (ex : 1999), jusqu'à trois de ces facteurs ont été réunis simultanément (Monbaliu et al., 2014).

Le projet THESEUS (www.theseusproject.eu/) a étudié comment le changement climatique affecterait les risques de submersion marine dans l'estuaire de la Gironde (Laborie et al., 2012 ; 2014). Laborie et al. (2014) montrent qu'une élévation du niveau de la mer de 60 cm (hypothèse souvent prise pour la projection en 2100, ONERC) aggraverait l'aléa de submersion au moins jusqu'à Bordeaux. Les hypothèses de cet exercice de modélisation sont une bathymétrie et un débit de la Garonne inchangés. Or, on doit anticiper une évolution morphodynamique de l'estuaire à mesure que les forçages hydrométéorologiques changent. La méthode qu'il conviendrait d'adopter pour procéder à cet exercice est à construire, de sorte qu'un projet de recherche spécifique serait nécessaire pour aborder cette question.

Synthèse des pistes de recherches

Que ce soit pour la question de l'évolution de la morphologie ou des risques d'inondation dans l'estuaire, de nombreuses questions demeurent quant à l'effet du changement climatique sur cet environnement fortement dynamique et complexe qu'est l'estuaire de la Gironde et son embouchure : quels seront les apports sédimentaires depuis la partie amont de l'estuaire ? Quelles seront les conséquences de réduction des débits anticipées pour les risques de submersion ? Comment les options d'adaptation modifieront-elles l'hydrodynamique et la morphodynamique de l'estuaire ? Y-a-t-il des conditions dans lesquelles les scénarios d'adaptation envisagés deviennent moins réalistes ? Par exemple, on peut se demander si les scénarios d'adaptation actuellement envisagés pour l'estuaire sont compatibles avec une remontée rapide du niveau de la mer (de quelques centimètres

par an). Aussi, en conclusion, nous proposons une synthèse des pistes de recherches pour l'estuaire de la Gironde relatives aux aspects submersion marine et évolutions morphodynamiques, mettant en avant les incertitudes fortes qui pèsent sur les futures évolutions de ce système (Illustration 20).

Risques clés, en l'absence d'adaptation	Potentiel d'adaptation	Evolutions majeures	Echelle de temps	Risques induits avec et sans adaptation
<p>Submersions marines lors de tempêtes:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Augmentation de la fréquence des submersions par franchissement, débordement ou rupture d'ouvrage ou du cordon dunaire (confiance: forte). -Augmentation des hauteurs d'eau lors des submersions marines (confiance: forte). -Extension des zones concernées par les submersions marines temporaires (confiance: forte) 	<ul style="list-style-type: none"> - Si l'élévation du niveau de la mer ne s'accroît pas significativement et ne dépasse pas quelques dizaines de centimètres, l'adaptation pourra être menée efficacement en renforçant les protections (durs ou souples) contre la submersion. - Sinon, de nouvelles stratégies d'adaptation seront à élaborer. <p>En l'absence d'adaptation, le risque de submersion marine pourrait s'aggraver significativement à partir de la seconde moitié du XXIème siècle.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Elévation du niveau de la mer - Environnement local: topographie et bathymétrie locale - Aménagement du territoire: modification de l'aléa submersion (digues, rechargement, etc.) 	<p>Présent</p> <p>2030-2040</p> <p>2080-2100</p> <p>2°C</p> <p>4°C</p> <p>R</p> <p>CC</p>	<p>Actuel</p> <p>Aggravé</p> <p>Transformé</p>
<p>Evolutions morphodynamiques de l'estuaire:</p> <ul style="list-style-type: none"> - le système s'ajuste en permanence en fonction des apports de sédiments et de l'élévation du niveau de la mer - dans ce de milieu fortement anthropisé, l'action de l'homme joue un rôle majeur dans l'évolution morphodynamique et les risques de submersion 	<ul style="list-style-type: none"> -L'adaptation passe par une recombinaison du territoire, qui peut être vécue comme une opportunité de restaurer un état écologique de l'estuaire plus satisfaisant - Pour les scénarios d'élévation du niveau de la mer les plus rapides, l'adaptation suppose des recombinaisons importantes du territoire et/ou une ingénierie coûteuse 	<ul style="list-style-type: none"> - Elévation du niveau de la mer - Réduction des débits de la Garonne - Aménagement du territoire: digues de second rang, etc. 	<p>Présent</p> <p>2030-2040</p> <p>2080-2100</p> <p>2°C</p> <p>4°C</p> <p>R</p> <p>CC</p>	<p>Actuel</p> <p>Aggravé</p> <p>Transformé</p>

Légende:

Scénarios de changement climatique:

- 2°C Maintien des températures moyennes en deçà de 2°C par rapport à la période pré-industrielle (RCP 2.6)
- 4°C Poursuite des émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5)
- R Situation d'ici quelques siècles si le changement climatique est atténué (poursuite du scénario RCP 2.6)
- CC Situation d'ici quelques siècles sans atténuation du changement climatique (poursuite du scénario RCP 8.5)

Evolution des risques pour différentes périodes de temps et de changement climatique:

-  Indique comment les risques devraient évoluer, sans adaptation
-  Indique le niveau de risque minimal (bénéfices de l'adaptation)
-  ? Indique une confiance faible dans l'évaluation (manque d'études ou de données)
-  ?

Terminologie: un niveau de risque "aggravé" indique une situation dans laquelle les effets du changement climatique sur le système côtier considéré sont perceptibles de manière évidente. La transformation du risque implique une situation totalement différente des conditions environnementales actuelles (ex: régime d'inondation permanente de zones basses côtières, comme lors de la dernière transgression post-glaciaire).

Illustration 20 - Evaluation préliminaire des risques physiques clés pour l'estuaire de la Gironde. Le tableau est adapté des évaluations du GIEC. Il est basé sur la revue de la littérature scientifique et technique présentée ci-avant.

4.2.2. Secteurs limono-vaseux

Morphodynamique et submersions permanentes

De la même manière que pour l'estuaire de la Gironde, la question essentielle concernant l'évolution des secteurs limono-vaseux, tels que le Bassin d'Arcachon, est celle de la disponibilité sédimentaire (Le Hir et al., 2014 ; Cahoon et al., 2006, Chu-Agor et al., 2011 ; Webb et al., 2013 ; Cahoon, 2015). Les apports sont-ils suffisants pour que le système se translate verticalement ? Au contraire, faut-il s'attendre à la submersion permanente de zones intertidales et à la maritimisation du milieu ? On peut supposer qu'en première approche, les projections d'élévation du niveau de la mer du scénario RCP 2.6 permettent d'envisager les deux possibilités. En revanche, pour ce qui concerne le scénario RCP 8.5, la maritimisation du milieu serait l'évolution la plus probable. Néanmoins, ce point mériterait d'être approfondi. En effet, d'une part Morris et al. (2002) suggèrent que les marais du sud-est des États-Unis sont capables de se traduire verticalement tant que le niveau de la mer s'élève de moins de 2 cm par an (soit un taux 10 fois plus élevé que l'actuel taux d'élévation du niveau de la mer dans la région Nouvelle-Aquitaine !) ; d'autre part, les mêmes équipes de recherche notent que la moitié des marais faisant actuellement l'objet d'un suivi des taux de sédimentation et de l'élévation du niveau de la mer, sont actuellement dans une dynamique de maritimisation (Cahoon, 2015). En Nouvelle-Aquitaine, on peut noter que le Bassin d'Arcachon a déjà évolué d'un milieu océanique ouvert vers un milieu lagunaire et que l'amont du Bassin se comble tandis que le delta s'érode (Allard et al., 2009). À ceci s'ajoute le fait qu'à nouveau, les actions anthropiques ont des effets importants, et que les impacts et les interactions avec le vivant sont une source d'incertitudes importante (Chu-Agor et al., 2011). Les effets anticipés de l'élévation du niveau de la mer sur ces systèmes sont donc encore très incertains.

Submersions marines temporaires

Pour ce qui concerne les submersions marines lors de tempêtes, les résultats des plans de prévention des risques littoraux permettent de se rendre compte de l'ampleur des impacts de l'élévation du niveau de la mer (ex : Mugica et al., 2014) : même avec quelques dizaines de centimètres d'élévation du niveau de la mer seulement, l'aléa submersion marine temporaire augmente considérablement. On ne dispose pas aujourd'hui d'estimation de la date à partir de laquelle les submersions marines commenceront à devenir nettement plus fréquentes et plus intenses qu'aujourd'hui pour ces secteurs. Néanmoins, on peut faire l'hypothèse que la tendance de fond suit celle des illustrations 13 et 14 et que la période de transition se situe vers le milieu du XXI^{ème} siècle environ.

Synthèse des pistes de recherches

D'une manière générale, concernant les impacts de l'élévation du niveau de la mer, les mêmes questions se posent pour l'estuaire de la Gironde ou les autres secteurs limono-vaseux. Aussi, l'illustration 22, qui est une synthèse des impacts anticipés pour ce type de système côtier aquitain, est très semblable à celle qui examine le cas de l'estuaire de la Gironde (illustration 20). On souligne également le fort niveau d'incertitudes pour ce type de milieu, qui est notamment dû à notre méconnaissance des conséquences de l'élévation du niveau de la mer pour le transport sédimentaire, lui-même lié aux facteurs biologiques (ex. : herbiers) et anthropiques (ex. : ostréiculture, dragage, ouvrages...). L'évolution des étagements de la flore et ses impacts sur les bilans sédimentaires constituent une autre piste de recherche pour les secteurs limono-vaseux de la région Nouvelle-Aquitaine.

