



Dynamique des systèmes littoraux et des milieux marins côtiers

Synthèse

Octobre 2012

SOMMAIRE

1.	SYNTHESE	3
2.	INTRODUCTION	5
2.1.	LES ALEAS COTIERS EROSION ET SUBMERSION ACTUELS	5
2.2.	LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ALEAS COTIERS EROSION ET SUBMERSION MARINE	6
2.3.	POSITIONNEMENT DU LOT 6 DU PROJET EXPLORE 2070	7
2.4.	OBJECTIF DU PROJET	9
3.	METHODES, DONNEES, ECHELLES SPATIALES	11
3.1.	METHODE	11
3.2.	LES ECHELLES SPATIALES	12
3.3.	DONNEES	13
	QUESTIONS-REPONSES SUR LA METHODE UTILISEE :	13
4.	RESULTATS : APPORTS ET LIMITES	16
4.1.	ECHELLE NATIONALE	16
4.2.	ECHELLE REGIONALE (ZOOMS)	18
4.3.	IMPLICATIONS POUR LES RISQUES COTIERS	21
5.	DISCUSSION	24
5.1.	AVANTAGES DE L'APPROCHE	24
5.1.	LIMITES DE L'APPROCHE	24
5.2.	IMPLICATIONS POUR L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	25
6.	CONCLUSION	28
7.	BIBLIOGRAPHIE	29
8.	ABBREVIATIONS	35

1. SYNTHESE

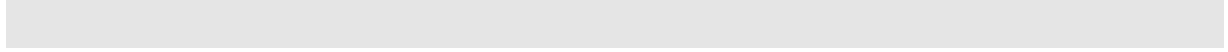
Le projet EXPLORE 2070, piloté par le MEDDE (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie) traite de « L'élaboration et évaluation des stratégies d'adaptation au changement climatique en France face à l'évolution des hydro-systèmes et des systèmes côtiers à l'horizon 2050-2070 ». Au sein de ce projet, le lot 6 s'attache essentiellement à étudier et caractériser la dynamique des systèmes littoraux et des milieux côtiers, plus particulièrement en termes d'érosion, et de submersion marine. La submersion marine peut être permanente, c'est-à-dire résultant en un gain de la mer sur la terre, ou temporaire, c'est-à-dire résultant en une inondation pouvant aller de quelques minutes à quelques jours. La question des intrusions d'eau salée dans les aquifères côtiers est abordée par le lot 2 « Eaux souterraines ».

Le travail du lot 6 est centré sur la caractérisation des enveloppes possibles des aléas côtiers et de leur évolution avec le changement climatique. Les enjeux, la vulnérabilité et le risque étant abordés dans le lot 7. Le lot 6 apporte également une contribution à l'élaboration des stratégies d'adaptation pour la réduction du risque dans les milieux côtiers sous forme de conseils et de propositions faisant référence à des travaux déjà existants sur le sujet.

La méthode mise en place par le lot 6 a permis de produire des cartes de la vulnérabilité de zones côtières aux aléas érosion et submersion à partir de scénarios de changement climatique, à l'horizon 2070. Le principal avantage de cette méthode réside dans sa faculté d'aider l'utilisateur à déterminer les poids relatifs des différents critères utilisés pour la cartographie de la vulnérabilité du territoire. Deux scénarios contradictoires (avec 0 et 1m d'élévation du niveau marin) ont été utilisés. L'application de notre méthode dans le lot 6 du projet Explore 2070 à l'échelle régionale est cohérente avec la demande de procéder à une analyse de la vulnérabilité des territoires au niveau des Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE) au niveau des régions administratives.

Une approche pour déterminer des orientations relatives à l'adaptation est proposée. Elle intègre des résultats issus des travaux du lot 6 ou des travaux analogues, issus par exemple de groupe de travail régionaux en charge de travailler sur l'adaptation au changement climatique des zones côtières. Dans les étapes suivantes du projet Explore 2070, le groupe « Adaptation » pourrait, à titre exploratoire, utiliser les résultats du lot 6 selon l'approche proposée. Ce rapport de synthèse pourrait également être transmis aux groupes régionaux actuellement en charge de la mise en œuvre des volets « adaptation » des SRCAE, ce qui permettrait d'évaluer

la transposabilité des développements méthodologiques du projet Explore 2070 au niveau régional.



2. INTRODUCTION

2.1. LES ALEAS COTIERS EROSION ET SUBMERSION ACTUELS

Les risques côtiers sont une préoccupation générale dans les zones littorales en raison de leurs enjeux économiques, structurels, sociaux et environnementaux. Dans de nombreux pays et notamment en France, l'attractivité de ces espaces a pour conséquence un accroissement démographique qui accentue les risques sur le littoral.

Ainsi, en 50 ans en Europe, la population établie dans les municipalités côtières a plus que doublé pour atteindre 70 millions d'habitants en 2001. Cette tendance perdure. (EuroSION 2004). Les côtes françaises sont tout particulièrement concernées par deux types d'aléas : d'une part la submersion temporaire liée aux ondes de tempêtes, d'autre part l'érosion, qui affecte en premier lieu les falaises meubles et les plages. Les intrusions salines dans les aquifères (Strack, 1976 ; Petit, 1996 ; Frissant et al., 2005 ; Werner et al., 2009 ; Watson et al., 2010, Döfliger et al., 2010, Chang et al., 2011) sont un troisième type d'aléa, abordé par le lot 2 « Eaux Souterraines » du projet Explore 2070.

