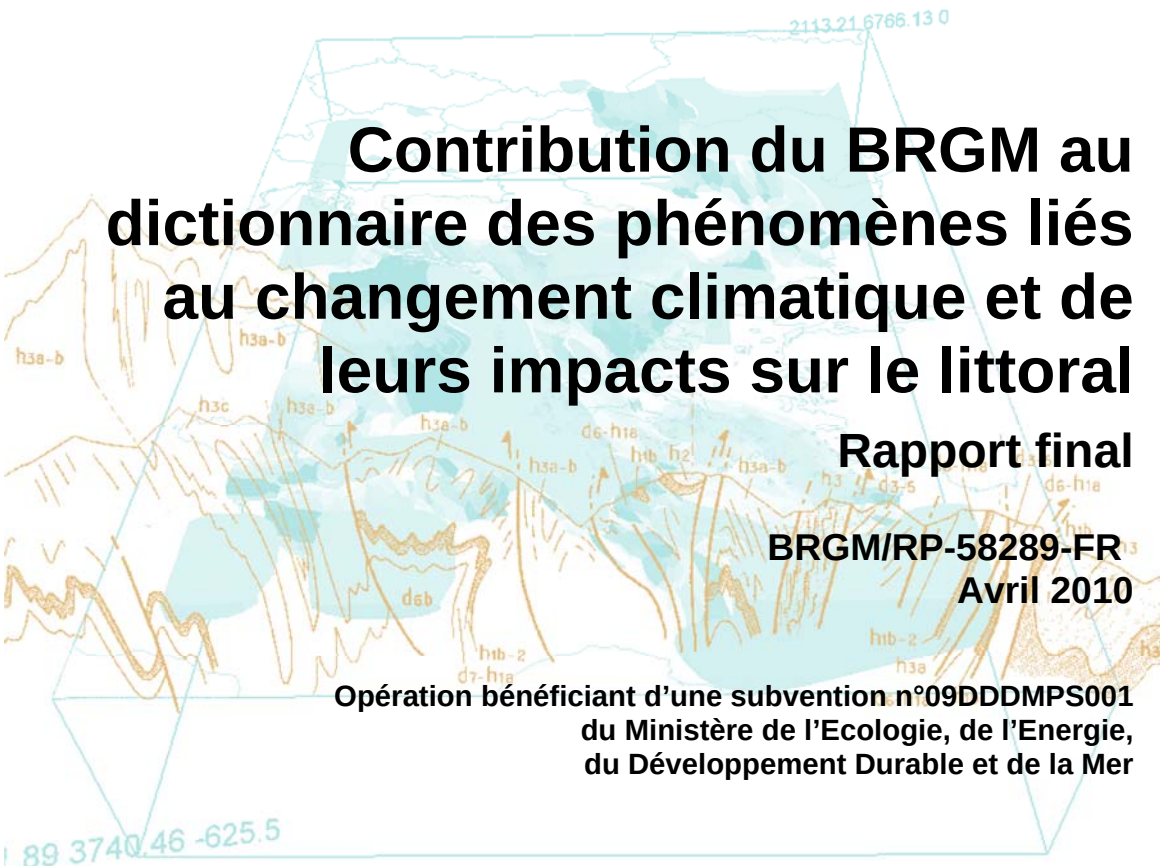




Contribution du BRGM au dictionnaire des phénomènes liés au changement climatique et de leurs impacts sur le littoral

Rapport final

BRGM/RP-58289-FR

Avril 2010

Opération bénéficiant d'une subvention n°09DDDMPS001
du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie,
du Développement Durable et de la Mer



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Contribution du BRGM au dictionnaire des phénomènes liés au changement climatique et de leurs impacts sur le littoral

Rapport final

BRGM/RP-58289-FR
Avril 2010

Opération bénéficiant d'une subvention n°09DDDMPS001
du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie,
du Développement Durable et de la Mer

N. Lenôtre, G. Le Cozannet, N. Dörfliger

Vérificateur :

Nom : Déborah Idier

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : Hormoz Modaressi

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Littoral, changement climatique, élévation du niveau marin, érosion, submersion, intrusions salines dans les aquifères côtiers.

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

Lenôtre, N. ; Le Cozannet G.; Dörfliger, N. ; 2010 ; Contribution du BRGM au dictionnaire des phénomènes liés au changement climatique et de leurs impacts sur le littoral ; BRGM/RP - 58289 –FR ; 44 p., 7 fig. ; 2 Tabl.

Synthèse

Le Commissariat Général du Développement Durable (CGDD) du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM) (ex-DRAST) a souhaité engager des travaux de prospective sur les effets sur les milieux, les espaces et les activités terrestres et maritimes, d'une remontée du niveau marin et des perturbations climatiques qu'il serait nécessaire d'associer, ceci à des horizons de temps à déterminer.

Ce travail s'inscrit dans une démarche plus générale qui consiste à faire un état des lieux des bases scientifiques nécessaires pour pouvoir engager des travaux de prospective sur les effets de la remontée du niveau marin sur le littoral. Un recueil de fiches thématiques (« dictionnaire des phénomènes liés au changement climatique et de leur impact sur le littoral »), en cours d'élaboration par le MEEDDM, appuyé par le Bureau d'Etudes STRATYS, concrétisera cet état des lieux. Ce recueil prend la forme d'une série de fiches précédées d'une introduction commune mettant en évidence leur cohérence.

L'objectif de ce rapport est de contribuer à ce recueil en réalisant les fiches correspondant aux compétences du BRGM, constituant un état des connaissances sur chaque sujet considéré.

Le BRGM a rédigé les fiches suivantes :

- Elévation du niveau de la mer (Chapitre 2)
- Submersion (Chapitre 3)
- Erosion et accrétion (Chapitre 4)
- Accentuation de la salinisation des eaux souterraines littorales (Chapitre 5)

D'autre part, le BRGM a participé à la rédaction d'une fiche sur les vagues (chapitre 6).

Ce rapport constitue la contribution du BRGM au « dictionnaire des phénomènes liés au changement climatique et de leur impact sur le littoral ».

A l'issue de cette étude, les fiches rédigées par le BRGM ont été adaptées puis intégrées dans le « dictionnaire des phénomènes liés au changement climatique et de leurs impacts sur le littoral » par la société STRATYS.

Ce travail bibliographique met en évidence des besoins en recherche sur les impacts du changement climatique sur les milieux physiques, mais aussi sur les mesures d'adaptation pertinentes face à des changements incertains. D'autre part, le besoin en acquisition de données et d'observations sur le long terme est rappelé.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. OBJECTIF DE LA PRESENTE ETUDE.....	9
1.3. DESCRIPTION DE L'ETUDE ET STRUCTURE DU RAPPORT	10
2. Fiche n°9 : élévation du niveau marin	11
2.1. CE QUE L'ON CONSTATE ACTUELLEMENT.....	11
2.1.1. Observations	11
2.1.2. Comment l'élévation du niveau marin est-elle mesurée ?.....	11
2.1.3. Causes de l'élévation séculaire du niveau marin moyen.....	12
2.1.4. Variabilité régionale de l'élévation séculaire du niveau marin	13
2.1.5. L'élévation du niveau marin à l'échelle des temps géologiques.....	14
2.1.6. Quelles sont les conséquences de l'élévation du niveau marin actuelle ?	14
2.2. CE QU'IL POURRAIT SE PASSER.....	14
2.2.1. Introduction.....	14
2.2.2. Ce que prédisent les modèles climatiques	15
2.2.3. Ce que prédisent les modèles semi-empiriques.....	16
2.2.4. Résumé	16
2.3. BIBLIOGRAPHIE CONCERNANT L'ELEVATION DU NIVEAU MARIN.....	17
3. Fiche n°11: Erosion - accrétion	19
3.1. CE QUE L'ON CONSTATE ACTUELLEMENT.....	19
3.1.1. Les mouvements du trait de côte	19
3.1.2. La problématique de l'érosion et de l'accrétion dans le monde, en Europe et en France	19
3.1.3. Quelles sont les causes de l'érosion et de l'accrétion?	20
3.1.4. Plages sableuses ou à galets.....	21
3.1.5. Marais côtiers	22
3.1.6. Côtes rocheuses.....	22
3.1.7. Vulnérabilité des zones côtières à l'érosion	23
3.2. CE QU'IL POURRAIT SE PASSER.....	24

3.2.1. Les impacts du changement climatique	24
3.2.2. Situation des plages.....	24
3.2.3. Situations des côtes rocheuses	24
3.2.4. Situations des marais côtiers	25
3.2.5. Ouvrages de défense.....	26
3.3. CHANGEMENT GLOBAL ET EROSION	26
3.4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	26
4. Fiche n°10 : Submersion	28
4.1. CE QUE L'ON CONSTATE ACTUELLEMENT	28
4.1.1. Définition	28
4.1.2. La problématique de submersion marine.....	28
4.1.3. Causes	29
4.1.4. Vulnérabilité des zones côtières à la submersion	30
4.1.5. Limitations des connaissances	30
4.2. CE QU'IL POURRAIT SE PASSER	30
4.2.1. Les impacts du changement climatique sur la submersion.....	31
4.2.2. Territoires poldérisés ou protégées par des digues	31
4.2.3. Zones basses non protégées par des digues	32
4.2.4. Marais	32
4.2.5. Baies et golfes.....	32
4.2.6. Estuaires	32
4.2.7. En France.....	32
4.3. CHANGEMENT GLOBAL ET SUBMERSIONS	33
4.4. BIBLIOGRAPHIE POUR LA SUBMERSION.....	33
5. Fiche n° 13 : accentuation de la salinisation des eaux souterraines littorales 35	
5.1. CE QUE L'ON CONSTATE ACTUELLEMENT	35
5.2. CE QU'IL POURRAIT SE PASSER	38
5.3. LIMITE DES CONNAISSANCES	39
5.4. BIBLIOGRAPHIE.....	40
6. Contribution à la fiche impact du changement climatique sur les vagues 41	
6.1. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES VAGUES.....	41

6.2. BIBLIOGRAPHIE	42
6.2.1. Vagues et changement climatique	42
7. Conclusion	44

Liste des illustrations

Figure 1 : Reconstructions du niveau moyen de la mer ; Figure extraite de Cazenave et al. (2008) ; En rouge : données de Church and White (2006) ; en bleu : données de Jevrejeva et al. (2006); en vert, données de Holgate et al. (2006).....	11
Figure 2: Projections pour le niveau moyen de la mer pour le 21ème siècle et les contributions de chacun des phénomènes modélisés en m, pour 6 scénarios climatiques. Il s'agit d'une estimation de l'élévation attendue en moyenne entre les moyennes des périodes 1980 à 1999 d'une part, 2090 à 2099 d'autre part. Les barres grisées représentent les incertitudes (5% et 95%) liées à la modélisation climatique. Source : Meehl et al. 2007	15
Figure 3 : Principaux paramètres entrant en compte dans l'évaluation des niveaux marins extrêmes (Cariolet et Suanez, 2008)	30
Figure 4 : Position de l'interface selon Ghyben Herzberg (Frissant et al. 2005)	35
Figure 5: amplification de l'intrusion saline des aquifères côtiers par influence anthropique (Aunay 2007).....	36
Figure 6: coupe perpendiculaire dans un aquifère insulaire (Frissant et al. 2005).....	36
Figure 7 : Variation de Hs (en cm entre 1990 et 2080) en Atlantique nord pour les 3 scénarios combinés en hiver. Les zones grisées indiquent les variations significatives. Source : Wang et Swail, 2006.....	42

Liste des tableaux

Tableau 1 : explication des causes de l'élévation séculaire du niveau marin moyen, en pourcentage du total expliqué. (Source : GIEC, 2007)	12
Tableau 2 : Tendances d'évolutions observées pour chacune des grandes classes morphosédimentologiques du littoral de France métropolitaine et de Corse	20

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Le Commissariat Général du Développement Durable (CGDD) du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM) (ex-DRAST) a souhaité engager des travaux de prospective sur les effets sur les milieux, les espaces et les activités terrestres et maritimes, d'une remontée du niveau marin et des perturbations climatiques qu'il serait nécessaire d'associer, ceci à des horizons de temps à déterminer.

Pour cela, un groupe de travail associant Météo-France, l'IFREMER¹, le BRGM, le CETMEF², l'IDDRI³ et le MEEDDM/CGDD a été constitué en 2008 afin de faire un état des lieux des bases scientifiques utiles et afin de mettre en évidence des domaines à explorer ainsi que les méthodes les plus appropriées pour cette réflexion prospective. Le CGDD/DDD s'est par ailleurs entouré des services du cabinet d'Etudes STRATYS.