Deux approches complémentaires permettraient de progresser dans la connaissance de la sédimentation en milieu limono-vaseux : des modélisations (Cayocca, 2001) combinées à des observations des taux de sédimentation et du système lagunaire ou estuarien dans son ensemble.

À cet égard, on peut souligner qu'il existe une initiative internationale visant à mieux évaluer les capacités des marais côtiers à s'adapter à l'élévation du niveau marin (Webb et al., 2013). Le principe est d'évaluer les différentes composantes de l'élévation relative du niveau de la mer et de la sédimentation (illustration 21). Les résultats préliminaires obtenus par ce réseau de recherche sont déjà spectaculaires : sur 89 marais côtiers examinés dans le monde, Cahoon (2015) montre que 34 ont des taux de sédimentation qui excèdent les effets de l'élévation du niveau de la mer, tandis que la sédimentation est insuffisante pour 50 d'entre eux. Pour les 5 derniers marais, les processus sédimentaires compensent approximativement les effets de l'élévation du niveau de la mer. A notre connaissance, le Bassin d'Arcachon ne fait pas l'objet d'un suivi selon ce protocole. Cette option pourrait être étudiée par l'Observatoire de la Côte Aquitaine. Il s'agirait en particulier de compléter l'équipement de dispositifs déjà mis en place et préconisés dans le cadre du projet Barcasub (projet LITEAU, 2009-2012).

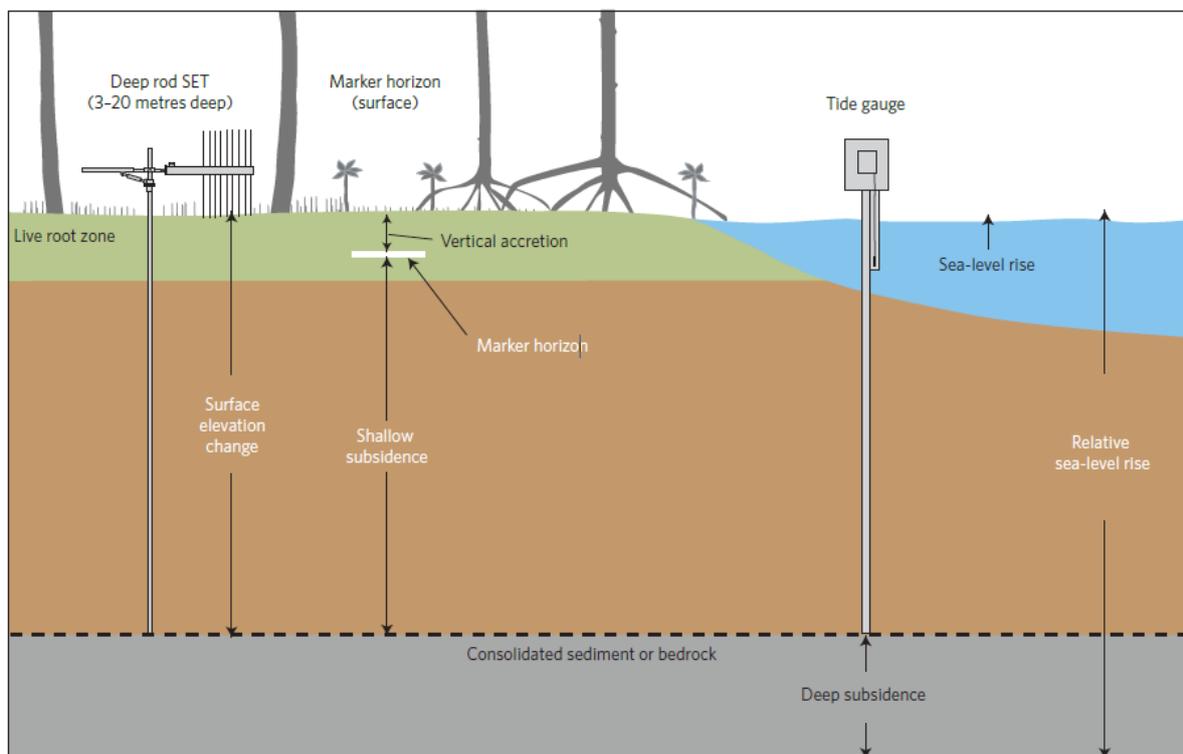


Illustration 21 - Dispositif de mesure de la subsidence et de la sédimentation (ici dans le cas d'une mangrove) recommandé dans le cadre d'une initiative internationale visant à mieux comprendre les effets de l'élévation du niveau de la mer sur la sédimentation (extrait de Webb et al. (2013) ; figure réalisée par James C. Lynch, US National Park Service).

Le principe est de mesurer l'élévation du niveau de la mer et les différentes composantes de la subsidence et de la sédimentation (profonde et superficielle).

Risques clés, en l'absence d'adaptation	Potentiel d'adaptation	Evolutions majeures	Echelle de temps	Risques induits avec et sans adaptation
<p>Submersions marines lors de tempêtes:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Augmentation de la fréquence des submersions par franchissement, débordement ou rupture d'ouvrage ou du cordon dunaire (confiance: forte). -Augmentation des hauteurs d'eau lors des submersions marines (confiance: forte). -Extension des zones concernées par les submersions marines temporaires (confiance: forte) 	<ul style="list-style-type: none"> - Si l'élévation du niveau de la mer ne s'accélère pas significativement et ne dépasse pas quelques dizaines de centimètres, l'adaptation pourra être menée efficacement en renforçant les protections (durs ou souples) contre la submersion. - Sinon, de nouvelles stratégies d'adaptation seront à élaborer. <p>En l'absence d'adaptation, le risque de submersion marine pourrait s'aggraver significativement à partir de la seconde moitié du XXIème siècle.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Elévation du niveau de la mer - Environnement local: topographie et bathymétrie locale - Aménagement du territoire: modification de l'aléa submersion (digues, rechargement, etc.). 	<p>Présent</p> <p>2030-2040</p> <p>2080-2100</p> <p>2°C</p> <p>4°C</p> <p>R</p> <p>CC</p>	<p>Actuel</p> <p>Aggravé</p> <p>Transformé</p>
<p>Erosion et recul du trait de côte de zones limono-vaseuses (marais, estuaires):</p> <ul style="list-style-type: none"> - dans ce type de milieu fortement anthropisé, l'action de l'homme joue un rôle majeur dans l'évolution du trait de côte - à partir d'un certain seuil, les apports de sédiments cohésifs ne permettent plus de compenser les effets de l'élévation du niveau de la mer 	<ul style="list-style-type: none"> -L'adaptation passe par une recomposition du territoire, qui peut être vécue comme une opportunité de restaurer un état écologique plus satisfaisant - Pour les scénarios d'élévation du niveau de la mer les plus importants, l'adaptation suppose des recompositions importantes du territoire et/ou une ingénierie couteuse 	<ul style="list-style-type: none"> - Elévation du niveau de la mer - Vitesse de sédimentation - Subsidence superficielle et profonde - Aménagements du territoire 	<p>Présent</p> <p>2030-2040</p> <p>2080-2100</p> <p>2°C</p> <p>4°C</p> <p>R</p> <p>CC</p>	<p>Actuel</p> <p>Aggravé</p> <p>Transformé</p>

Evolution des risques pour différentes période de temps et de changement climatique:

- Indique comment les risques devraient évoluer, sans adaptation
- Indique le niveau de risque minimal (bénéfices de l'adaptation)
- Indique une confiance faible dans l'évaluation (manque d'études ou de données)
- ?

Terminologie: un niveau de risque "aggravé" indique une situation dans laquelle les effets du changement climatique sur le système côtier considéré sont perceptibles de manière évidente. La transformation du risque implique une situation totalement différente des conditions environnementales actuelles (ex: régime d'inondation permanente de zones basses côtières, comme lors de la dernière transgression post-glaciaire).

4.2.3. Côte sableuse

Morphodynamique, érosion et recul du trait de côte

Le recul du trait de côte en Aquitaine est une préoccupation majeure. Ce phénomène est central dans la stratégie régionale de gestion intégrée de la bande côtière portée par le GIP Littoral Aquitain. Elle est par ailleurs très étudiée par la communauté scientifique, notamment grâce aux campagnes menées sur le site du Truc Vert (Gironde) par le laboratoire EPOC (Sénéchal et al., 2011) et aux missions de l'Observatoire de la Côte Aquitaine depuis 1996 entre l'estuaire de la Gironde et la Bidassoa.

Quels sont les phénomènes les plus importants à considérer ? Nous avons vu dans le chapitre 3 que les régimes de vagues seront peut-être modifiés dans le futur : les vagues seraient potentiellement de plus faible amplitude, et davantage orientées nord. Ces deux phénomènes ont des effets contradictoires sur le transport sédimentaire et la dérive littorale : le premier l'atténue, tandis que le second l'accélère. Du fait de la réfraction bathymétrique, c'est la réduction de la hauteur des vagues qui domine finalement (illustration 23). Ce phénomène étant expliqué, il resterait à calculer les gradients de transports longitudinaux pour évaluer leurs impacts sur l'érosion.

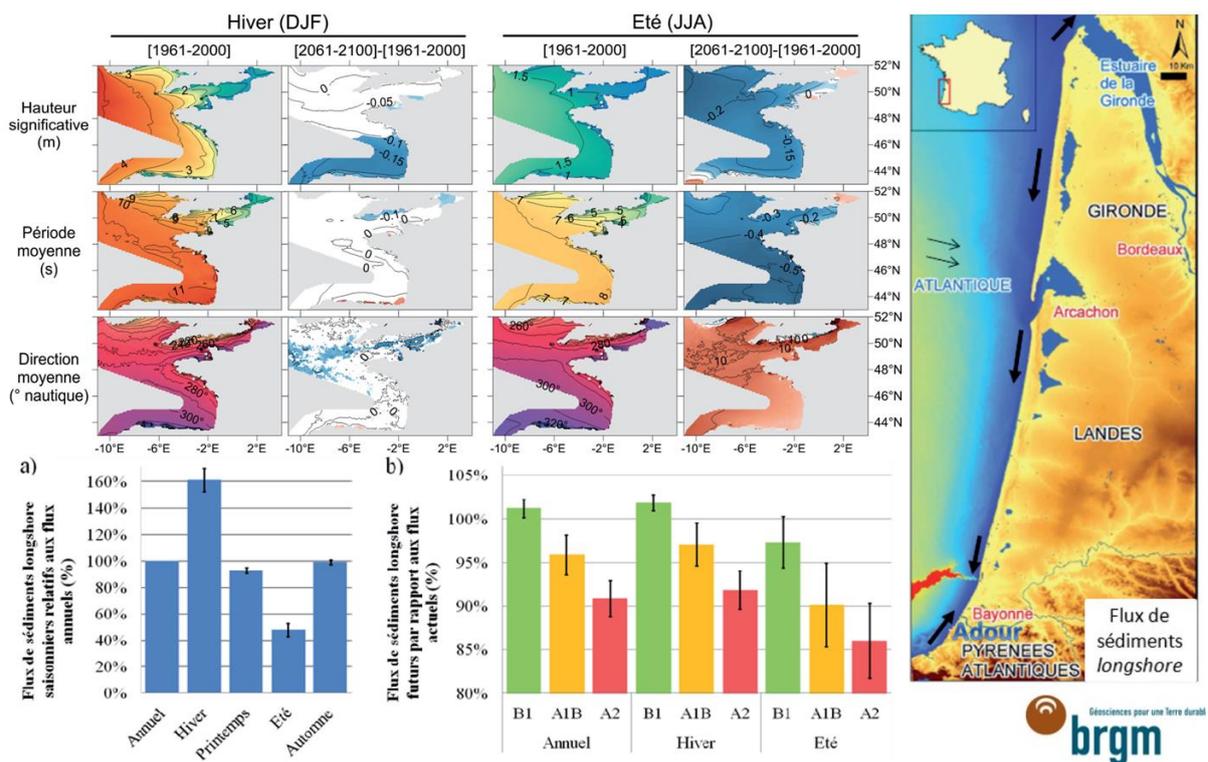


Illustration 23 - Impacts de variations des régimes de vagues sur le transport longitudinal (source : Charles et al., 2012c).

L'impact de l'élévation du niveau de la mer sur l'érosion côtière est mal connu. Pour la période passée, il est vraisemblablement encore trop tôt pour observer ses effets sur l'érosion (Stive, 2004 ; Cazenave et Le Cozannet, 2014 ; Le Cozannet et al., 2014 ; Le Cozannet et al., 2016b). Ainsi, pour des côtes sableuses en Nouvelle-Aquitaine, les évolutions actuelles seraient dominées par les effets du transport sédimentaire longitudinal ou dérive littorale (ex : Idier et al.,

2013), les effets des tempêtes (ex : Castelle et al., 2015) et ceux de la variabilité climatique interannuelle (ex : Castelle et al., 2014).

Pour ce qui concerne les évolutions futures, les simulations climatiques ne suggèrent pas qu'une augmentation de la fréquence des tempêtes météorologiques doit être attendue. En revanche, l'élévation du niveau de la mer favorisera l'érosion côtière et le recul du trait de côte. Les incertitudes portent sur l'ampleur du phénomène. Les outils prospectifs qui nous permettent d'apporter une réponse plus précise sont de deux types :

- des outils basés sur la loi de Bruun (Bruun, 1962), qui anticipe un recul du trait de côte proportionnel à l'élévation du niveau de la mer divisée par la pente de la plage ;
- des outils basés sur l'étude des processus en pied de dune (Larson et al., 2004 ; Ranasinghe et al., 2012) : à chaque tempête dépassant le pied de la dune, un recul est observé. Par la suite, en période d'accalmie, une dune embryonnaire se reconstitue. À mesure que le niveau de la mer s'élève, les épisodes érosifs deviennent plus fréquents, favorisant un recul du trait de côte à l'échelle de plusieurs années.

Dans l'étude de Ranasinghe et al. (2012), un modèle basé sur le second type a donné des prédictions de recul du trait de côte inférieures à celles indiquées par la loi de Bruun. Il n'est pas certain que cela soit vrai partout et en particulier en Nouvelle-Aquitaine.

Le premier type d'outils, basé sur la loi de Bruun, prédit une accélération de l'érosion côtière importante dès le milieu du XXI^{ème} siècle, dans le cas du scénario RCP 8.5 (illustration 24). Ce résultat est énoncé pour toutes les plages sableuses de haute énergie¹⁹ et sans ouvrage, quelle que soit l'ampleur des autres processus hydrosédimentaires côtiers (transport longitudinal, effets de l'asymétrie des vagues, effets éoliens, etc.). Au contraire, il anticipe que les taux de recul actuels ne seraient pas affectés de manière importante par l'élévation du niveau de la mer dans le cas du scénario RCP 2.6. On peut faire l'hypothèse que ces résultats seraient valables pour les côtes sableuses de la région Nouvelle-Aquitaine. Cependant, il serait utile de le vérifier, en adaptant ce type d'approche aux contextes locaux. Cette action a été proposée dans le cadre du présent projet et fera l'objet d'un rapport ultérieur.

Trois modes d'évolution peuvent être distingués pour la côte sableuse de Nouvelle-Aquitaine :

- 1^{er} mode : l'évolution du trait de côte est principalement affectée par les processus actuels (gradients de transport sédimentaire longitudinal, effets des tempêtes, variabilité interannuelle du climat). L'élévation du niveau de la mer joue un rôle plus modeste.
- 2^{ème} mode : l'élévation du niveau de la mer a des effets importants et cause un basculement vers une accélération marquée de l'érosion et du recul du trait de côte.
- 3^{ème} mode : l'élévation du niveau de la mer crée des brèches dans le cordon dunaire et cause la submersion temporaire, voire la maritimisation de zones relativement basses en arrière de ce cordon.

Le passage d'un mode à l'autre dans le futur dépend du site considéré. D'une manière générale, on retiendra que les études dont nous disposons actuellement (ex : Slangen et al., 2014 ; Kopp et al., 2014 ; Le Cozannet et al., 2016b) suggèrent que l'on peut éviter la généralisation des modes 2 et 3 le long du littoral aquitain, si les émissions de gaz à effet de serre sont fortement réduites.

¹⁹ Plages macrotidales soumises à des régimes de vagues énergétiques, telles que la côte aquitaine.

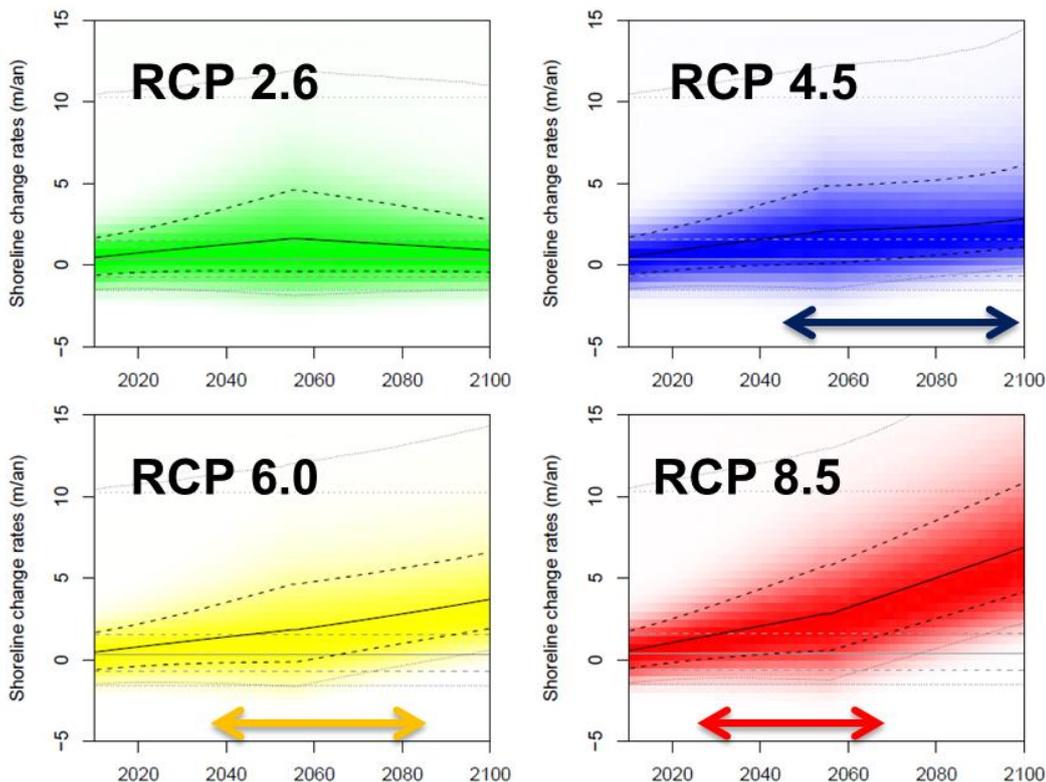


Illustration 24 - Projections de recul du trait de côte pour des plages sableuses de haute énergie et sans ouvrage, pour différents scénarios de changement climatique (extrait de Le Cozannet et al. (2016a)).