Ce rapport résume la contribution du BRGM à ce groupe de travail.

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la subvention de recherche n°09DDMPS001 du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM), et du projet de service public du BRGM PSP09ARN94 – 09LITZ01.

1.2. OBJECTIF DE LA PRESENTE ETUDE

Cette étude a pour objectif la réalisation de fiches prospectives sur les effets du changement climatique et de l'élévation du niveau marin sur le littoral. La structure des fiches a été définie par le groupe de travail.

Ce travail s'inscrit dans une démarche plus générale qui consiste à faire un état des lieux des bases scientifiques nécessaires pour pouvoir engager des travaux de prospective sur les effets de la remontée du niveau marin sur le littoral. Un recueil de fiches thématiques (« dictionnaire des phénomènes liés au changement climatique et de leur impact sur le littoral »), en cours d'élaboration par le MEEDDM à la date de publication de ce rapport, concrétisera cet état des lieux.

¹ Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

² Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales

³ Institut du Développement durable et des relations internationales

L'objectif est de contribuer à ce recueil en réalisant les fiches correspondant aux compétences du BRGM.

1.3. DESCRIPTION DE L'ETUDE ET STRUCTURE DU RAPPORT

Le BRGM a rédigé les fiches suivantes du « dictionnaire des phénomènes liés au changement climatique et de leur impact sur le littoral » :

- Fiche n°9 : Elévation du niveau de la mer (Chapitre 2)
- Fiche n°10 : Submersion (Chapitre 3)
- Fiche n°11 : Erosion et accrétion (Chapitre 4)
- Fiche n°13 : Accentuation de la salinisation des eaux souterraines littorales (Chapitre 5)

D'autre part, le BRGM a participé à la rédaction de la Fiche n°8 sur les vagues (chapitre 6).

La fiche n°3 initialement prévue pour couvrir la question des régimes des fleuves et des apports sédimentaires n'a finalement pas été intégrée au rapport. Aussi, sa rédaction a été annulée. Enfin, le BRGM a approuvé la fiche rédigée par Météo-France : « modification des régimes extrêmes : tempêtes, cyclones », la question des impacts par submersion marine ayant été traitée dans la fiche dédiée à la submersion par décision du groupe de travail.

Les fiches n°9, 10, 11 et 13 sont intégrées dans ce rapport. Pour chaque fiche, les éléments bibliographiques qui lui sont propres sont référencés à la fin de chaque chapitre, afin de faciliter leur intégration dans le dictionnaire. La contribution à la fiche n°8 est également présentée.

Ce travail bibliographique met en évidence des besoins en recherche sur les impacts du changement climatique sur les milieux physiques, mais aussi sur les mesures d'adaptation pertinentes face à des changements incertains. D'autre part, le besoin en acquisition de données et d'observations sur le long terme est rappelé.

2. Fiche n°9 : élévation du niveau marin

2.1. CE QUE L'ON CONSTATE ACTUELLEMENT

2.1.1. Observations

Entre 1870 et 2004, le niveau marin moyen global se serait élevé de **1.7 mm/an (+/-0.3 mm/an)**. Cette tendance n'est pas linéaire (Figure 1). Au contraire, des accélérations sont observées, en particulier entre 1993 et 2005 où le niveau de la mer moyen s'est élevé de 3,3 mm/an (Cazenave and Nerem, 2004). Entre 2005 et 2008, l'élévation du niveau marin moyen s'est considérablement ralentie.

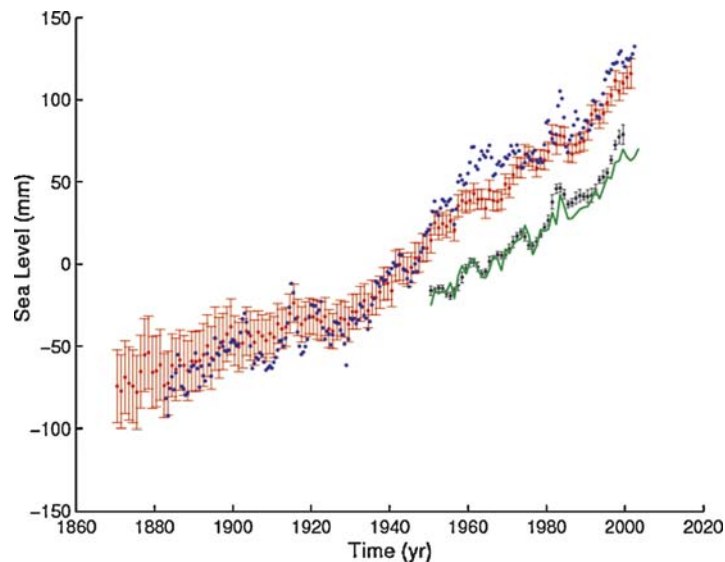


Figure 1 : Reconstructions du niveau moyen de la mer ; Figure extraite de Cazenave et al. (2008) ; En rouge : données de Church and White (2006) ; en bleu : données de Jevrejeva et al. (2006); en vert, données de Holgate et al. (2006)

2.1.2. Comment l'élévation du niveau marin est-elle mesurée ?

L'élévation relative du niveau de la mer est mesurée depuis la fin du XIX^{ème} siècle par des marégraphes (par exemple depuis 1845 à Brest). Depuis 1993, des données d'altimétrie satellitaire sont utilisées. Tandis que les satellites mesurent une élévation par rapport à un ellipsoïde de référence, les marégraphes mesurent un niveau marin relativement au socle sur lequel ils sont positionnés. Etant rattachés à la terre, ils peuvent être soumis à des mouvements verticaux d'une ampleur comparable à celle

du signal de l'élévation du niveau marin. Ces mouvements peuvent être liés à des phénomènes locaux tels que des pompages d'eau ou d'hydrocarbures ou bien à des phénomènes de plus grande emprise, par exemple d'origine tectonique. Ces phénomènes sont difficiles à prendre en compte lors des réanalyses car souvent peu connus. Ainsi, on peut noter qu'en prenant en compte ces phénomènes, Wöppelmann et al. (2007) trouvent une élévation du niveau marin moyen global de **1,3 mm/an** en moyenne au XXème siècle. Cette estimation permettrait de résoudre l'énigme posée par la différence entre l'élévation expliquée et l'élévation observée (voir Tableau 1), mais le Groupe d'experts Intergouvernemental pour l'Evolution du Climat (GIEC), dans son rapport de 2007 (Meehl et al. 2007), a retenu les estimations du paragraphe précédent, soit +1,7 mm/an entre 1870 et 2004.

2.1.3. Causes de l'élévation séculaire du niveau marin moyen

L'élévation du niveau marin moyen observée s'explique par :

1. une dilatation thermique des océans liée à leur réchauffement
2. des échanges de masses entre les différents lieux de stockage d'eau : glaciers, calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, eaux continentales. On peut noter que la fonte de la banquise ne participe pas directement à l'élévation du niveau marin moyen.

La contribution la plus significative est celle liée à la fonte des glaciers de montagne, suivie de près par l'expansion thermique des océans (Tableau 1).

Cause de l'élévation séculaire du niveau marin moyen	1961-2003	1993-2003
Expansion thermique	25%	30%
Fonte des glaciers et des couvertures glacées	45%	28%
Fonte de la calotte du Groenland	5%	8%
Fonte de la calotte arctique	13%	8%
Total expliqué	1,1 mm/an	2,8 mm/an
Total observé	1,8 mm/an	3,1 mm/an

Tableau 1 : explication des causes de l'élévation séculaire du niveau marin moyen, en pourcentage du total expliqué. (Source : GIEC, 2007)

Entre 2003 et 2008, en dépit du ralentissement de l'élévation du niveau marin moyen observée, la composante « fonte des calottes polaires » aurait augmenté de 80%. (Rignot et al., 2008 ; Cazenave et al., 2009)

2.1.4. Variabilité régionale de l'élévation séculaire du niveau marin

L'élévation séculaire du niveau marin n'est pas uniforme : les mesures réalisées entre 1996 et 2006 par satellite mettent en évidence une variabilité spatiale et temporelle. Ainsi, dans certaines zones du pacifique ouest, la hausse du niveau marin a été 5 fois supérieure à la moyenne globale sur la période 1993-2007, alors que dans le pacifique est, le niveau a baissé. La variabilité régionale est liée principalement aux variations de température et, plus localement, de salinité de l'océan (Lombard et al., 2008). Ces variations de température de la surface de l'océan sont elles-mêmes corrélées à des oscillations climatiques régionales (El Niño/La Niña, Oscillation Atlantique Nord, etc.), qui sont des anomalies persistantes à grande échelle des champs de pression.

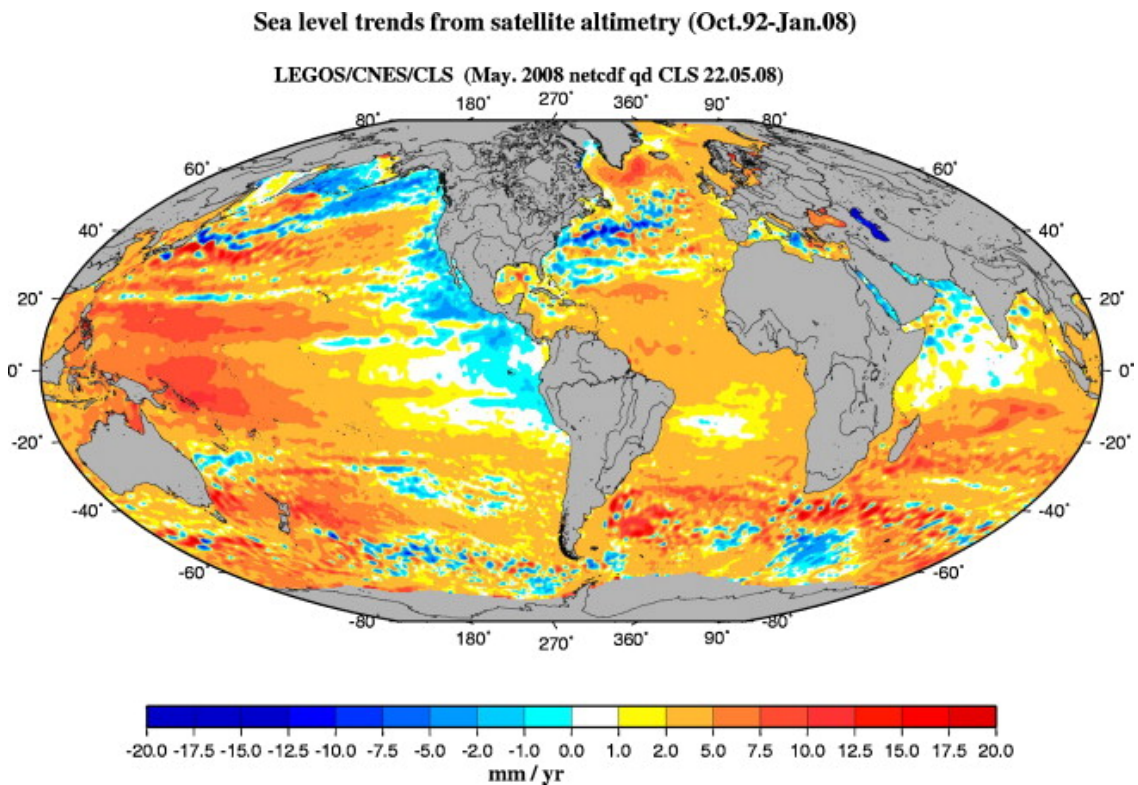


Figure 6.2 : Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (Octobre 1992- janvier 2008) d'après Topex/Poseidon et Jason-1 ; Source : LEGOS/GOHS ; Cazenave et al. (2008)

2.1.5. L'élévation du niveau marin à l'échelle des temps géologiques

A des échelles de temps de l'ordre de plusieurs millions d'années, la position des continents a une forte influence sur le climat. Ainsi, au cours du Tertiaire, la coïncidence d'un continent (l'Antarctique) en position polaire a permis la constitution de la calotte glaciaire antarctique, induisant une réduction du niveau marin global. A des échelles de temps de l'ordre de dizaine de milliers d'années, ce sont les cycles glaciaires-interglaciaires et donc les cycles de Milankovitch, liés à l'excentricité de l'orbite terrestre, obliquité et précession de l'axe de rotation, qui gouvernent indirectement la hauteur des océans. Le quaternaire compte ainsi 17 cycles glaciaires-interglaciaires au cours desquels des calottes glaciaires se forment sur les continents (période de régression marine) puis fondent (période de transgression) (Jansen et al. 2007). Lors du dernier maximum glaciaire il y a 18 000 ans le niveau de la mer était 120 m plus bas que le niveau actuel.