Ces modélisations sont basées sur des estimations de la contribution de tous les processus sédimentaires à l'origine de la mobilité du trait de côte (transport longitudinal, transversal, effet des tempêtes) et sur une réponse à l'élévation du niveau de la mer qui suit la loi de Bruun. Les traits pleins indiquent les valeurs médianes, les tirets les valeurs vraisemblables (66%) et les pointillés les valeurs très vraisemblables (95%). Les traits gris indiquent les valeurs actuelles (qui se poursuivraient si le niveau de la mer n'augmentait pas), tandis que les traits noirs indiquent les estimations basées sur les scénarios d'élévation du niveau de la mer incertains présentés dans l'illustration 5. Les flèches de couleurs indiquent la période de temps à partir de laquelle un signal induit par l'élévation du niveau de la mer émerge de la variabilité actuellement observée. Cette émergence peut être identifiée approximativement en examinant la séparation des fourchettes vraisemblables et des valeurs médianes actuelles (grises) et futures (noires). Pour le scénario RCP 8.5, cette situation interviendrait dès 2030-2060. Si ces résultats sont basés sur des formulations simplifiées, ils révèlent une tendance lourde qu'il est nécessaire d'anticiper.

Recul dunaire

La question du recul dunaire en Aquitaine a été étudiée par l'Observatoire de la Côte Aquitaine, en particulier pour le site de la dune du Pilat, en examinant le recul historique (Mallet et al., 2015). Si le recul dunaire devait accélérer sur ce site, ce serait en raison d'une modification des régimes de vents. Or, nous avons vu plus haut que les changements de vents locaux sont peu fiables dans les modèles climatiques. On peut donc supposer que les changements à venir liés au changement climatique sont faibles pour ce phénomène de recul dunaire. Il serait possible de le vérifier en mobilisant des outils de modélisation développés au BRGM pour examiner la sensibilité de dunes éoliennes, comme la dune du Pilat, à des changements de régimes de vents. On pourrait alors examiner la pertinence des mesures d'adaptation par recul des enjeux en arrière de ces dunes.

Synthèse des pistes de recherches

L'illustration 25 est une synthèse des impacts anticipés pour la côte sableuse aquitaine. Aujourd'hui, les études disponibles (ex : Stive, 2004 ; Ranasinghe et al., 2012 ; Le Cozannet et al., 2016b) suggèrent que **l'élévation du niveau de la mer aura des effets perceptibles sur le recul du trait de côte sableux à partir du milieu ou de la fin du XXI^{ème} siècle, si l'objectif de limiter le réchauffement climatique à 2°C par rapport à la période préindustrielle n'est pas atteint.**

Néanmoins, cette section a montré que de nombreuses questions se posent concernant l'évolution de ce type de système côtier en lien avec les changements des forçages hydrométéorologiques. De fait, la limite de la plupart des études disponibles est le recours quasiment systématique à la loi de Bruun pour modéliser l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur le recul du trait de côte (Cooper et Pilkey, 2004). Or, des modèles alternatifs existent (ex : Ranasinghe et al., 2012). Ils peuvent être utilisés pour une première quantification des incertitudes liées à la modélisation des effets de l'élévation du niveau de la mer.

Un axe de recherche proposé dans la suite de ce projet consiste à examiner comment des sites aquitains idéalisés répondent à l'élévation du niveau de la mer selon deux stratégies de modélisation différentes : celle de Bruun (ex : Stive, 2004) et celle de Larson et al. (2004). Cet exercice bénéficierait des observations réunies au Truc Vert par le laboratoire EPOC et par l'Observatoire de la Côte Aquitaine sur l'ensemble de la côte sableuse. Il permettrait une première évaluation de la robustesse des hypothèses faites dans les stratégies locales de gestion de la bande côtière sur le changement climatique et ses impacts sur l'érosion côtière.

Risques clés, en l'absence d'adaptation	Potentiel d'adaptation	Evolution majeure	Echelle de temps	Risques induits avec et sans adaptation				
				Actuel	Aggravé	Transformé		
Submersions marines temporaires: -Augmentation de la fréquence des submersions des zones situées en arrière des cordons dunaires, par franchissement, bréichification ou submersion de la dune. - Destruction d'infrastructures côtières: accès à la plage, immeubles, installations saisonnières, défenses...	Tant que la vitesse d'élévation du niveau de la mer ne dépasse pas quelques millimètres par an, la stratégie régionale de gestion du trait de la bande côtière ¹⁶ devrait rester efficace. La question posée est: que se passe-t-il si le niveau de la mer suit les projections du scénario RCP 8,5?	-Élévation du niveau de la mer - Environnement local: disponibilité sédimentaire, topographie et bathymétrie locales - Actions d'adaptation (rechargement, etc.)	Présent		?			
			2030-2040		?			
			2080-2100	2°C		?	?	?
			4°C		?	?	?	
			Quelques siècles	R	?	?		
			CC		?	?		
Tendances séculaires de l'érosion et recul du trait de côte: - Augmentation de l'érosion et du recul du trait de côte vraisemblablement dans la seconde partie du XXIème siècle, d'une ampleur qui reste à déterminer - A très long terme: submersion permanente de zones "relativement basses" en arrière du cordon	Pour les prochaines dizaines d'années, l'adaptation au recul naturel du littoral sableux aquitain nécessite avant tout de considérer la réallocation des enjeux les plus directement menacés (bâtimens, activités). Cette approche pourra être poursuivie tant que l'élévation du niveau de la mer n'excède pas quelques dizaines de centimètres par siècle.	-Élévation du niveau de la mer - Environnement local: disponibilité sédimentaire, topographie et bathymétrie locales - Actions d'adaptation (rechargement, etc.)	Présent		?			
			2030-2040		?			
			2080-2100	2°C		?	?	?
			4°C		?	?	?	
			Quelques siècles	R	?	?		
			CC		?	?		
Recul dunaire - Modification du transport éolien: les modifications éventuelles des régimes de vents affectent surtout le recul des petites dunes. Au contraire, le recul de la dune du Pilat semble peu sensible à des modifications des régimes de vents	La stratégie de recul des enjeux actuels semble pertinente pour les grandes dunes (exemple: scénarios de reculs de la dune du Pilat, proposés par l'Observatoire de la Côte Aquitaine et implications pour les campings situés en arrière de la pente d'avalanche de la dune). En revanche, la question peut se poser pour de petites dunes.	- Modifications éventuelles des vents (qui sont difficiles à détecter dans les modèles de climat, et ne sont pas anticipées à l'heure actuelle). - Disponibilité sédimentaire	Présent					
			2030-2040					
			2080-2100	2°C		?		
			4°C		?			
			Quelques siècles	R	?	?		
			CC		?	?		

Illustration 25 - Evaluation préliminaire des risques physiques clés pour la côte sableuse. Le tableau est adapté des évaluations du GIEC. Il est basé sur la revue de la littérature scientifique et technique présenté ci-avant. La légende est identique aux Illustrations précédentes.

²⁰ <http://www.littoral-aquitain.fr/sites/default/files/upload/pdf/SGBC-15-%20strat%E9gie%20r%E9gionale%20Guide%20de%20l%27action%20locale.pdf>

4.2.4. Côte rocheuse

De manière générale, les côtes rocheuses ne sont pas les plus menacées par les effets induits par le changement climatique, tels que l'élévation du niveau de la mer (Vinchon et al., 2009), car les agents d'érosion sont majoritairement d'origine continentale (lithologie, fracturation, altération, ruissellement, etc.) aggravés par l'action marine (vagues). Dans beaucoup de cas, la conséquence principale, bien qu'assez mal quantifiée, sera une submersion des zones intertidales avec des conséquences pour les écosystèmes concernés (Chust et al., 2009) et pour l'impact mécanique des vagues qui serait renforcé en pied de falaise. L'aggravation de l'érosion n'intervient que sur les secteurs les plus friables, tels que les falaises du Suffolk en Angleterre (Brooks et Spencer, 2012).

En Aquitaine, la côte rocheuse suit ce principe général. Les secteurs les plus menacés sont les zones basses concernées par les submersions marines et sur les secteurs ayant des formations géologiques peu indurées soumises à l'action des vagues. On peut notamment mentionner les secteurs correspondant au type 2 de la classification de Genna et al. (2005) : sédiments meubles, peu consolidés, couverts d'altérites et de sédiments récents. Ces secteurs se trouvent notamment dans les marnes éocènes de la Côte des Basques au sud de Biarritz (Genna et al., 2005). Néanmoins, il faut rappeler que la côte à falaise n'est pas la plus vulnérable au changement climatique en Aquitaine. Au pays Basque, ce sont les zones basses concernées par les submersions marines qui sont les plus menacées.