2.1.6. Quelles sont les conséquences de l'élévation du niveau marin actuelle ?

Très peu d'études présentent des sites pour lesquels l'élévation du niveau marin d'origine climatique constatée actuellement est la cause principale de recul du trait de côte ou d'aggravation des aléas d'érosion ou de submersion (voir fiches n°10 et 11). Sur quelques sites mentionnés par Nicholls et al. (2007), l'érosion ou la submersion constatée au cours du XXème siècle a été, au moins partiellement, attribuée à l'élévation séculaire du niveau marin relatif, c'est-à-dire l'élévation résultant à la fois de la composante climatique du niveau marin et de sa composante géologique (subsides ou surrections de diverses échelles spatiales). Ce n'est pas un cas général. Au contraire, dans l'exemple du golfe du Mexique, Morton et al. (2007) montrent que l'accélération de l'érosion des îles Dernières peut être reliée statistiquement à une réduction des stocks sableux disponibles, mais pas de manière claire à l'élévation du niveau marin ou à la variabilité des régimes de tempêtes et de cyclones.

2.2. CE QU'IL POURRAIT SE PASSER

2.2.1. Introduction

L'élévation du niveau marin se poursuivra très probablement au cours du XXIème siècle et après. En revanche, la question de savoir quelle sera l'amplitude de cette élévation, est une question scientifique qui n'est pas tranchée.

Même si les températures se stabilisaient aujourd'hui, le niveau marin moyen continuerait d'augmenter en raison de la très forte inertie des phénomènes en jeu. Ainsi, la dilatation thermique des océans se poursuivra très probablement, mais c'est surtout le devenir des calottes polaires Antarctique et du Groenland qui cause les incertitudes les plus grandes. En effet, les masses d'eau qui y sont stockées sous forme de glace représentent l'équivalent de 70 et 7 m d'élévation du niveau marin

respectivement. Si la fonte totale de l'Antarctique n'est pas envisagée, sa partie la plus vulnérable au changement climatique est celle qui se situe dans le prolongement de la péninsule Antarctique (appelée Bassin Antarctique occidental), qui représente l'équivalent de 5 m d'élévation du niveau marin. En réalité, la communauté scientifique ne publie pas aujourd'hui de travaux scientifiques qui laisseraient penser que ces calottes pourraient fondre totalement. En revanche, elle se demande si les pertes aux marges des calottes continentales pourront ou non être compensées par davantage de précipitations sur la calotte.

2.2.2. Ce que prédisent les modèles climatiques

Pour estimer l'élévation du niveau marin, la modélisation du climat cherche à représenter les processus physiques de fonte des calottes polaires et d'accumulation de glace, quitte à paramétrer certains phénomènes. Ces modélisations indiquent que le changement climatique s'accompagnerait de davantage de précipitations sur l'Antarctique (Krinner, 2007). On peut d'ailleurs noter qu'entre 1993 et 2003, la calotte Antarctique a moins fondu qu'entre 1961 et 2003, ce qui est une manifestation de la forte variabilité décennale de ces phénomènes de fonte (Tableau 2). **Ces modélisations conduisent le GIEC (2007) à prédire une élévation modérée du niveau de la mer en 2100, allant de 18 à 59 cm selon les scénarios** (Meehl et al., 2007, voir Figure 2). Il faut cependant noter le traitement très approximatif de la fonte des calottes dans ces modèles, dont aucun ne prenait en compte une accélération des processus de fonte liée à la dynamique des calottes.

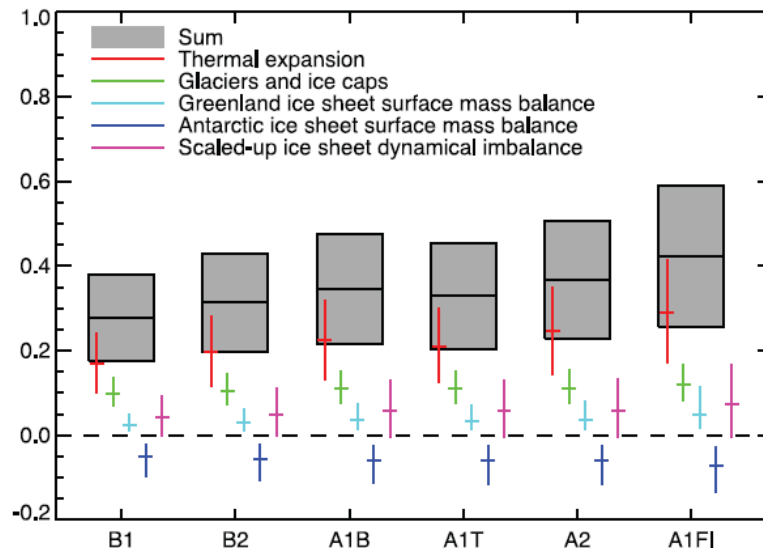


Figure 2: Projections du niveau moyen de la mer pour le 21ème siècle et les contributions de chacun des phénomènes modélisés en m, pour 6 scénarios climatiques. Il s'agit d'une estimation de l'élévation attendue en moyenne entre les moyennes des périodes 1980 à 1999 d'une part, 2090 à 2099 d'autre part. Les barres grisées représentent les incertitudes (5% et 95%) liées à la modélisation climatique. Source : Meehl et al. (2007).

Ces approches de modélisation du climat permettent de régionaliser l'élévation du niveau marin moyen liée aux effets thermiques. On peut noter que pour ce qui concerne les côtes Françaises métropolitaines, l'écart par rapport à la moyenne n'excéderait pas 10 cm en Atlantique (Meehl et al. 2007). En Méditerranée, les résultats de Tsimplis et al. (2009) indiquent qu'il pourrait ne pas y avoir de hausse du niveau marin par dilatation thermique sur les côtes françaises méditerranéennes, compte tenu des effets renforcés d'évaporation. Ce résultat repose sur une seule modélisation et appelle donc d'autres études mais il est révélateur de la situation particulière de la Méditerranée.

2.2.3. Ce que prédisent les modèles semi-empiriques

Cependant, la communauté des glaciologues observateurs constate une accélération des pertes de masses d'eau des calottes Antarctique et du Groenland sur les 15 dernières années (Rignot et al., 2008; Alley et al., 2007). Pour eux, des processus dits « abrupts » (c'est-à-dire plus rapides que ceux qui les ont enclenchés) sont en jeu. Il peut s'agir par exemple de glissements accélérés des glaciers sur leurs moraines, de la fonte accélérée de calottes reposant sur un socle continental mais en contact avec l'océan qui se réchauffe ou bien de l'accélération de l'écoulement de glaciers continentaux suite à la débâcle d'une banquise en aval. Ces processus abrupts ne sont paramétrés dans les résultats du GIEC que par une estimation moyenne sur la dernière décennie du siècle dernier, ce qui n'est pas satisfaisant (Meehl et al. 2007).

Aussi, d'autres approches de modélisation ont vu le jour : il s'agit de représenter au moyen de quelques équations simples la réponse du niveau marin à un changement de température et de l'ajuster à des observations, par exemple aux reconstitutions du niveau marin de 1900 à aujourd'hui. En utilisant ces approches, Rahmstorf et al. (2007) et Grinsted et al. (2009) trouvent des élévations du niveau marin de 1 m et 1,2 m en 2100 respectivement. Hansen (2007), note que ces modèles semi-empiriques sont calibrés sur des périodes où les variations du niveau marin sont essentiellement dues à la dilatation thermique des océans alors que ce qui est pressenti pour le XXI^{ème} siècle est une élévation du niveau marin liée à une fonte des calottes polaires. Il estime donc ces valeurs sous-estimées et envisage 5m d'élévation du niveau marin moyen pour 2100.

2.2.4. Résumé

Ainsi, plusieurs estimations co-existent actuellement pour l'élévation du niveau marin. Les estimations basses (Meehl, 2007) vont de 0,18 à 0,59 m pour 2100. D'autres proposent une élévation du niveau marin moyen de l'ordre du mètre (Rahmstorf, 2007, Grinsted, 2009) ou au-delà (Hansen, 2007). Dans tous les cas, il convient de noter que l'on passe d'un mode dans lequel le niveau marin moyen a peu évolué depuis 5000 ans à un mode dans lequel le niveau marin variera de manière plus ou moins accélérée pendant plusieurs siècles. Cette remarque conduit à recommander de prendre en compte le fait que l'élévation du niveau marin se poursuivra très probablement après 2100.

2.3. BIBLIOGRAPHIE CONCERNANT L'ELEVATION DU NIVEAU MARIN

Alley R., Spencer M. And Anandakrishnan S. (2007) Ice sheet mass balance, assessment, attribution and prognosis. *Annals Glaciology*, 46, p. 1-7.

Cazenave A. and A. Lombard. (2008) Present-day sea level rise: a synthesis, *Geosciences C.R.*, Volume 340, Issue 11, Pages 761-770

Cazenave, A., and R. S. Nerem (2004) Present-day sea level change: Observations and causes, *Rev. Geophys.*, 42, RG3001, doi:10.1029/2003RG000139.

Cazenave A., K. Dominh, S. Guinehut, E. Berthier, W. Llovel G. Ramillien, M. Ablain and G. Larnicol (2008) Sea level budget over 2003-2008: a reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo, *Global and Planetary Change*, 2 doi:10.1016/j.gloplacha.2008.10.004, 2009.

Church, J. A., and N. J. White (2006), A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01602

S.J. Holgate and P.L. Woodworth (2004), Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s, *Geophys. Res. Lett.* 31, p. L07305.

Jansen, E., Overpeck J., Briffa K. R., Duplessy J.-C., Joos F., Masson-Delmotte V., Olago D., Otto-Bliesner B., Peltier W.R., Rahmstorf S., Ramesh R., Raynaud D., Rind D., Solomina O., Villalba R. And Zhang D., (2007) - Palaeoclimate. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

S. Jevrejeva, A. Grinsted, J.C. Moore and S. Holgate (2006) Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records, *J. Geophys. Res.*, p. C09012.

Krinner, G. and J. Julien (2007) High-resolution simulation of the surface mass balance of Greenland at the end of this century. *The Cryosphere Discuss.*, 1, 351-383.

Garcin, M., J. F. Desprats, M. Fontaine, R. Pedreros, N. Attanayake, S. Fernando, C. H. E. R. Siriwardana, U. De Silva, and B. Poisson (2008) Integrated approach for coastal hazards and risks in Sri Lanka, *Natural Hazards and Earth Systems science*. Vol: 8 Issue: 3 p. 577-586

Grinsted A., Moore Æ J. C., Jevrejeva Æ S. (2009) Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD, *Climate Dynamics*.

Hansen J. E. (2007) Scientific reticence and sea level rise, *Environmental research letter* 2.

Lenôtre N., Pedreros R. (2006) Impact du changement climatique sur le littoral, *revue Géosciences*

Lombard A., G. Garric, T. Penduff, J.M. Molines (2008) Regional variability of sea level change using a global ocean model at 1/4° resolution, in revision, *Ocean Dyn.*

Meehl G.A., Stocker T.F., Collins W.D., Friedlingstein P., Gaye A.T., Gregory J.M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J.M., Noda A., Raper S.C.B., Watterson I.G., Weaver A.J. And Zhao Z.-C. (2007) - Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Morton, R. 2007, Historical Changes in the Mississippi-Alabama Barrier Islands and the Roles of Extreme Storms, Sea Level, and Human Activities - USGS Open-File Report 2007-1161

Nicholls, R.J., Wong P.P., Burkett V.R., Codignotto J.O., Hay J.E., Mclean R.F., Ragoonaden S. And Woodroffe C.D. (2007) - Coastal systems and low-lying areas. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hansen, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356.

Rahmstorf S. A., 2007, Semi-empirical approach to projecting future sea-level rise; *Science*, Vol. 215, pp. 368-369.

Paskoff, 2001, L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers, *Institut océanographique*, ISBN 2-903581-27-4

Rignot E., et al., Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling, *Nature*, doi:10.1038/ngeo102, 2008.