L'illustration 27 est une synthèse des impacts anticipés pour la côte rocheuse aquitaine.



Illustration 26 - Marnes maastrichtiennes de Bidart. Pour ce qui concerne la côte à falaise du Pays Basque, le type géomorphologique le plus vulnérable à l'élévation du niveau de la mer est le type 2 dans la classification de Genna et al. (2005).

En résumé, la côte rocheuse basque fait partie des systèmes côtiers pour lesquels le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer auront le moins d'effets sur les aléas côtiers. Aussi, pour ce type de systèmes, il n'est pas indispensable de prendre en compte le changement climatique pour s'adapter au recul du trait de côte.

Risques clés, en l'absence d'adaptation	Potentiel d'adaptation	Evolutions majeures	Echelle de temps	Risques inclus avec et sans adaptation
Erosion, recul de côte des littoraux rocheux: - des changements de variables climatiques clés jouent vraisemblablement un rôle mineur dans l'évolution de la côte rocheuse - en revanche, le recul de la côte rocheuse se poursuivra, en affectant les secteurs urbanisés - la zone intertidale sera affectée par l'élévation du niveau de la mer.	-En première approche, il n'est pas indispensable de prendre en compte le changement climatique pour s'adapter au recul de la côte rocheuse. -Les mesures actuelles (revégétalisation, stabilisation des falaises) sont efficaces dans de nombreux cas. - des replis stratégiques doivent être envisagés pour certains secteurs.	- Elevation du niveau de la mer (submersion de la zone intertidale), et, peut-être également changements dans les régimes de précipitations.	Présent	Actuel
			2030-2040	Aggravé
			2080-2100	Transformé
			2°C	?
			4°C	?
	R	?	?	
	CC	?	?	

Légende:
 Scénarios de changement climatique:
 2°C Maintien des températures moyennes en deçà de 2°C par rapport à la période pré-industrielle (RCP 2.6)
 4°C Poursuite des émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5)
 R Situation d'ici quelques siècles si le changement climatique est atténué (poursuite du scénario RCP 2.6)
 CC Situation d'ici quelques siècles sans atténuation du changement climatique (poursuite du scénario RCP 8.5)

Evolution des risques pour différentes périodes de temps et de changement climatique:


Terminologie: un niveau de risque "aggravé" indique une situation dans laquelle les effets du changement climatique sur le système côtier considéré sont perceptibles de manière évidente. La transformation du risque implique une situation totalement différente des conditions environnementales actuelles (ex: régime d'inondation permanente de zones basses côtières, comme lors de la dernière transgression post-glaciaire).

Illustration 27 - Evaluation préliminaire des risques physiques clés pour la côte rocheuse. Le tableau est adapté des évaluations du GIEC. Il est basé sur la revue de la littérature scientifique et technique présentée ci-avant.

4.3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans ce chapitre 4, nous avons procédé à une analyse des impacts du changement climatique pour les zones côtières en général et pour les risques côtiers aquitains en particulier. Les conclusions principales sont les suivantes :

- **Les impacts pour le vivant sont importants, et pour partie déjà avérés et observés.** Ces impacts ne sont pas étudiés dans ce rapport, mais ils sont particulièrement critiques pour les zones côtières (ex. : pêche, biodiversité, etc.).
- **Une aggravation des risques de submersion marine est une conséquence inéluctable de l'élévation du niveau de la mer :** au minimum, il sera nécessaire de s'adapter à une élévation des niveaux marins extrêmes lors de tempêtes, principalement induite par l'élévation du niveau de la mer. En l'absence d'adaptation, cela se traduira par des submersions plus fréquentes et plus intenses dès le milieu du XXI^{ème} siècle.
- **Une aggravation majeure de l'érosion et du recul de la côte sableuse semble encore pouvoir être évitée, mais seulement dans le scénario où le niveau de la mer ne monte pas trop rapidement.** Ceci n'est possible que si les émissions de gaz à effet de serre sont fortement réduites. Dans le cas contraire, on peut anticiper une accélération rapide de l'érosion dans la seconde partie du XXI^{ème} siècle, puis une maritimisation des zones relativement basses au-delà.

Ainsi, pour ce qui concerne l'étude des risques côtiers, **le principal changement induit par le réchauffement climatique à considérer est l'élévation du niveau de la mer.**

Les évaluations du chapitre 2 montrent une forte divergence des scénarios d'élévation du niveau de la mer dès la seconde partie du XXI^{ème} siècle.

Tous nos résultats de ce chapitre 4 (illustrations 20, 22, 25 et 27) sont donc la conséquence d'une tendance lourde : l'élévation du niveau de la mer.

L'ampleur des phénomènes est si importante que l'imprécision des modèles d'impact disponibles ne joue qu'un rôle mineur dès 2100.

Ceci permet de réaliser que l'adaptation n'a de sens que si les émissions de gaz à effet de serre sont fortement réduites. Autrement dit, une politique publique vis-à-vis du changement climatique visera d'une part à réduire rapidement les émissions de gaz à effets de serre (atténuation), d'autre part à s'adapter aux conséquences inévitables d'une élévation du niveau marin de quelques dizaines de centimètres au moins.

Ces conclusions sont basées sur une revue de la littérature scientifique publiée actuelle ; mais restent essentiellement qualitatives. Aussi, deux enjeux de recherche peuvent être mentionnés :

- Progresser dans l'évaluation des mesures d'adaptation préconisées ou envisagées dans différents secteurs et à différentes échéances de temps, afin de construire des chemins d'adaptation adaptés aux enjeux du changement climatique.
- Progresser vers des évaluations quantitatives, tout en considérant les incertitudes associées aux différentes modélisations.

La suite du projet peut contribuer à progresser dans ces deux directions : en effet, l'objectif de la fin de la phase 1 du projet est d'évaluer qualitativement des mesures d'adaptation. L'objectif de l'un des volets de la phase 2 est de proposer des évaluations quantifiées sur un site côtier idéalisé.

5. Conclusion

Ce rapport est une revue des connaissances concernant le changement climatique et ses impacts pour les risques côtiers : érosion, recul du trait de côte et submersion en région Nouvelle-Aquitaine. Il peut être utilisé de trois manières :

- en tant que point de départ pour l'évaluation qualitative des mesures d'adaptation, prévue dans la suite du programme complémentaire de l'Observatoire de la Côte Aquitaine sur le changement climatique ;
- pour alerter les différents acteurs de la gestion de la zone côtière (financeurs et comité de suivi du projet) sur les conséquences attendues du changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer et sur les opportunités d'adaptation (illustrations 20, 22, 25 et 27) ;
- pour alerter les décideurs (Région, État) sur l'urgence de réduire les émissions de gaz à effet de serre en agissant sur les politiques publiques de l'énergie et des transports (bilans carbone).

Pour ce qui concerne ces risques, le changement majeur qui doit être anticipé est l'élévation du niveau de la mer. Le changement climatique pourrait avoir d'autres effets sur les variables hydrométéorologiques affectant les aléas côtiers : modification des régimes de tempêtes, de vagues, de surcotes ou de vents. Ces variables sont aujourd'hui modulées par la variabilité naturelle du climat. En revanche, les observations et les modélisations disponibles actuellement indiquent que ces effets seront d'un ordre de grandeur inférieur à ceux de l'élévation du niveau de la mer dès le milieu ou la fin du XXI^{ème} siècle.

L'élévation du niveau de la mer est déjà prise en compte dans le cadre des plans de prévention des risques littoraux. Nous avons noté que **le GIEC anticipe qu'il y a environ 1 chance sur 3 que l'élévation du niveau de la mer dépasse 60 cm en 2100** si les émissions de gaz à effet de serre sont fortement réduites. Or, ces 60 cm sont justement l'hypothèse retenue pour les plans de prévention des risques littoraux. Il y a donc une justification au choix de cette valeur de référence.

Ce rapport a mis en évidence que **deux périodes de temps distinctes doivent être considérées** :

- une première période pendant laquelle la variabilité climatique induisant des modifications sur les régimes de vents, vagues et tempêtes aura des effets notables sur le littoral supérieurs à ceux dus au changement climatique global ;
- une seconde période pendant laquelle l'élévation du niveau de la mer, conséquence la plus importante du changement climatique au regard des risques côtiers, de par son ampleur, occultera totalement ou partiellement les variations des autres paramètres hydrométéorologiques et deviendra le sujet de préoccupation majeur.

Selon les aléas considérés, la transition entre les deux situations pourrait s'effectuer :

- vers le **milieu du XXI^{ème} siècle** dans le cas de la submersion des zones basses littorales ;
- lorsque l'élévation du niveau de la mer commencera à accélérer significativement dans le cas de **l'érosion et du recul du trait de côte des plages**, c'est-à-dire **entre le milieu et la fin du XXI^{ème} siècle** en cas d'échec des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Ce rapport met donc en évidence que les conséquences du changement climatique sont très différentes selon que l'on réduit ou non les émissions de **gaz à effets de serre**. De fait, l'adaptation côtière semble particulièrement complexe si l'élévation du niveau de la mer accélère jusqu'à atteindre des taux de 1 à plusieurs centimètres par an. Or, cette situation ne peut être évitée que si l'on suit une trajectoire de réduction forte des émissions de gaz à effets de serre. Ainsi, pour se donner la possibilité de s'adapter aux conséquences inévitables du changement climatique, il est nécessaire de réduire rapidement les émissions de gaz à effets de serre.