Tsimplis, M., M. Marcos, S. Somot, 2008, 21st century Mediterranean sea level rise: Steric and atmospheric pressure contributions from a regional model, *Global and Planetary Change* Volume: 63 Issue: 2-3 Pages: 105-111

Wöppelmann G., B. Martin Miguez, M.N. Bouin and Z. Altamimi (2007) Geocentric sea level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges worldwide, *Global Planet. Change* 57, pp. 396–406.

3. **Fiche n°11: Erosion - accrétion**

3.1. CE QUE L'ON CONSTATE ACTUELLEMENT

3.1.1. Les mouvements du trait de côte

Le littoral est un système dynamique dont la morphologie évolue à différentes échelles temporelles et spatiales (Nicholls, 2007). Ainsi, le trait de côte ne doit pas être considéré comme statique : au contraire, il a beaucoup évolué au cours des temps historiques, en réponse à la disponibilité sédimentaire, à l'influence des tempêtes, des vagues, des courants, du niveau marin relatif sur certains sites mais aussi des activités anthropiques. Ces mouvements sont tout particulièrement importants dans les zones basses telles que les zones deltaïques, les plages de sable ou de galets, les marais côtiers et certaines falaises (meubles ou composées de roches tendres telles que la craie).

3.1.2. La problématique de l'érosion et de l'accrétion dans le monde, en Europe et en France

Dans ce contexte, l'érosion est définie comme un gain d'espace de la mer sur la terre et l'accrétion un gain de la terre sur la mer, s'observant sur des périodes suffisamment longues (Eurosion, 2004).

D'une manière générale, les côtes mondiales subissent actuellement des phénomènes érosifs. En particulier, les plages constituent environs 1/3 du trait de côte mondial et 70% de celles-ci seraient en érosion, contre 10% en accrétion seulement (Bird, 1985).

L'état des côtes de l'Union Européenne, étudié dans le cadre du projet Eurosion (Eurosion, 2004), montre que 20% des côtes sont en érosion pour toute l'Union Européenne, ce qui représente au total 15 km² de territoires littoraux perdus chaque année.

Pour la France (données sur la métropole et la Corse, c.f. Tableau 2) l'érosion touche plus de 27% des côtes. Elle se répartit différemment selon les milieux : 41,4% des plages, 23% des côtes rocheuses et 11,8% des littoraux vaseux. Il est à noter a contrario que près de la moitié des littoraux vaseux sont en engraissement ainsi que 10% des plages. La part du littoral naturel en recul est très variable sur le littoral métropolitain. Elle est faible (inférieure à 10%) en Corse et en Ile et Vilaine. Elle est par contre très forte (supérieure à 70%) dans le Pas de Calais, en Seine Maritime, dans le Calvados et dans le Gard.

Morpho-sédimentologie Tendance	Côtes rocheuses		Plages		Rivages limonovaseux	
	%	km	%	km	%	km
Engraissement	NS	34 km	10,4	232 km	48,6	119 km
Stabilité	64,4	1216 km	45,8	1022 km	35,1	86 km
Erosion	23	436 km	41,4	924 km	11,8	29 km
Pas de données	10,6	200 km	2,3	52 km	4,5	11 km
Total	100	1886 km	100	2230 km	100	245 km

Tableau 2 : Tendances d'évolutions observées pour chacune des grandes classes morpho-sédimentologiques du littoral de France métropolitaine et de Corse.

L'érosion induit trois types de risques :

- La perte de terrain
- La fragilisation par érosion des défenses côtières naturelles (ex. dunes) ou artificielles (ex. digues en terre) pouvant parfois entraîner une rupture
- La sape d'ouvrages de protection par affouillement

3.1.3. Quelles sont les causes de l'érosion et de l'accrétion?

Les facteurs ayant une influence sur les mouvements ou la stabilité du trait de côte :

- influence continentale : la structure géologique du littoral détermine sa susceptibilité à l'érosion. Par ailleurs les fleuves apportent des sédiments sur le littoral qui contribuent à l'alimentation des littoraux.
- influence marine : les facteurs hydrodynamiques que sont les variations de la position du niveau d'eau moyen de la mer, les surcotes, l'action de la marée et des vagues qui induisent des courants littoraux ; des zones peuvent être partiellement protégées de l'action des houles (fond de baies et de golfes).

- influence atmosphérique : le vent induisant du transport éolien, la pluie et les cycles gel/dégel qui peuvent accentuer l'érosion de la partie sommitale des falaises
- la végétation : marais, mangrove, végétation des dunes jouent un rôle dans les mouvements du trait de côte
- les activités humaines

L'élévation du niveau marin constatée au XX^{ième} siècle de l'ordre de 15 cm (voir fiche n°6 sur l'élévation du niveau marin) n'explique pas l'ampleur que prennent ces phénomènes érosifs ni à l'échelle mondiale, ni en France (voir fiche n°6 sur le niveau de la mer). Actuellement on se trouve dans une pénurie de sédiments sur le littoral. En effet les grands apports de sable sur le plateau continental et sur le littoral ont eu lieu lors de la dernière déglaciation et de la rapide remontée du niveau des mers (voir fiche correspondante). Les sédiments sont alors transportés par les fleuves alors en régime torrentiel, puis peuvent être mobilisés dans les mécanismes de transport sédimentaires marins, certains s'accumulant pour former des systèmes sableux. Depuis 1500 à 2000 ans le niveau marin a peu évolué (probablement sur une fourchette inférieure à 40 cm, voir fiche n°6 sur l'élévation du niveau marin), entraînant un apport de sédiments nettement plus faible.

Bien souvent ces systèmes naturels sont perturbés par l'activité humaine :

- la construction de ports, digues ou épis qui bloquent le transit sédimentaire provoquant une accumulation de sable (accrétion) en amont de l'ouvrage par rapports aux courants littoraux et une érosion en aval de celui-ci.
- la construction de barrages et d'aménagements le long de rivières, bénéfiques pour gérer les crues et les déficits hydriques, a cependant diminué les transports de sédiments dans les rivières entraînant ainsi un déficit d'apports à la côte.
- l'urbanisation de dunes bloque les transferts de sédiments entre dune et plage.
- l'extraction de sables/galets sur les plages ou en mer peut engendrer une érosion du littoral.

3.1.4. Plages sableuses ou à galets

Une forte crue aura pour conséquence des apports massifs de sédiments à la côte alors qu'une tempête en mer provoquera une érosion. Le vent peut représenter jusqu'à 30% du transport sur une plage comme en Aquitaine (Pedreros, 2000). Les plages ont une capacité de résilience naturelle : elles ont tendance à maigrir en période hivernale au rythme des tempêtes et se reconstruisent durant la période estivale.

Les tendances d'évolution ne sont pas constantes dans le temps et peuvent même parfois s'inverser. La côte aquitaine montre en moyenne un recul 1 à 3 m/an depuis

1825 avec une augmentation des zones en recul dans les 40 dernières années : 50% du linéaire côtier est en recul entre 1825 et 1996 contre 70% pour la période de 1966 à 1996 (données observatoire de la côte aquitaine ; www.littoral.aquitain.fr). Les tendances d'évolution sont également très variables dans l'espace : dans l'Hérault, la plage de l'Espiguette est en accrétion avec une avancée de la flèche sableuse de 2 à 3 m/an alors qu'à l'inverse à quelques kilomètres à l'ouest la plage subit une érosion de 1 à 3 m/an.

Dans le cadre de la gestion du trait de côte, il est important d'avoir une connaissance de son évolution sur plusieurs années voire plusieurs dizaines d'années ainsi que d'avoir une vision globale à des échelles spatiales pertinentes.

3.1.5. Marais côtiers

On peut noter que pour ce qui concerne les marais côtiers, la problématique n'est pas la même : la relative abondance de sédiments fins cause généralement des accrétions comme c'est le cas dans la baie du Mont Saint Michel (Paskoff, 2001).

3.1.6. Côtes rocheuses

L'érosion des côtes rocheuses se produit sous l'action conjointe de facteurs terrestres et marins.

Facteurs terrestres

Toutes les falaises s'érodent sous l'action de facteurs hydrométéorologiques tels que les précipitations, les cycles gel-dégel, ou sous l'action de processus hydrogéologiques et géomécaniques (ex. présence de nappes). La pluie peut ainsi s'infiltrer dans les fractures, modifiant le degré de saturation et les paramètres hydromécaniques de la roche. De rapides variations de températures dues aux alternances jour-nuit ou gel-dégel ont des effets qui peuvent modifier les caractéristiques mécaniques du massif rocheux. Tous ces phénomènes peuvent conduire à des déstabilisations de parties de la falaise, provoquant des éboulements et effondrements dont les volumes globaux et la tailles des blocs individuels sont variables.

Facteurs marins

Les côtes de roches dures subissent les variations de niveau marin de manière passive, c'est-à-dire qu'elles sont submergées ou émergées en fonction du niveau marin sans que leur morphologie n'en soit affectée. C'est le cas par exemple de côtes granitiques en Bretagne.

Pour ce qui concerne les côtes de roches tendres telles que les falaises de craie de Normandie, deux cas peuvent se présenter :

- lorsque la falaise est directement en contact avec la mer, elle subit l'agression des vagues qui contribuent souvent à leur érosion. Leur géométrie joue également un rôle dans la célérité des processus érosifs : dans certaines configurations, la houle peut être réfléchiée ou réfractée sur la falaise sans dommages importants. La présence d'un platier rocheux peut aussi jouer le rôle de brise lames naturel et protéger la falaise de l'agression des vagues.
- Lorsqu'une plage de sable ou de galets suffisamment large est présente en pied de falaise, elle joue un rôle d'atténuation de l'action mécanique des vagues la plupart du temps et contribue ainsi à protéger la falaise. Les processus érosifs prépondérants sont alors d'origine hydrogéologique.

A titre d'exemple, les falaises de craie de Haute Normandie présentent des valeurs de recul de 20 cm à 1 m/an (Costa et al, 2002). Le processus n'est pas continu mais se produit par à coups sous forme d'effondrements pouvant provoquer des reculs importants en un seul évènement.

En résumé le taux d'érosion des falaises est pour l'essentiel fonction de leur nature géologique et de leurs caractéristiques géo-mécaniques, l'action de la houle étant un facteur aggravant.

Ainsi, pour résumer, **l'érosion des littoraux qui est généralement constatée aujourd'hui est liée en premier lieu à une pénurie de sédiments** et à la perturbation de leur transport (Paskoff, 2001). **Dans ce contexte, les tempêtes, les vagues, les courants et la hausse relative du niveau marin sur certains sites favorisent l'érosion. En outre, les activités humaines (agriculture, aménagement des fleuves et des littoraux) ont une incidence de plus en plus importante sur le trait de côte.**

3.1.7. Vulnérabilité des zones côtières à l'érosion

Dans un contexte où les zones côtières sont de plus en plus attractives et aménagées, leur vulnérabilité aux risques côtiers s'est considérablement aggravée depuis le début du XXème siècle. Un quart de la population mondiale vivrait à moins de 100 km d'une côte et en dessous de 100 m d'altitude. En Europe, entre 1986 et 2003, des aménagements (habitations, tourisme, etc...) auraient été construits sur environ 950 km de côtes auparavant non bâties. En 50 ans en Europe, la population établie dans les municipalités côtière a plus que doublé pour atteindre 70 millions d'habitants en 2001. Cette tendance perdure en raison de l'attractivité des zones côtières. Cela se traduit par des coûts de plus en plus importants visant à maintenir le trait de côte dans son état actuel : en Europe entre 1986 et 2001, les dépenses publiques consacrées à la défense contre la submersion et l'érosion ont progressé de 30% pour atteindre 3,2 milliards d'Euros en 2001 (Eurosion, 2004).