Par conséquent, **la première urgence d'une politique publique vis-à-vis du changement climatique est de favoriser des comportements sociaux et économiques permettant d'atténuer ces effets (atténuation).**

Exemple : **l'atténuation, via la réduction de la consommation d'énergie**, l'exploitation de ressources renouvelables telles que la géothermie, la limitation des émissions de gaz à effets de serre, le développement d'usages des sols et du sous-sol permettant de capturer et stocker les gaz à effets de serre, etc.

Le second aspect d'une politique publique vis-à-vis du changement climatique concerne l'adaptation.

Or, ce terme « adaptation » recouvre actuellement deux concepts très différents :

- une **adaptation aux conditions environnementales actuelles**, qui est traitée dans plusieurs cadres en Aquitaine (stratégies de gestion de la bande côtière, plans de prévention des risques, etc.) et par plusieurs acteurs (Conseil Régional, Etat/DREAL/DDTM, GIP Littoral Aquitain...); ces actions visent donc à répondre aux enjeux de la première période identifiée ci-dessus.
- une **adaptation aux changements spécifiquement induits par le réchauffement climatique**, qui est parfois traitée dans le cadre du volet adaptation des anciens schémas régionaux climat-air-énergie ; il s'agit ici d'anticiper la seconde période, au cours de laquelle les effets du changement climatique pour les risques côtiers deviennent majeurs.
- Le second sujet est rarement traité spécifiquement, sans doute par difficulté à se projeter dans des horizons lointains. En effet, les échéances de temps à partir desquelles le changement climatique commence à aggraver significativement les risques côtiers peuvent paraître très lointaines : il s'écoulera probablement plusieurs décennies avant que les effets de l'élévation du niveau de la mer sur l'érosion, le recul du trait de côte et les submersions ne deviennent perceptibles de manière évidente. Au contraire, lorsque les impacts sont avérés (comme c'est le cas par exemple pour la mortalité des coraux tropicaux), il est alors trop tard : en effet, la solution aurait consisté à limiter les émissions de gaz à effets de serre une quarantaine d'années auparavant.

Comment traiter cette question de l'imbrication du temps court pour l'action et du temps long pour leurs conséquences ?

Sans prétendre répondre à toutes ces questions, le programme complémentaire de l'Observatoire de la Côte Aquitaine intitulé « Adaptation au changement climatique en Aquitaine » a proposé d'examiner cette question en procédant de la manière suivante :

- (1) identification des mesures d'adaptation actuellement envisagées ou possibles ;
- (2) évaluation de ces mesures d'adaptation, au regard de ce que l'on peut anticiper du changement climatique et de l'évolution de la vulnérabilité du territoire.

En phase 1, ce travail doit permettre une première élaboration de chemins d'adaptation pour les zones côtières de la région Aquitaine, au-delà de la période pendant laquelle les risques côtiers demeureront principalement dépendants de la variabilité climatique, des actions anthropiques et de l'héritage géologique. À terme, il s'agit de favoriser l'émergence de politiques d'adaptation au changement climatique qui ne soient pas seulement dimensionnées pour les aléas côtiers actuels (cas des mesures actuellement préconisées par exemple par le GIP Littoral Aquitain), mais qui prennent réellement en compte les effets du changement climatique que l'on peut déjà anticiper aujourd'hui, c'est-à-dire, une élévation du niveau de la mer qui se poursuit tout au long du XXI^{ème} siècle et au-delà, à des rythmes au moins identiques à celui observé actuellement (3,3 mm/an).

6. Remerciements

Les auteurs remercient Anny Cazenave, Serge Planton, Bruno Castelle, Pierre Le Hir, Aldo Sottolichio, Svetlana Jevrejeva, Guy Wöppelmann et Hughes Féliès pour les nombreux échanges, qui ont permis de réunir la bibliographie et les données nécessaires à la rédaction de ce rapport. Nous remercions également Anne Guchan et les membres du comité de suivi du programme complémentaire « adaptation au changement climatique » de l'Observatoire de la Côte Aquitaine pour leur relecture attentive et la qualité des échanges lors des réunions de travail du comité.

7. Bibliographie

- Ablain, M., Cazenave, A., Larnicol, G., Balmaseda, M., Cipollini, P., Faugère, Y., Fernandes, M. J., Henry, O., Johannessen, J. A., Knudsen, P., Andersen, O., Legeais, J., Meyssignac, B., Picot, N., Roca, M., Rudenko, S., Scharffenberg, M. G., Stammer, D., Timms, G., and Benveniste, J. (2015): Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993-2010) from the Climate Change Initiative project, *Ocean Sci.*, 11, 67-82, doi:10.5194/os-11-67-2015, 2015.
- Allard, J., Chaumillon, E., and Féliès, H. (2009): A synthesis of morphological evolutions and Holocene stratigraphy of a wave-dominated estuary: The Arcachon lagoon, SW France. *Continental Shelf Research*, 29(8), 957-969.
- Bard, E., Hamelin, B., Arnold, M., Montaggioni, L., Cabioch, G., Faure, G., and Rougerie, F. (1996): Deglacial sea-level record from tahiti corals and the timing of global meltwater discharge, *Nature*, 382(6588), 241–244.
- Brooks, S.M. and Spencer, T. (2012): Shoreline retreat and sediment release in response to accelerating sea level rise: measuring and modelling cliffline dynamics on the Suffolk Coast, UK. *Glob. Planet. Chang.*, 80–81.
- Bruun, P. (1962): Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal Waterways and Harbours Division*, 88, 117–130.
- Bulteau, T., Idier, D., Lambert, J., and Garcin, M. (2015): How historical information can improve estimation and prediction of extreme coastal water levels: application to the Xynthia event at la rochelle (France). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, 1135–1147.
- Cahoon, D. R. (2015): Estimating relative sea-level rise and submergence potential at a coastal wetland. *Estuaries and Coasts*, 38(3), 1077-1084.
- Cahoon, D. R., Hensel, P. F., Spencer, T., Reed, D. J., McKee, K. L. and Saintilan, N. (2006): Coastal wetland vulnerability to relative sea-level rise: wetland elevation trends and process controls. In *Wetlands and natural resource management* (pp. 271-292). Springer Berlin Heidelberg.
- Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Ferreira, S., Parisot, J.-P., Capo, S., et al. (2014): Equilibrium shoreline modelling of a high-energy meso-macrotidal multiple-barred beach. *Marine Geology*, 347, 85–94.
- Castelle, B., Marieu, V., Bujan, S., Splinter, K. D., Robinet, A., Sénéchal, N., et al. (2015): Impact of the winter 2013–2014 series of severe western europe storms on a double-barred sandy coast: Beach and dune erosion and megacusp embayments. *Geomorphology*, 238, 135–148.
- Cayocca, F., 2001. Long-term morphological modeling of a tidal inlet: the Arcachon Basin, France. *Coastal Engineering*, 42, 115–142. doi:10.1016/S0378-3839(00)00053-3.
- Cazenave, A., Dieng, H.-B., Meyssignac, B., von Schuckmann, K., Decharme B. and Berthier, E. (2014): The rate of sea-level rise, *Nature Climate Change*, 4(5), 358–361.

- Cazenave, A. and Le Cozannet, G. (2014): Sea level rise and its coastal impacts, *Earth's Future*, 2(2), 15–34, doi :10.1002/2013EF000188, ISSN 2328-4277.
- Cazenave, A., Berthier, E., Le Cozannet, G., Masson-Delmotte, V., Meyssignac, B. and Salas y Méliá, D. (2015) : Le niveau de la mer: variations passées, présentes et futures. *Rubrique: Océanographie*.
- Charles, E., Idier, D., Thiébot, J., Le Cozannet, G., Pedreros, R., Arduin, F. and Planton, S. (2012a): Present wave climate in the Bay of Biscay: spatiotemporal variability and trends from 1958 to 2001. *Journal of Climate*, 25(6), 2020-2039.
- Charles, E., Idier, D., Delecluse, P., Déqué, M. and Le Cozannet, G. (2012b): Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France. *Ocean Dynamics*, 62(6), 831-848.
- Charles, E., Idier, D., Delecluse, P., Deque, M., & Le Cozannet, G. (2012c): Impact du changement climatique sur les vagues et la dérive littorale le long du littoral aquitain. *La Houille Blanche*, 6, 26-33.
- Chu-Agor, M. L., Muñoz-Carpena, R., Kiker, G., Emanuelsson, A., & Linkov, I. (2011). Exploring vulnerability of coastal habitats to sea level rise through global sensitivity and uncertainty analyses. *Environmental Modelling & Software*, 26(5), 593-604.
- Church, J.A. and White, N.J. (2006): A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophysical Research Letters*, 33(1), doi :10.1029/2005gl024826, ISSN 0094-8276.
- Church, J.A. and White, N.J. (2011): Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century, *Surveys in Geophysics*, 32(4-5), 585-602, doi :10.1007/s10712-011-9119-1, ISSN 0169-3298.
- 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. et al. (2013): Sea-level rise by 2100, *Science*, 342(6165), 1445–1445.
- Chust, G., Borja, A., Liria, P., Galparsoro, I., Marcos, M., Caballero, A. and Castro, R. (2009): Human impacts overwhelm the effects of sea-level rise on Basque coastal habitats (N Spain) between 1954 and 2004. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 84(4), 453–462.
- Clavé, B. (2001): Évolution des paléo-environnements côtiers à l'Holocène: Exemple de l'Aquitaine Septentrionale. Thèse de doctorat. Université Bordeaux 1. 310 p.
- Dayon, G. (2015): Évolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies. Thèse de doctorat. Université de Toulouse Paul Sabatier, http://cerfacs.fr/wp-content/uploads/2016/02/GLOBEC-These_Dayon_20112015.pdf
- Féniès, H. (1984): Faciès, séquences et géométrie des dépôts de chenaux de marée du bassin d'Arcachon: une lagune mésotidale. Thèse de doctorat.
- Frederikse, T., Riva, R., Slobbe, C., Broerse, T. and Verlaan, M. (2016): Estimating decadal variability in sea level from tide gauge records: An application to the North Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(3), 1529-1545.
- Gattuso, J. P., Magnan, A., Bille, R., Cheung, W. W. L., Howes, E. L., Joos, F. and Hoegh-Guldberg, O. (2015): Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO2 emissions scenarios. *Science*, 349(6243).