3.2. CE QU'IL POURRAIT SE PASSER

3.2.1. Les impacts du changement climatique

Le changement climatique engendre une élévation du niveau marin qui se poursuivra au XXI^{ème} siècle (voir fiche n°6 sur l'élévation du niveau marin). Cette élévation du niveau marin est l'aspect du changement climatique dont les effets en termes d'érosion sont les plus connus. Cependant, d'autres aspects pourraient avoir un impact important : c'est le cas par exemple des modifications des régimes de vagues sur certains bassins tels que l'Atlantique Nord (Wang et Swail, 2004) (c.f. fiche n°8 sur les vagues)

3.2.2. Situation des plages

Dans le monde, 70% des plages seraient en érosion contre 20% stables et 10% en accrétion (Bird, 1985). Avec le changement climatique, on doit s'attendre à ce que cette situation s'aggrave. L'équilibre d'une plage est lié à la disponibilité des sédiments, à des pressions telles que l'élévation du niveau marin et à des forçages tels que les tempêtes, les vagues et les courants. L'aspect du changement climatique qui cause le plus d'inquiétude est la hausse du niveau marin. Pourtant, l'impact de l'élévation du niveau marin sur l'érosion des côtes est mal connu : la loi de Bruun (1962) utilise des paramètres géométriques d'un profil de plage pour prédire son retrait en cas d'élévation du niveau marin. Bien que largement utilisée, cette loi ne peut s'appliquer dans la plupart des cas réels (Cooper, 2004), à tel point que son auteur lui-même a dû préciser ses conditions d'application (Bruun 1983 et 1988). Pour certains (Cooper, 2004), les modélisations mathématiques de l'érosion ne peuvent répondre à la question de l'impact de l'élévation du niveau marin sur le trait de côte. Cette opinion n'est pas partagée par d'autres communautés scientifiques issues de la modélisation (ex. Cowell et. al., 2006) pour qui la recherche dans ce domaine demeure pertinente.

Dans le voisinage de nombreuses embouchures de fleuves, la baisse des apports de sédiments grossiers liée à leur aménagement, constitue un facteur aggravant de l'érosion des plages.

3.2.3. Situations des côtes rocheuses

Facteurs terrestres

Dans le nord de la France l'augmentation de précipitations attendue d'après les modèles de Météo-France pourrait induire une augmentation des éboulements et des effondrements.

Facteurs marins

Les côtes de roches dures subissant les variations de niveau marin de manière passive, c'est-à-dire qu'elles sont submergées ou émergées en fonction du niveau marin sans que leur morphologie n'en soit affectée, l'impact de l'élévation du niveau de la mer sera négligeable. C'est le cas par exemple de côtes granitiques en Bretagne où on considère que ces côtes sont peu vulnérables au changement climatique, Il est à noter toutefois que les plages de poche situées fréquemment en pied de ces falaises auront tendance à se réduire voire à disparaître.

Pour ce qui concerne les côtes de roches tendres ou meubles les effets du changement climatique avec l'élévation du niveau de la mer auront les conséquences suivantes :

- lorsque la falaise est directement en contact avec la mer à marée haute, elle subit l'agression des vagues qui contribuent souvent à leur érosion et continuera à la subir. La présence d'un platier rocheux jouera un peu moins son rôle de brise lames naturel et de protection de la falaise vis-à-vis de l'agression des vagues.
- dans le cas de falaises en zone de déficit sédimentaire et protégées actuellement par une plage de sable ou de galets, l'élévation du niveau de la mer pourra aggraver l'érosion de ces plages. La falaise serait alors moins protégée de l'action mécanique des vagues notamment lors de tempêtes.

Il est possible de faire un analogue dans le passé : des cas où une élévation du niveau marin engendrait une aggravation de l'érosion de certaines falaises meubles ont été observés. C'est le cas du Lac Erié (USA/Canada) dont une élévation du niveau de 1 m a aggravé l'érosion de certaines falaises d'argile. Cet exemple ne peut être généralisé, ce sont plutôt des études locales de vulnérabilité de telle ou telle falaise qui peuvent renseigner quant à sa vulnérabilité face à une élévation du niveau marin. Le changement climatique aurait de manière qualitative des effets contradictoires : précipitations plus fréquentes, augmentation de la hauteur des vagues et élévation du niveau marin allant en faveur de l'érosion, cycles gel/dégel moins fréquents allant dans le sens d'une stabilisation.

L'influence des facteurs climatiques sur la stabilité des falaises dans la variabilité climatique actuelle est insuffisamment connue pour conclure sur cet aspect.

3.2.4. Situations des marais côtiers

Les marais côtiers sont aujourd'hui généralement en accrétion. C'est le cas en France par exemple pour la Baie du Mont St Michel, le marais Poitevin ou Charentais. Ceci s'explique par la sédimentation verticale et latérale très rapide dont ils sont le siège. Cette sédimentation est d'origine minérale (limons et argile) et végétale (débris végétaux). Contrairement au cas des sédiments grossiers qui sont généralement en déficit, ces sédiments fins sont actuellement abondants sur les littoraux. Les marais littoraux peuvent s'adapter jusqu'à une valeur d'élévation du niveau de la mer de 1

cm/an (soit 1 m sur 100 ans) s'ils sont dans des conditions optimales d'apports en sédiments, de salinité et de qualité des eaux et sous une pression anthropique modérée (Lenôtre et Pedreros, 2006). Cette élévation du niveau de la mer aura pour conséquence de les rendre plus sensible à l'action de la houle. Avec la hausse du niveau marin, les processus érosifs prendraient plus d'ampleur sans que cela ne se traduise nécessairement par un basculement vers une situation d'érosion.

3.2.5. Ouvrages de défense

Les ouvrages de défense côtiers pourront être fragilisés par une accélération de l'érosion. En effet lorsqu'une plage en avant d'un ouvrage est en érosion si cette érosion s'accroît, éventuellement jusqu'à sa disparition, l'ouvrage (digue, perré, ..) pourra être déstabilisé en particulier lors de tempêtes.

3.3. CHANGEMENT GLOBAL ET EROSION

Les zones littorales demeurent aujourd'hui attractives. La pression anthropique devrait ainsi continuer à augmenter dans ces zones. Ceci se traduit par la présence d'aménagements qui alors même qu'ils jouent leur rôle de protection, ont perturbé la circulation des sédiments et ont souvent accentué/créé un phénomène d'érosion sur les littoraux voisins. Les zones littorales doivent ainsi faire face à deux aspects du changement global qui perturbent leur équilibre :

- les pressions anthropiques (aménagements, tourisme, etc...) qui sont des causes connues de la dégradation des zones littorales depuis le début du XXème siècle
- le changement climatique qui deviendra probablement un facteur de changement important au XXIème siècle

En résumé, les connaissances sur l'érosion/accrétion des côtes dans un contexte de changement climatique sont faibles et nécessitent des efforts de recherche afin de pouvoir mettre en place les possibles évolutions en fonction des scénarii climatiques. On peut noter que les phénomènes érosion/accrétion et de submersion sont liés et nécessitent d'être étudiés conjointement pour avoir une appréciation réaliste de l'évolution du littoral dans un contexte de changement climatique.

3.4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES SUR L'EROSION

Rapports EuroSION (2004): www.euroSION.org

Bruun P (1962) Sea level rise as a cause of shore erosion. *J Waterw Harb Div* 88:117

Bruun, P., 1983. Review of conditions for use of the Bruun Rule of erosion. *Coastal Engineering* 7, 77– 89.

Bruun, P., 1988. The Bruun Rule of erosion by sea-level rise: a discussion of large-scale two- and three-dimensional usages. *Journal of Coastal Research* 4, 627– 648.

Cooper JAG, Pilkey OH (2004) Sea level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun rule. *Glob Planet Change* 43:157

Cooper, J. A. G. and O. H. Pilkey. 2004b. Alternatives to the mathematical modeling of beaches. *Journal of Coastal Research* 20:641–644.

Costa S., Delahaye D., Freiré-Diaz R., Laignel B., 2002, Quantification par analyse photogrammétrique du recul des falaises et des apports de galets corrélatifs (Haute Normandie, France). *In colloque : Geomorphology – from expert to modelling, Strasbourg*, pp205-214

Cowell P.J. and Thom, B.G., 2006. Reply to: Pilkey, O.H., and Cooper, J.A.G., 2006, Discussion of Cowell *et al.*, 2006, Management of uncertainty in predicting climate change impacts on beaches. *Journal of Coastal Research*, 22, 232–245.

Lenôtre, N. et Pedreros, R.(2006) Impact du changement climatique sur le littoral. *Géosciences* n°3, pp. 36-43

Nicholls, R.J., Wong P.P., Burkett V.R., Codignotto J.O., Hay J.E., Mclean R.F., Ragoonaden S. And Woodroffe C.D. (2007) - Coastal systems and low-lying areas. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356.

PASKOFF R., 2001, L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers, *Ed. Institut océanographique*, Coll. Propos, ISBN 2-903581-27-4, 190 p.

Pedreros, R. (2000). Quantification et modélisation du transport éolien au niveau des zones côtières - application au littoral girondin. Thèse, Bordeaux

Wang X.L. and V.R. Swail, 2004: Historical and possible future changes of wave heights in northern hemisphere oceans. *In: Atmosphere Ocean Interactions*, 2, W. Perrie (ed.) Wessex Institute of Technology Press, Southampton, UK.

4. Fiche n°10 : Submersion

4.1. CE QUE L'ON CONSTATE ACTUELLEMENT

4.1.1. Définition

Les submersions marines sont « des inondations épisodiques de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques (forte dépression et vent de mer) et marégraphiques sévères » (Garry et al. 1997).

Les submersions marines sont souvent liées à des élévations du niveau marin lors de tempêtes ou de cyclone.

D'après le Guide méthodologique Plan de Prévention des Risques Littoraux (MATE/METL, 1997), les submersions marines sont dues :

- « au débordement », lorsque le niveau de la mer est supérieur au niveau des ouvrages de défense ou d'une dune,
- à « des franchissements par paquets de mer » liés au déferlement des vagues,
- « à la rupture ou à la destruction d'un cordon dunaire à la suite d'une érosion intensive, » ou « la rupture de digues ou d'ouvrages de protection », lorsque le niveau topographique en arrière est inférieure au niveau de la mer.

Il y a donc trois modes de submersion marine possibles.

4.1.2. La problématique de submersion marine

Ce paragraphe rappelle quelques événements de submersion marine qui ont marqué les mémoires : lors de la tempête du 1 février 1953, les submersions marines ont causé 2000 morts et l'évacuation de 72000 personnes aux Pays-Bas, 300 morts en Angleterre, 25 en Belgique, et de nombreux dégâts en Allemagne et en France. Si le caractère exceptionnel de la tempête (des surcotes de plus de 3 m ont été observées) est en cause, l'entretien des digues avait été relativement négligé depuis les années 30, et a été un facteur aggravants de la tempête aux Pays-Bas notamment. La tempête Lothar du 27 décembre 1999 a également causé des submersions marines.

Dans les Antilles et à la Réunion, les épisodes de houle cyclonique, éventuellement créés par des cyclones situés assez loin au large des côtes, sont à l'origine de submersions, de dégâts aux infrastructures par le choc mécanique des vagues, la mise en mouvement de débris et d'affouillement. A titre d'exemple, le cyclone de 1928 a causé 1200 morts en Guadeloupe. Il a été caractérisé par une submersion du « Petit

Cul-de-sac marin » situé entre Grande-Terre et Basse-Terre lié à une trajectoire particulière du cyclone. A la Réunion, outre les épisodes de houle cyclonique tels que Gamède (2007), la houle australe peut avoir des effets similaires : ainsi en mai 2007, une houle australe a fait 2 morts, coulé de nombreuses embarcations dans des ports et causé des dommages à des infrastructures côtières.

4.1.3. Causes

Les submersions marines sont liées à des élévations du niveau marin lors de tempêtes ou de cyclone. A la marée astronomique prédite s'ajoute une surcote atmosphérique et une surcote associée aux vagues, ainsi que le va et vient des vagues sur le rivage.

La surcote atmosphérique est directement liée aux conditions atmosphériques (pression atmosphérique et vent). Elle est composée d'une surcote liée à la chute de pression au passage de la dépression (c'est le phénomène de baromètre inverse : une diminution d'1 hPa équivaut à une élévation d'1 cm du plan d'eau) et d'une surcote liée au vent lorsque le vent pousse les masses d'eau vers la côte.

La surcote liées aux vagues (setup) : à l'approche de la côte, les vagues déferlent du fait des conditions de géographie et de bathymétrie côtière, ainsi que des caractéristiques des vagues, hauteur et période. Plus précisément, toute chose étant égale par ailleurs, lorsque le plateau continental est large, le forçage atmosphérique est prépondérant alors que lorsque les pentes sous-marines sont fortes et le plateau continental étroit, la surcote liée aux vagues prédomine souvent (Weaver, 2004).

Outre ces facteurs d'élévation du niveau moyen, il convient de tenir compte de l'élévation instantanée du niveau marin : c'est le jet de rive (swash), c'est-à-dire le flux et le reflux des vagues sur la plage, pouvant être à l'origine de franchissements.