Genna, A., Capdeville, J. P., Dubreuilh, J. and Mallet, C. (2005): Recent and present evolution of the French Basque Coast (analysis and prediction). *Comptes-rendus Géosciences*, 337(16), 1474-1483.

GIEC, WG1, Ch13, (2013): Church, J., P. Clark, A. Cazenave, J. Gregory, S. Jevrejeva, M. Merrifield, G. Milne, R. Nerem, P. Nunn, A. Payne, W. Pfeffer, D. Stammer et U. A.S. 2013a, *Sea Level Change*, Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1137–1216, doi :10.1017/CBO9781107415324.026. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter13_FINAL.pdf

GIEC, WG1, Ch5, (2013): Masson-Delmotte, V., M. Schulz, A. Abe-Ouchi, J. Beer, A. Ganopolski, J. Gonzalez Rouco, E. Jansen, K. Lambeck, J. Luterbacher, T. Naish, T. Osborn, B. Otto-Bliesner, T. Quinn, R. Ramesh, M. Rojas, X. Shao et A. Timmermann. 2013, *Information from Paleoclimate Archives.*, Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 383–464, doi :10.1017/CBO9781107415324.026.

GIEC, WG2, Ch5, (2014): Wong, P., I. Losada, J.-P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K. McInnes, Y. Saito et A. Sallenger. 2014, *Coastal systems and low-lying areas*, Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects, Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 361–409.

Golledge, N., Kowalewski, D., Naish, T., Levy, R., Fogwill, C. and Gasson, E. (2015): The multi-millennial antarctic commitment to future sea-level rise. *Nature*, 526, 421–425.

Grinsted, A., Moore, J. C. and Jevrejeva, S. (2010): Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Climate Dynamics*, 34(4), 461-472.

Hansen, J., Sato, M., Hearty, P., Ruedy, R., Kelley, M., Masson-Delmotte, V., et al. (2015): Ice melt, sea level rise and superstorms: evidence from paleoclimate data, climate modeling, and modern observations that 2 c global warming is highly dangerous. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 15, 20059–20179.

Hay C.C., Morrow E., Kopp R.E. and Mitrovica J.X. (2015): Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. *Nat. Clim. Change*, 517, 481–484.

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

Horton, B.P., Rahmstorf, S., Engelhart, S.E. and Kemp, A.C. (2014): Expert assessment of sea-level rise by ad 2100 and ad 2300. *Quaternary Science Reviews*, 84, 1–6.

Hunter, J.R., Church, J.A., White, N.J., Zhang, X., (2013): Toward a global regionally varying allowance for sea-level rise. *Ocean Engineering*, 71, 17-27.

Idier, D., Castelle, B., Charles, E. and Mallet, C. (2013): Longshore sediment hindcast: spatio-temporal variability along the SW Atlantic coast of France. In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (eds.), *Proceedings 12th International Coastal Symposium*

(Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 1785-1790, ISSN 0749-0208.

Jevrejeva, S., Grinsted, A. and Moore, J.C. (2014): Upper limit for sea level projections by 2100. *Environmental Research Letters*, 9, 104008.

Kemp, A.C., Horton, B.P., Donnelly, J.P., Mann, M.E., Vermeer, M. and Rahmstorf, S. (2011): Climate related sea-level variations over the past two millennia, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(27), 11017-11022, doi :10.1073/pnas.1015619108, ISSN 0027-8424.

Klingebiel et Legigan, (1992): Cadre géologique et structure du bassin de la Leyre ; *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, Bordeaux, 1992, n°51-52, p. 7-20, 6 fig.

Kopp, R.E., Horton, R.M., Little, C.M., Mitrovica, J.X., Oppenheimer, M., Rasmussen, D.J. et al. (2014): Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites, *Earth's Future*, 2, 383–406, doi:10.1002/2014EF000239.

Kopp, R.E., Kemp, A.C., Bittermann, K., Horton, B.P., Donnelly, J.P., Gehrels, W.R., ... and Rahmstorf, S. (2016): Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(11), E1434-E1441.

Laborie V., Hissel, F., Sergent, P. (2012): Évaluation des niveaux d'eau extrêmes du futur sur l'estuaire de la Gironde. Colloque SHF. Évènements extrêmes fluviaux et maritimes., Paris, 8 p.

Laborie, V., Hissel, F. and Sergent, P. (2014): Impact of climate change on Gironde estuary. *La Houille Blanche*, 6, 34-39.

Laborie, V., Sergent, P., Levy, F., Frau, R. and Weiss, J. (2015): The hydrodynamic sea-state and infrastructures platform developed by Saint-Venant Hydraulics Laboratory and Cerema : a special focus on the TELEMAC2D surge levels numerical models of the Atlantic Ocean, the Channel and North Sea; 22nd Telemac and Mascaret User Club, 2015.

Larson, M., Erikson, L. and Hanson, H. (2004): An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. *Coastal Engineering*, 51, 675–696.

Laugel, A., Menendez, M., Benoit, M., Mattarolo, G. and Méndez, F. (2014): Wave climate projections along the French coastline: dynamical versus statistical downscaling methods. *Ocean Modelling*, 84, 35-50.

Le Cozannet, G., Ait-Kaci, A., Colas, S., De Lacaze, X., Lecacheux, S., Mirgon, C. ... and Oliveros, C. (2013): Recent GIS based national assessments of climate change consequences in France: methods, results and lessons learnt. In *Journal of Coastal Research*, 65, 1421.

Le Cozannet, G., Garcin, M., Yates, M., Idier, D. and Meyssignac, B. (2014): Approaches to evaluate the recent impacts of sea-level rise on shoreline changes. *Earth-Science Reviews*, 138, 47-60.

Le Cozannet, G., Rohmer, J., Cazenave, A., Idier, D., Van de Wal, R., De Winter, R. et al. (2015a): Evaluating uncertainties of future marine flooding occurrence as sea-level rises. *Environmental Modelling & Software*, 73, 44–56.

- Le Cozannet, G., Raucoules, D., Wöppelmann, G., Garcin, M., Da Sylva, S., Meyssignac, B., ... and Lavigne, F. (2015b): Vertical ground motion and historical sea-level records in Dakar (Senegal). *Environmental Research Letters*, 10(8), 084016.
- Le Cozannet, G., Oliveros, C., Castelle, B., Garcin, M., Idier, D., Pedreros, R. and Rohmer, J. (2016a): Uncertainties of sandy shorelines evolution under the Bruun rule assumption, *Frontiers in Marine Science*, 122.
- Le Cozannet, G., Bulteau, T., Garcin, M., Garnier, C., Müller, H., Hoareau, A. and Mallet, C. (2016b): Detecting errors in coastal databases using Bayesian Networks. In: Vila-Concejo, A.; Bruce, E.; Kennedy, D.M., and McCarroll, R.J. (eds.), *Proceedings of the 14th International Coastal Symposium* (Sydney, Australia). *Journal of Coastal Research*, Special Issue, No. 75.
- Le Hir et al., (2014): Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires (projet C3E2), rapport final. 104p.
- Le Treut, H., Bernard, V., Cassou, C., Castège, I., Chaalali, A., Idier, D., ... and Ribes, A. (2013): Du climat global au climat régional. *Les Impacts Du Changement Climatique En Aquitaine*. Presses Universitaires de Bordeaux, 365p., Conseil régional Aquitaine.
- Lenôtre, N., Blanchin, R., Delfau, M. and Thierry, P. (1999): Carte des mouvements verticaux actuels de la France (comparaison de nivellements), BRGM. Poster présenté partiellement dans Lenôtre et al., 1999 : Lenôtre, N., Thierry, P., Blanchin, R., & Brochard, G. (1999). Current vertical movement demonstrated by comparative levelling in Brittany (northwestern France). *Tectonophysics*, 301(3), 333-344.
- Leorri, E., Cearreta, A. and Milne, G. (2012): Field observations and modelling of Holocene sea-level changes in the southern Bay of Biscay: implication for understanding current rates of relative sea-level change and vertical land motion along the Atlantic coast of SW Europe. *Quaternary Science Reviews*, 42, 59-73.
- Mallet C., Millescamps B., Hoareau A., avec la collaboration de Levasseur J. (2015): Estimation de l'évolution du trait de côte aux horizons 2020-2040-2100 de la Dune du Pilat au Banc du Pineau et de Capbreton à l'embouchure de l'Adour. Rapport final. BRGM/RP-64723-FR, 51 p., 30 fig., 6 tab., 4 ann.
- Marcos, M., Tsimplis, M.N. and Shaw, A.G. (2009): Sea level extremes in southern Europe. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C1).
- Marcos, M., Jordà, G., Gomis, D. and Pérez, B. (2011): Changes in storm surges in southern Europe from a regional model under climate change scenarios. *Global and Planetary Change*, 77(3), 116-128.
- Marcos, M., Chust, G., Jordà, G. and Caballero, A. (2012): Effect of sea level extremes on the western Basque coast during the 21st century. *Climate Research*, 51(3), 237.
- Marcos, M., Calafat, F.M., Berihuete, Á. and Dangendorf, S. (2015): Long-term variations in global sea level extremes. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120(12), 8115-8134.
- Martínez-Asensio, A., Marcos, M., Tsimplis, M.N., Jordà, G., Feng, X. and Gomis, D. (2016): On the ability of statistical wind-wave models to capture the variability and long-term trends of the North Atlantic winter wave climate. *Ocean Modelling*, 103, 177-189.