La hauteur d'eau maximale atteinte par la mer au dessus de son niveau moyen (run-up) est ainsi déterminée en cumulant le niveau de marée prédit, la surcote atmosphérique, le set-up et le swash (Figure 3).

Les dommages liés à une tempête sont liés à la conjonction de plusieurs phénomènes: pris individuellement, chacun des paramètres (hauteur des vagues, surcote, marée) peut-être caractérisé par une probabilité d'occurrence. Pour autant, le caractère extrême d'une valeur donnée n'est pas systématiquement associé à de forts dommages : ainsi, les plus fortes houles de la tempête du 24/01/2009 ont eu lieu à marée basse et n'ont pas causé de dégâts (au contraire des vents forts). Un autre exemple est la tempête du 10 mars 2008 qui a affecté les côtes bretonnes et qui a causé de nombreux dommages (en particulier liés à des inondations) alors que, pris individuellement, chacun des paramètres n'était pas extrême : vents de 130 à 140 km/h, hauteur significative de houle de 10m sur la bouée des Pierres Noires mouillée au sud de Ouessant, marée de coefficient 105 (Sources : Météo-France, Previmer, Cetmef).

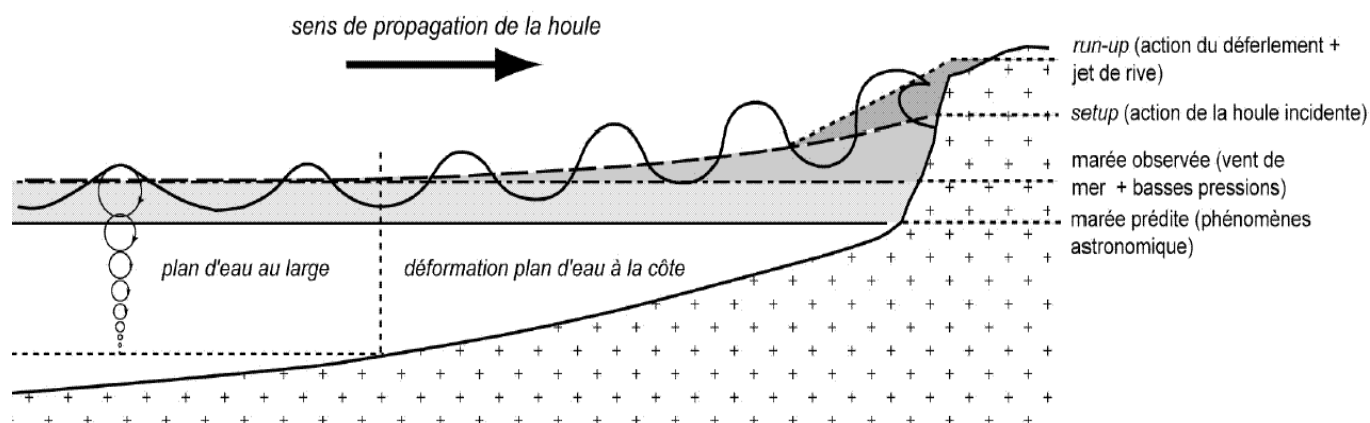


Figure 3 : Principaux paramètres entrant en compte dans l'évaluation des niveaux marins extrêmes (Cariolet et Suanez, 2008)

Plus rarement, des submersions marines peuvent avoir des causes géologiques comme c'est le cas pour les tsunamis liés à des séismes sous-marins, des mouvements de terrain ou des éruptions volcaniques.

4.1.4. Vulnérabilité des zones côtières à la submersion

L'aggravation de la pression anthropique sur le littoral précisée dans la fiche n°11 sur l'érosion demeure pertinente ici. Cette pression accroît l'exposition à l'aléa de submersion temporaire.

4.1.5. Limitations des connaissances

L'ensemble des travaux disponibles ne permettent pas d'avoir une connaissance suffisamment fine tant des ouvrages que de la topographie (zones littorales et zones basses arrière-littorales) pour apprécier les conséquences sur l'ensemble du territoire français d'éventuelles submersions marines. En particulier, même si l'on suppose que les systèmes littoraux subissent l'élévation du niveau marin sans s'y adapter, les cotes d'altitude ne sont pas toujours connues avec la précision nécessaire pour établir les conséquences possibles d'une élévation du niveau marin de quelques dizaines de centimètres. Aujourd'hui, le LiDAR aéroporté produit une donnée qui répond à ce besoin, mais qui reste actuellement disponible uniquement sur certaines zones.

4.2. CE QU'IL POURRAIT SE PASSER

L'élévation du niveau de la mer au cours des 100 prochaines années, les évolutions dans la fréquence et l'intensité des tempêtes se traduiront par un accroissement de la fréquence des surcotes, mais les effets précis sont incertains et dépendent des côtes.

4.2.1. Les impacts du changement climatique sur la submersion

L'élévation du niveau moyen de la mer, engendrera une submersion permanente de zones basses et les niveaux marins extrêmes actuels seront atteints plus fréquemment qu'aujourd'hui (Nicholls et al., 2007). De nouveaux territoires feront l'objet de submersions temporaires lors de tempêtes.

D'autres conséquences du changement climatique pourront avoir un impact sur la submersion temporaire : c'est le cas de possibles changements pour les vagues extrêmes (Wang et Swail, 2004) développé dans la fiche n°8 « vagues ».

L'impact direct du changement climatique sur les régimes de surcote n'a été quantifié qu'à travers des travaux de recherche. Dans le cas de la Méditerranée : il y aurait un impact faiblement modérateur des changements de conditions atmosphériques sur la fréquence des surcotes extrêmes. Ce serait d'un ordre de grandeur inférieur à l'impact de la hausse du niveau marin (Ullman, 2008). L'impact du changement climatique sur les cyclones est du domaine de la recherche car le changement climatique aurait des effets contradictoires sur l'intensité des cyclones et leur genèse (Pielke et al., 2005).

Le changement climatique aura ainsi des impacts sur chacun des trois modes de submersion :

- l'élévation du niveau moyen de la mer, et de plus fortes surcotes, pourront faciliter la submersion « par débordement »,
- sous l'hypothèse que la morphologie actuelle change peu, l'augmentation de la profondeur d'eau en proche côtier facilitera la propagation des vagues d'amplitude plus importante à la côte, augmentant ainsi le risque de « franchissements par paquets de mer »,
- les plus fortes vagues arrivant à la côte pourront également générer des phénomènes d'érosion et de déstabilisation des ouvrages de défense, aboutissant à des ruptures.

Comme évoqué dans la fiche érosion (n°11), une côte pour laquelle un stock sédimentaire suffisant serait disponible pourrait s'adapter à une élévation du niveau marin à travers une translation du système vers l'intérieur des terres.

4.2.2. Territoires poldérisés ou protégés par des digues

Pour les zones situées en deçà du niveau de la mer telles que la région de Dunkerque, l'aléa est en réalité lié au franchissement des digues, à la possibilité de rupture d'une digue, à un mauvais fonctionnement des écluses régulant le niveau des rivières ou bien à un dépassement de leur capacité à évacuer l'eau douce en mer. La résilience de ces territoires est fonction de leur capacité à gérer l'entretien des défenses contre la submersion et des infrastructures fluviales d'une part, mais dépend aussi de la problématique de l'érosion qui peut venir fragiliser certains éléments de défense contre

la submersion tels que des dunes de sable. Il conviendra, lorsque les enjeux le nécessitent, d'envisager de renforcer, rehausser les structures de défense.

4.2.3. Zones basses non protégées par des digues

Pour les littoraux bas, l'élévation du niveau marin induira le franchissement plus fréquent des cordons dunaires et un risque de rupture aggravé de ces cordons. Cette nouvelle spatialisation de l'aléa de submersion temporaire est difficile à déterminer de façon précise aujourd'hui en raison des incertitudes concernant l'élévation du niveau marin d'une part, mais aussi en raison d'un manque de données altimétriques précises en zone littorale et d'une relative méconnaissance des évolutions morphodynamiques des littoraux sur le long terme. Ceci reste donc du domaine de la recherche.

4.2.4. Marais

Les marais littoraux pourraient s'adapter jusqu'à une valeur d'élévation du niveau de la mer de 1 cm/an (soit 1 m sur 100 ans) s'ils sont dans des conditions optimales d'apports en sédiments, de salinité, de qualité des eaux et sous une pression anthropique modérée (Lenôtre et Pedreros, 2006). Si ces conditions ne sont pas remplies, les zones humides peuvent s'éroder et être submergées.

4.2.5. Baies et golfes

Les fonds de baies ou de golfes sont actuellement souvent en envasement en raison des apports des rivières et du fait que ces zones sont protégées des houles. La question qui se pose, est de savoir ce qui va avoir une action prépondérante : la situation actuelle ou l'élévation du niveau de la mer si celle-ci s'accélère.

4.2.6. Estuaires

L'élévation du niveau de la mer favorisera la pénétration des eaux salées dans les estuaires, pénétration qui pourra être localement compensée par l'augmentation du débit des fleuves. Si le débit des fleuves reste relativement constant, le risque de submersion s'aggraverait dans ces zones.

4.2.7. En France

Une étude du Conservatoire du littoral a estimé que l'impact de l'élévation du niveau de la mer restera assez limité sur les terrains du Conservatoire du Littoral : seuls 3 % de la superficie des terrains non endigués actuels sont exposés à la submersion, et seulement 2,6 % des acquisitions futures le seront.

En revanche, la submersion possible des vastes espaces endigués (ex. : les marais de Brouage en Vendée) que le Conservatoire possède déjà ou qu'il est susceptible d'acquérir, est d'une toute autre ampleur. En effet, 7 % de la superficie des sites acquis

et 17 % des acquisitions futures sont constitués de terrains situés en dessous du niveau des pleines mers actuelles.

Il n'existe pas aujourd'hui d'étude exhaustive à l'échelle nationale portant sur les impacts du changement climatique sur le littoral.

4.3. CHANGEMENT GLOBAL ET SUBMERSIONS

Les remarques faites dans la fiche n°11 sur l'érosion demeurent pertinentes : l'attractivité des zones littorales est un facteur aggravant de l'exposition au risque de submersion temporaire des différents aménagements installés sur le littoral (infrastructures, entreprises, urbanisation, ...). Avec le changement climatique, cette situation devrait s'aggraver dans les zones basses, avec un risque de submersions plus important et/ou des coûts d'entretien des défenses côtières plus importants. L'élévation du niveau marin et le changement des régimes des vagues nécessiteront de revoir le dimensionnement de certaines infrastructures, mais aussi l'aménagement du territoire et en particulier des zones les plus exposées à l'aléa de submersion marine.

4.4. BIBLIOGRAPHIE POUR LA SUBMERSION

Cariolet, J.M. ; Suanez, S. (2009). Approche méthodologique pour une cartographie du risque de submersion des côtes basses. *La Houille Blanche*, n°2 (Mai 2009), pp. 52-58

Garry, G., Graszka, E., Toulemont, M., Levoy, F. : Plan de prévention des risques littoraux (PPR), *Guide méthodologique*, Paris : la documentation française, 1997.- 54 P. ISBN : 2-11-003883-7

Lenôtre, N. et Pedreros, R.(2006) Impact du changement climatique sur le littoral. *Géosciences* n°3, pp. 36-43

Nicholls, R.J., Wong P.P., Burkett V.R., Codignotto J.O., Hay J.E., Mclean R.F., Ragoonaden S. And Woodroffe C.D. (2007) - Coastal systems and low-lying areas. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 315-356.

Pielke Jr, R.A., C. Landsea, M. Mayfield, J. Laver and R. Pasch, 2005: Hurricanes and global warming. *B. Am. Meteorol. Soc.*, **86**, 1571-1575.

Ullman A., 2008 Surcotes dans le Golfe du Lion et conditions atmosphériques : variabilité contemporaine et future (1905-2100), thèse de doctorat

Wang X.L. and V.R. Swail, 2004: Historical and possible future changes of wave heights in northern hemisphere oceans. In: *Atmosphere Ocean Interactions*, 2, W. Perrie (ed.) Wessex Institute of Technology Press, Southampton, UK.

Weaver R.J. (2004). Effects of wave forces on storm surge. *Master of Science thesis*. Univ. of Florida, 65 p.