- Menéndez, M. and Woodworth, P.L. (2010): Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C10).
- Meyssignac, B. and Cazenave, A. (2012): Sea level : A review of present-day and recent-past changes and variability, *Journal of Geodynamics*, 58, 96–109, ISSN 0264-3707.
- Mitrovica, J.X. and Milne, G.A. (2002): On the origin of late Holocene sea-level highstands within equatorial ocean basins. *Quaternary Science Reviews*, 21(20), 2179-2190.
- Mitrovica, J.X., Hay, C.C., Morrow, E., Kopp, R.E., Dumberry, M. and Stanley, S. (2015): Reconciling past changes in Earth's rotation with 20th century global sea-level rise: Resolving Munk's enigma. *Science Advances*, 1(11), e1500679.
- Monbaliu, J., Chen, Z., Felts, D., Ge, J., Hissel, F., Kappenberg, J. and Sothmann, J. (2014): Risk assessment of estuaries under climate change: lessons from Western Europe. *Coastal Engineering*, 87, 32-49.
- Morris, J.T., Sundareshwar, P.V., Nietch, C.T., Kjerfve, B. and Cahoon, D.R. (2002): Responses of coastal wetlands to rising sea level. *Ecology*, 83(10), 2869-2877.
- Mugica J., Pedreros R., Paris F., Garcin M. avec la collaboration de Oliveros C. (2014): Caractérisation de l'aléa submersion marine dans le cadre des PPRL du Bassin d'Arcachon (Gironde). Approche « statique » à titre informatif pour la cartographie des aléas « actuel » et « 2100 » sans ouvrage. Rapport final. BRGM/RP-62187-FR, 70 p., 53 fig., 4 tab., 6 ann., 1 CD.
- Nicholls, R.J. and Lowe, J.A. (2004): Benefits of mitigation of climate change for coastal areas. *Global environmental change*, 14(3), 229–244.
- Nicholls, R.J., Hanson, S.E., Lowe, J.A., Warrick, R.A., Lu, X. and Long, A.J. (2014): Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(1), 129-150.
- Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S. and Vautard, R. (2014): Le climat de la France au XXIème siècle. *Rapport de la Direction Générale de l'Énergie et du Climat*.
- Pardaens, A., Lowe, J.A., Brown, S., Nicholls, R.J. and De Gusmao, D. (2011): Sea level rise and impacts projections under a future scenario with large greenhouse gas emission reductions. *Geophysical Research Letters*, 38(12).
- Pedreros, R., Nicolae Lerma, A., Lecacheux, S. et Paris, F. (2014): Projet Setup-Port : Développement d'une méthode d'estimation de la surcote liée aux vagues enregistrée par les marégraphes. Rapport final. BRGM/RP- 64924-FR, 44 p., 24 fig., 3 tabl.
- Peltier, W.R. (2004): Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 32, 111-149.
- Perez, J., Menéndez, M., Camus, P., Méndez, F.J. and Losada, I.J. (2015): Statistical multi-model climate projections of surface ocean waves in Europe. *Ocean Modelling*, 96, 161-170.
- Planton, S., Le Cozannet, G., Cazenave, A., Costa, S., Douez, O., Gauffrès, P., Hissel, F., Idier, D., Laborie, V., Petit, V. et Sergent, P. (2015) - Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises. Rapports DGEC, Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Mars 2015. <http://www.developpement->

durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Climat_France_XXI_Volume_5_VF_revisee_27fevrier2015.pdf

Rahmstorf, S. (2007): A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315(5810), 368-370.

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

Rignot, E., Velicogna, I., Van den Broeke, M., Monaghan, A. and Lenaerts, J. (2011): Acceleration of the contribution of the greenland and antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophysical Research Letters*, 38(5).

Ritz, C., Edwards, T.L., Durand, G., Payne, A.J., Peyaud, V. and Hindmarsh, R.C.A. (2015): Potential sea-level rise from antarctic ice-sheet instability constrained by observations. *Nature* 528(7580), 115. doi:doi:10.1038/nature16147

Sénéchal, N., Abadie, S., Gallagher, E., MacMahan, J., Masselink, G., Michallet, H., ... and Turner, I. (2011): The ECORS-Truc Vert'08 nearshore field experiment: presentation of a three-dimensional morphologic system in a macro-tidal environment during consecutive extreme storm conditions. *Ocean Dynamics*, 61(12), 2073-2098.

Sergent, P. (2012): Stratégies d'adaptation des ouvrages de protection marine ou des modes d'occupation du littoral vis-à-vis de la montée du niveau des mers et des océans. Rapport GICC N°G.90006812 –SAO POLO, 119 p.

Slangen, A., Carson, M., Katsman, C., van de Wal, R., Köhl, A., Vermeersen L. and Stammer, D. (2014): Projecting twenty-first century regional sea-level changes, *Climatic Change*, 124(1-2), 317-332, doi :10.1007/s10584-014-1080-9.

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

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

Tamisiea, M.E. (2011): Ongoing glacial isostatic contributions to observations of sea level change, *Geophysical Journal International*, 186(3), 1036-1044, doi :10.1111/j.1365-246X.2011.05116.x, ISSN 0956-540X.

Vinchon, C., Aubié, S., Balouin, Y., Closset, L., Garcin, M., Idier, D. and Mallet, C. (2009): Anticipate response of climate change on coastal risks at regional scale in Aquitaine and Languedoc Roussillon (France). *Ocean & Coastal Management*, 52(1), 47-56.

Visser, H., Dangendorf, S. and Petersen, A.C. (2015): A review of trend models applied to sea level data with reference to the “acceleration-deceleration debate”. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, , 120(6), 3873-3895.

Von Schuckmann, K., Palmer, M., Trenberth, K., Cazenave, A., Chambers, D., Champollion, N. et al. (2016): An imperative to monitor earth's energy imbalance. *Nature Climate Change*, 6, 138–144.

Watson, C.S., White, N.J., Church, J.A., King, M.A., Burgette, R.J. and Legresy, B. (2015): Unabated global mean sea-level rise over the satellite altimeter era, *Nature Climate Change*, 5(6), 565-568.

Webb, E.L., Friess, D.A., Krauss, K.W., Cahoon, D.R., Guntenspergen, G.R. and Phelps, J. (2013): A global standard for monitoring coastal wetland vulnerability to accelerated sea-level rise. *Nature Climate Change*, 3(5), 458-465.

Woodworth, P.L. (2010). A survey of recent changes in the main components of the ocean tide. *Continental Shelf Research*, 30(15), 1680-1691.

Woodworth, P.L., Menéndez, M. and Gehrels, W.R. (2011): Evidence for century-timescale acceleration in mean sea levels and for recent changes in extreme sea levels. *Surveys in Geophysics*, 32(4-5), 603-618.

Woodworth, P.L. and Menéndez, M. (2015): Changes in the mesoscale variability and in extreme sea levels over two decades as observed by satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(1), 64-77.

Wöppelmann, G., Letetrel, C., Santamaria, A., Bouin, M.N., Collilieux, X., Altamimi, Z., ... and Miguez, B.M. (2009): Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame. *Geophysical Research Letters*, 36(12).

Wöppelmann, G., Le Cozannet, G., Michele, M., Raucoules, D., Cazenave, A., Garcin, M., ... and Santamaría-Gómez, A. (2013): Is land subsidence increasing the exposure to sea level rise in Alexandria, Egypt?. *Geophysical Research Letters*, 40(12), 2953-2957.

Wöppelmann, G. and Marcos, M. (2016): Vertical ground motions as a key to understanding sea-level change and variability, *Review of Geophysics*, 54(1), 64-92.

Références projets :

Projet EuroSION, 2004 : www.euroSION.org

Projet Explore 2070, 2013 :

- Volet socio-économique : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Milieux-cotiers.html>
- Volet côtier : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Prospective-socio-economique-et.html>

Projet Adapteau : <http://www.adapteau.fr/>



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 - Orléans Cedex 2 - France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Nouvelle-Aquitaine
Parc Technologique Europarc
24 avenue Léonard de Vinci
33600 - Pessac - France
Tél. : 05 57 26 52 70