5. Fiche n° 13 : accentuation de la salinisation des eaux souterraines littorales

5.1. CE QUE L'ON CONSTATE ACTUELLEMENT

Les aquifères côtiers sont plus ou moins sensibles aux intrusions salines en conditions naturelles et sous influence anthropique en fonction de leur structure, leur géométrie et de l'hétérogénéité du milieu. La zone littorale est le point de rencontre entre deux types d'eau souterraine :

- (i) l'eau douce des nappes du continent et
- (ii) l'eau salée qui imprègne les terrains au voisinage des côtes ou qui pénètre les cours d'eau au niveau des estuaires et peut ainsi donner lieu à des salinisations des eaux souterraines en relation hydraulique avec les eaux de surface.

Dans les zones littorales, les aquifères souterrains d'eau douce sont en contact avec l'eau salée d'origine marine, qui envahit plus ou moins les formations géologiques côtières, l'eau douce d'une densité moindre que l'eau salée, « flottant » sur l'eau salée. Le niveau piézométrique (altitude ou profondeur de l'interface entre zone saturée et zone non saturée) s'élève vers l'intérieur des terres, de manière générale et en première approximation donnée par l'équilibre hydrostatique. L'intrusion d'eau salée a la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres, appelé communément le « biseau salé ». Le contact de ces eaux de densité différente est régi par les lois d'équilibre hydrodynamique et par les phénomènes de diffusion qui s'inscrivent obligatoirement dans le contexte géomorphologique, lithologique et hydrologique propre à chaque région. La position de l'interface eau salée/eau douce est de manière générale fonction du rapport de densité de l'eau douce et de l'eau salée, telle que définie par Ghyben Herzberg (Figure 4).

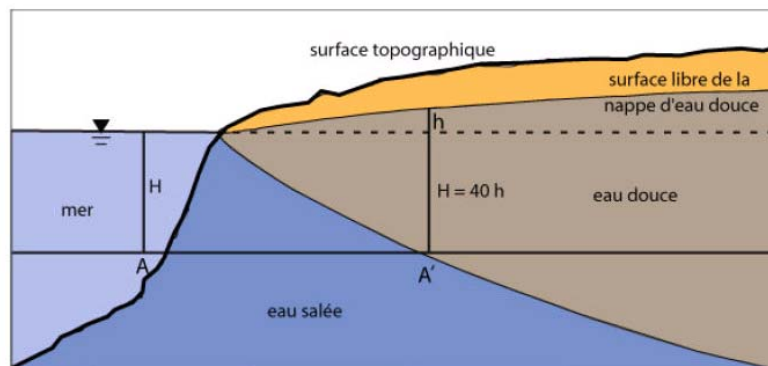


Figure 4 : Position de l'interface selon Ghyben Herzberg (Frissant et al., 2005).

L'exploitation des aquifères littoraux influence considérablement la position et la forme de la zone de contact que constitue l'interface eau douce/eau salée. Réciproquement l'évolution de cette interface peut nuire à l'exploitation des eaux souterraines côtières, du fait de la dégradation possible (augmentation de la salinité) de la qualité de l'eau prélevée (Figure 5).

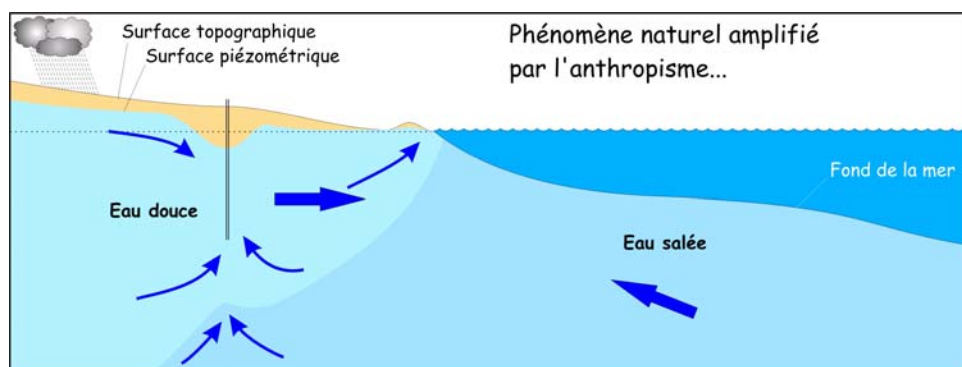


Figure 5: amplification de l'intrusion saline des aquifères côtiers par influence anthropique (Aunay, 2007)

En contexte insulaire, la nappe d'eau douce se trouve sous forme de lentille d'eau douce, telle que décrite par la Figure 6 selon l'approximation de Ghyben Herzberg.

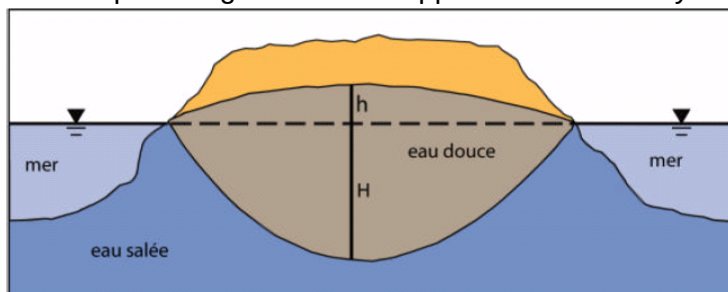


Figure 6: coupe perpendiculaire dans un aquifère insulaire (Frissant et al., 2005)

Pour les aquifères multicouches côtiers, l'hétérogénéité des formations ainsi que les relations hydrauliques entre les différentes formations aquifères conditionnent la position des biseaux salés qui peuvent être multiples. Les formations aquifères en contact avec la mer peuvent être très distantes de la côte (vers le large), et lenticulaires au sein d'une masse sédimentaires de faible perméabilité où les processus de diffusion vont être prédominants. Il n'y a pas de contact hydraulique direct de type « sortie d'eau douce » au niveau de la mer, ni de biseau salé en dehors des formations du lido (Aunay, 2007).

Sur les 5500 km de côte, on dénombre à l'échelle de la France métropolitaine, 95 aquifères superficiels et 17 aquifères profonds côtiers (Petit, 1996). Les aquifères

côtiers des milieux insulaires des DROM sont de type volcanique, milieu fissuré ou encore carbonatés potentiellement karstiques et des aquifères sédimentaires alluviaux. Parmi les différents aquifères de la France Métropolitaine, on distingue :

- (i) des aquifères superficiels sédimentaires particulièrement vulnérables vis-à-vis d'une salinisation en cas de surexploitation,
- (ii) des aquifères profonds où la salinisation peut provenir de la drainance des aquifères supérieurs ou par des forages mal conçus ou en mauvais état mettant en communication plusieurs aquifères,
- (iii) les aquifères karstiques des formations carbonatés avec des exutoires en mer ou en zones lagunaires avec des intrusions salines complexes variables dans le temps et l'espace et
- (iv) finalement des aquifères de milieu fissuré avec des intrusions localisées du fait du compartimentage possible du milieu aquifère.

Un état des lieux a été dressé en 1996 à l'échelle de la France métropolitaine (Petit, 1996). Il est nécessaire de procéder à une mise à jour de ce dernier.

La salinité des aquifères côtiers peut être naturelle comme c'est le cas dans le Nord Pas de Calais et en Picardie dans des zones de très faible altitude, en Bretagne sur l'île de Noirmoutier, en Languedoc Roussillon dans les aquifères superficiels, dans les sources karstiques (ex. Port Miou (13), Fontestramar (66), La Vise (34)) et en Camargue. Les conditions de prélèvement influencent la position de l'interface eau douce/eau salée à l'aplomb des forages en exploitation. Lorsque la salinisation est d'origine anthropique, la surexploitation des aquifères est la principale raison de la salinité. Certains secteurs à l'échelle de la France métropolitaine ont été recensés ou identifiés comme comportant un risque :

- (i) zones d'estuaires avec une extension généralisées des venues d'eau salée (ex. zones d'estuaire en Haute Normandie, zone d'estuaire de la Gironde – région de Soulac et de Rochefort),
- (ii) les plaines alluviales du littoral méditerranéen avec des invasions d'eau salée localisée (ex. nappe de la vallée de l'Hérault dans la région d'Agde, nappe de Maugio Lunel en bordure de l'étang de l'Or, nappe de la Crau région d'Arles, nappe de Gapeau (région d'Hyères), nappe de Giscle et Mole (région de Grimaud), nappe d'Argnes (région de Saint Raphaël) et
- (iii) nappe côtière de Corse (région de Filitosa) (SDAGE RM&C, 2000),
- (iv) des invasions d'eau salée saisonnières dans les départements du Calvados, de la Manche et aussi dans la nappe du Lias et du Dogger à proximité du Marais Poitevin (Petit, 1996), nappe du Lamentin en Martinique (zones alluviales) (Vittecoq et al. 2007).

A titre d'exemple pour ce qui concerne les DROM, la Grande Terre est un complexe aquifère vulnérable aux intrusions salines, mais pour lequel la position de l'interface eau douce/eau salée n'est pas connue avec exactitude (Ham et al. 2007). A Marie Galante, l'aquifère carbonaté reposant sur un substratum volcanique est en équilibre fragile entre l'eau douce et l'eau salée sur le pourtour de l'île (Bézèlques et al. 2003). Les aquifères littoraux de la Réunion sont concernés également par des intrusions salines, notamment en particulier sur la partie occidentale : les conditions d'exploitation influencent ce processus, particulièrement dans les zones où la pluviométrie est inférieure à 1 m (Frissant et al. 2005).

Les zones littorales sur la façade méditerranéenne sont soumises à des pressions démographiques saisonnières avec des besoins en eau plus importants concentrés sur quelques mois de l'année. Si la recharge a été faible au cours de la période hivernale (automne à printemps), le risque de surexploitation avec possibilité d'intrusions salines et communication entre les aquifères superficiels contaminés et les aquifères profonds et des conflits d'usage d'eau peuvent prendre place.

5.2. CE QU'IL POURRAIT SE PASSER

Considérant les différents scénarii de changements climatiques ayant pour conséquence des modifications du niveau marin, des précipitations, de la température et donc de la recharge et des débits des cours d'eau côtiers, les conditions aux limites des aquifères côtiers vont être modifiées.

L'élévation du niveau de la mer peut se traduire par un recul de la ligne de rivage et donc par une réduction de surface émergée.

De plus les tempêtes pourront voir leur fréquence augmentée ; les phénomènes associés à ces tempêtes sont des surcotes correspondant à une élévation d'un niveau de la mer durant quelques heures voir des inondations permanentes derrière le cordon littoral dunaire en fonction de la topographie (Lenôtre et al. 2006). Une élévation du niveau de la mer de 50 cm à la fin du 21ème siècle pourrait entraîner des périodes de retour d'une surcote de 1 m, d'une fois tous les 10ans aujourd'hui à une fois par an (Clus-Auby et al, 2004).

La modification des précipitations et conditions climatiques selon les travaux du GICC se traduirait par une diminution marquée des précipitations en automne, en particulier sur le sud-ouest, changements limités au printemps, avec une faible diminution sur le sud de la France, augmentation des précipitations en hiver sur le sud-est (Boé, 2007).

Un phénomène important à prendre en compte est la probable réduction des débits des cours d'eau côtiers au niveau de leur embouchure : diminution des débits en été et en automne supérieure à 35% à l'échelle de la France, avec des étiages des cours d'eau 2 à 3 fois plus fréquents qu'actuellement. La quasi totalité des modèles s'accorde sur une diminution généralisée des débits en automne et en été (de l'ordre de 30% en moyenne sur la France pour les deux saisons). En moyenne d'ensemble, les débits diminuent modérément en hiver, excepté sur le sud-est du pays et les Alpes

où ils augmentent. Au printemps, les changements sont en général faibles, mais incertains en signe (Boé, 2007).

Il ne faut pas oublier l'impact démographique sur les zones littorales en particulier sur la façade méditerranéenne avec une augmentation des prélèvements en eau pour les différents usages (principalement agriculture et tourisme), de manière saisonnière ou permanente.

Les impacts concerneront d'une part les marais salés et les aquifères côtiers. Au niveau des marais salés actuels, en particulier sur la façade atlantique, une hausse rapide du niveau de la mer sous l'effet du changement climatique pourrait compromettre l'équilibre hydrologique et écologique de ce type de zone d'interface, site d'écosystèmes singuliers, et entraîner la disparition des marais ou les transformer en zone occupée par d'autres types de végétation et d'écosystèmes associés. Les modifications climatiques sur les zones littorales (augmentation du niveau marin et des fréquences des surcotes, diminution des débits d'étiage et augmentation plus ou moins marquée des précipitations hivernales) couplées aux changements globaux avec des pressions sur les ressources en eau douce, conduiront probablement à une accentuation de la salinité des eaux souterraines de manière locale (à proximité des embouchures où le débit sera moindre et favorisera la propagation de langues salées de la mer dans les cours d'eau) voire plus généralisée en fonction des conditions géomorphologiques, hydrogéologiques et hydrodynamiques. Une salinisation de terres inondées de façon temporaire ou permanente aura des conséquences sur un appauvrissement des sols.

Des incertitudes existent au vu de la complexité des aquifères côtiers, quant à la conséquence d'une augmentation d'un niveau marin, voire de surcote sur la salinisation des aquifères littoraux, vis-à-vis des autres forçages.

5.3. LIMITE DES CONNAISSANCES

Pour comprendre ces changements, il y a besoin d'études complémentaires :

- une synthèse des connaissances actuelles concernant leur sensibilité à l'intrusion saline accompagné d'une mise à jour de la carte de France des aquifères littoraux
- une modélisation hydrogéologique diphasique sur une sélection d'aquifères côtiers emblématiques en intégrant des scénarios contrastés concernant l'augmentation du niveau marin, les précipitations et les débits si des relations nappe/rivière sont existantes et également la pression démographique. Des analyses de sensibilité aux différents forçages seront indispensables pour identifier l'origine prépondérante d'une modification de la salinité des aquifères côtiers : changement climatique ou changements globaux.

5.4. BIBLIOGRAPHIE

Aunay B. 2007 : Apport de la stratigraphie séquentielle à la gestion et à la modélisation des ressources en eau des aquifères côtiers, *Thèse Université Montpellier II*, 414 pp.

Bézèlques S., Petit V., Gourdol L. (2003) : Modélisation des écoulements souterrains de Marie-Galante en régime transitoire (Guadeloupe), *BRGM RP-52675-FR*, 80p.

Boe J. (2007) : Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France, *Thèse Université de Toulouse Paul Sabatier*, 273pp.

Clauzon G. 1990 : Restitution de l'évolution géodynamique néogène du bassin du Roussillon et de l'unité adjacente des Corbières d'après les données écostratigraphiques et paléogéographiques. *Paléobiologie continentale*, XVII, PP. 125-155.

Frissant N., René-Corail C.(2005) : Le phénomène d'intrusion saline à la Réunion : état des connaissances et synthèses des données disponibles, *Rapport BRGM/RP-54330-FR*, 64p., 27ill., 4 tabl.

Hamm V., Thiéry D., Amraoui N., Bézèlques-Courtade S.(2007) : Modélisation hydrodynamique diphasique des écoulements souterrains de Grande-Terre, *Rapport BRGM/RP-55039-FR*, 128 p., 34 ill., 7 ann.

Petit V. 1996 : Les aquifères littoraux de France métropolitaine, *BRGM RP-39298-FR*, 120p. 36 fig., 1 ann.

Vittecoq B., Brugeron A., Lachassagne P., Mathieu F. (2007) : Localisation du biseau salé sur la nappe du Lamentin : apport de la méthode géophysique par panneau électrique. *Rapport BRGM/RP-55554-FR*, 77p., 10ill., 4 ann.

6. Contribution à la fiche n°8 : impact du changement climatique sur les vagues

Une contribution du BRGM a été ajoutée à la fiche rédigée par Météo-France. Cette contribution est détaillée dans ce chapitre.

6.1. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES VAGUES

Les changements potentiels des régimes de vagues sont très importants à prendre en compte car la morphologie des côtes sableuses dépend fortement de la direction des vagues, de leur hauteur et de leur période. L'énergie d'une vague est en effet proportionnelle au carré de sa hauteur multiplié par sa période.

Pour obtenir un champ de vagues, la solution naturelle est d'appliquer un champ de vent à un modèle hydrodynamique pour générer les vagues par le vent. Cette méthode est utilisée systématiquement dans les ré-analyses car les vents sont assez fiables, ayant bénéficié de nombreuses assimilations de données. En sortie des modèles climatiques, cependant, la fiabilité des champs de vents est moindre que celle des champs de pression. Aussi, la méthode utilisée par Wang et Swail (2001 et 2006) pour obtenir des prédictions de vagues a consisté à passer directement des données de pression atmosphérique (SLP) à celles de hauteur de vagues en utilisant des modèles de régression ou descente d'échelle. En effet, les ré-analyses de longues séries temporelles de SLP et Hs (hauteur significative des vagues) montrent que leurs modes de variabilité sont fortement corrélés.

Dans Wang et Swail (2004), une relation de régression entre SLP et Hs a été établie et validée avec la base de données NCEP/NCAR (1958-1997) en Atlantique nord. Le modèle climatique canadien CGCM2 a donné des prévisions de SLP de 1990 à 2100 pour trois scénarios d'émission différents : IS92A, A2 et B2. En supposant que la relation de régression reste la même entre SLP et Hs, les projections de Hs sont déduites de celles de la SLP. En 2006, Wang et Swail effectuent le même travail à partir des données ERA40 pour produire des projections mondiales pour les trois mêmes scénarios. Les variations de Hs semblent correspondre aux variations des trajectoires de cyclones extratropicaux et tropicaux : les zones où la moyenne et les extrêmes de Hs augmentent sont les mêmes qui voient l'intensité des cyclones augmenter et celles où Hs diminue auraient moins de cyclones intenses dans un climat modifié. En 2020 et 2050, les variations calculées au large des côtes françaises métropolitaines ne sont pas significatives. Elles le deviennent à la fin du 21^{ème} siècle. Les comparaisons suivantes valent pour un climat représentatif de 2080-2100 par rapport à un climat représentatif de 1990-2000.

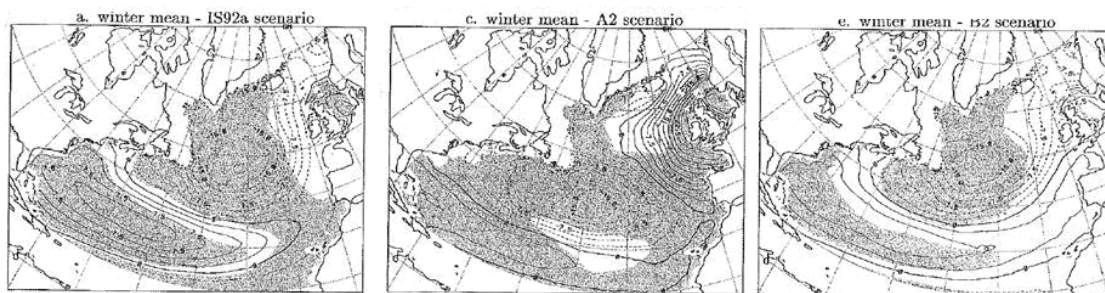


Figure 7 : Variation de Hs (en cm entre 1990 et 2080) en Atlantique nord pour les 3 scénarios combinés en hiver. Les zones grisées indiquent les variations significatives. Source : Wang et Swail, (2006)

Pour tous les scénarii d'émissions envisagés, la moyenne des Hs tend à augmenter en automne et encore plus en hiver (c.f. Figure 7) pour l'Atlantique Nord-Est. Plus le scénario est fort, plus l'augmentation est importante. Ainsi, l'augmentation pour un scénario A2 est plus forte que pour un scénario B2. Les plus fortes augmentations ont lieu au Nord (dans la mer du Nord et la mer de Norvège). La répartition des augmentations n'est pas la même pour les scénarios d'intensité similaires : pour A2, les changements sont plus importants au Nord Est (+22,5 cm max) et pour le scénario IS92A au Sud Ouest (+7,5 cm max). Au milieu de l'Atlantique, la diminution de Hs est systématique (jusqu'à 15 cm). Au large des côtes françaises, l'augmentation a lieu pour les trois scénarios en automne et en hiver mais n'est pas toujours significative sauf pour le scénario A2 en hiver où elle atteint un maximum de 15 cm.

La France métropolitaine a une position intermédiaire et les résultats ne sont pas significatifs pour toutes les variables. On a quand même quelques tendances significatives en hiver (JFM) 2080 : la moyenne de Hs augmenterait d'environ 20 cm.

Il est important de noter que tous ces résultats reposent sur les simulations de Wang et Swail (2006) et qu'ils demandent donc confirmation à partir de nouvelles modélisations.

6.2. BIBLIOGRAPHIE

6.2.1. Vagues et changement climatique

Wang X.L. and V.R. Swail, 2001: *Changes of extreme wave heights in northern hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes*. J. Climate, 14, 2204-2221.

Wang X.L. and V.R. Swail, 2002: *Trends of Atlantic wave extremes as simulated in a 40-year wave hindcast using kinematically reanalysed wind fields*. J. Climate, 15(9), 1020-1035.

Wang, X. L. and V. R. Swail 2006: *Climate change signal and uncertainty in projections of ocean wave heights*, *Clim. Dyn.*, 26, 109-126, doi:10.1007/s00382-005-0080-x.

7. Conclusion

A l'issue de cette étude, les fiches rédigées par le BRGM (n°6, 10, 11 et 13) ont été adaptées puis intégrées dans le « dictionnaire des phénomènes liés au changement climatique et de leurs impacts sur le littoral » par la société STRATYS.

Les principales conclusions sur les différents domaines sont les suivantes :

- pour ce qui concerne l'élévation du niveau marin, les estimations pour la fin du XXI^{ème} siècle convergent actuellement vers des valeurs comprises entre 30 cm et 1 m.
- pour ce qui concerne l'érosion, le facteur principal à prendre en compte est la géomorphologie. De nombreuses incertitudes demeurent quant-à la quantification des effets induits par une élévation du niveau marin sur les plages, les marais et dans une moindre mesure les falaises de roches tendres.
- pour ce qui concerne la submersion temporaire lors de tempêtes, des modalisations numériques relativement précises sont possibles si l'on fait l'hypothèse que la morphologie évoluera peu dans le futur. Dans ce cas, il est nécessaire de disposer de données numériques d'élévation d'une précision équivalente à celle du LiDAR aéroporté (soit de l'ordre de 20 cm en erreur quadratique moyenne)
- pour ce qui concerne les intrusions salines dans les aquifères, l'importance relative de l'élévation du niveau marin vis-à-vis d'autres paramètres géomorphologiques, hydrogéologiques et hydrodynamiques devrait être étudiée. Des études complémentaires seraient utiles, notamment une synthèse des connaissances actuelles et la mise en place de modélisations hydrogéologiques sur une sélection d'aquifères côtiers emblématiques.
- pour ce qui concerne les vagues, les connaissances actuelles reposent sur les travaux de Wang et Swail uniquement. Il est nécessaire d'effectuer d'autres modélisations prenant en compte des modélisations climatiques de Météo-France et d'autres organismes. Ceci fait l'objet actuellement d'une thèse en partenariat entre le BRGM et Météo-France (2008-2011).

Ce travail met en évidence en premier lieu le besoin de travaux de recherche sur les impacts possibles du changement climatique sur le littoral, mais aussi, plus généralement, sur la question de la caractérisation des mouvements du trait de côte sur le long terme pour des emprises spatiales régionales à nationales. A titre d'exemple, on peut noter que la question des interactions entre processus de long terme (quelques dizaines à une centaine d'années) et processus de court terme (tempêtes) et de leurs effets sur l'érosion pourrait faire l'objet d'une étude spécifique.

D'autre part, la méconnaissance de ces processus de long terme met en relief le besoin d'acquisitions pérennes d'observations et de mesures dans tous les domaines liés au domaine littoral, et notamment en océanographie et morphodynamique côtière, en topographie fine, en marégraphie, en sédimentologie et en géomorphologie. Les interrogations actuelles sur le changement climatique et ses effets nécessitent de fait l'accès à des séries temporelles longues, typiquement de plusieurs dizaines d'années.

Enfin, la question de l'adaptation au changement climatique dans un contexte où ses impacts potentiels demeurent largement incertains doit être traitée indépendamment. Des stratégies adaptées à un haut degré d'incertitudes sont généralement citées, notamment les stratégies d'actions sans regrets, qui conduisent a-minima à réduire les risques côtiers actuels. Si ces stratégies constituent une solution de court terme pertinente, des stratégies de plus long terme, à l'échelle de temps du changement climatique d'origine anthropique, demandent à être explorées.



**Centre scientifique et technique
Service RNSC/RIC**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34