L'érosion du trait de côte s'exerce tout particulièrement sur les plages et les falaises meubles. Elle induit trois types d'effets :

- (1) la perte de terrain,
- (2) la fragilisation par érosion de défenses côtières naturelles (ex. dunes) ou artificielles (ex. digues en terre) protégeant le territoire des submersions marines,
- (3) la sape d'ouvrages de protection contre l'érosion ou contre la submersion par affouillement.

L'érosion est un processus de géodynamique externe résultant de changements morphologiques induits par un transport de matériaux. Les causes de tels changements morphologiques sont multiples (Tableau 1) : disponibilité de sédiments, exposition aux vagues et aux surcotes, effets de l'anthropisation du littoral... Les effets du changement climatique constituent un facteur supplémentaire s'exerçant sur des échelles de temps longues (plusieurs décennies à plusieurs centaines d'années).

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 tempêtes Lothar (1999) puis Xynthia en 2010 (Pedreros et al. 2010 ; Bertin et al., 2011) ont récemment marqué les esprits. En Mer du Nord, les

submersions marines consécutives à la tempête du 1 février 1953 (environ 2000 morts) ont motivé le plan Delta en faveur de la prévention des submersions. Les structures institutionnelles qui ont été mises en place aux Pays-Bas à cette époque sont aujourd'hui considérées comme un facteur de résilience au changement climatique. En effet, les processus de décision qui ont été mis en place alors ont la capacité aujourd'hui d'imaginer des stratégies d'adaptation au changement climatique et de les mettre en œuvre (Voir par exemple : Horstman et al., 2009). Dans les Départements d'Outre-Mer, on peut citer le cyclone de 1928 en Guadeloupe qui a été caractérisé par une submersion du « Petit Cul-de-sac marin », et a causé 1200 morts. A la Réunion, la houle cyclonique de Gamède (2007) mais aussi des épisodes de houle australe peuvent avoir des effets destructeurs (Lecacheux et al., 2012).

Echelles spatiales et temporelles	Causes et facteurs naturels	Causes et facteurs anthropiques
Très long terme : Echelle temporelle : de plusieurs centaines à des milliers d'années Echelle spatiale ~100km	- disponibilité de sédiments - variations du niveau marin - changements climatiques - paléomorphologie (géomorphologie héritée)	- changements climatiques anthropiques - anthropisation des rivières et des bassins versants - ouvrages de protection - gestion des zones côtières
Long terme : Echelle temporelle : de quelques dizaines d'années à environ un siècle Echelle spatiale ~10-100km	- élévation du niveau marin tel que mesuré à la côte (prenant en compte d'éventuelles subsidences) - variations de climat régional - le transport sédimentaire « naturel »	- anthropisation des rivières et des bassins versants - ouvrages de protection - gestion des zones côtières - prélèvement des ressources naturelles (la subsidence)
Moyen terme : Echelle temporelle : de quelques années à plusieurs décennies Echelle spatiale ~1-5km	- variations du climat des vagues - cycles des barres sableuses - événements extrêmes	- ouvrages dans la zone de surf - rechargements de plages
Court terme : Echelle temporelle : des heures à des années Echelle spatiale ~10m-1km	- houles, marées et surcotes - variations climatiques saisonnières	- ouvrages dans la zone de surf - rechargements de plages

Tableau 1 Causes et facteurs des changements morphologiques côtiers à différentes échelles spatiales et temporelles. Source : Stive et al. (2002).

2.2. LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ALEAS COTIERS EROSION ET SUBMERSION MARINE

Au cours du XXIème siècle, le changement climatique exercera une pression supplémentaire

sur les systèmes littoraux par rapport à celle qui existe déjà. Il contribuera ainsi à aggraver les aléas côtiers érosion et submersion marine (Nicholls et al., 2007). Outre les effets directement liés à l'élévation du niveau marin, d'autres changements sont suspectés pouvoir affecter les aléas côtiers : modification des houles, des marées de tempêtes, de l'acidité des océans (fragilisation des coraux), de certaines caractéristiques régionales de tempêtes ou de cyclones. En particulier, les changements potentiels de direction des houles (Dodet et al., 2010 ; Le Cozannet et al., 2011 ; Charles et al., 2012a ; Charles et al., 2012b, Thiébot et al., 2012) pourraient jouer un rôle dans le transport sédimentaire côtier, même si les changements hauturiers (au large) sont atténués par la réfraction bathymétrique en zone littorale (Charles et al., 2012b).

L'élévation du niveau marin (voir par exemple : Douglas, 2001 ; Hogate et al., 2004 ; Church et al., 2004 ; Holgate, 2007 ; Cazenave et Llovel, 2010 ; Cazenave et Remy (2011) ; Church et al., 2011, Meyssignac et al., 2011) demeure cependant le facteur le plus préoccupant. Nicholls et al. (2007) prédisent que l'élévation du niveau moyen de la mer engendrera des submersions permanentes de zones basses et que les niveaux marins extrêmes actuels seront atteints plus fréquemment qu'aujourd'hui. Néanmoins, les effets locaux sont incertains et dépendent de la géomorphologie littorale, de l'usage des sols et de la stratégie de défense côtière. Il n'est donc pas possible de traiter de cette question de manière globale et des études prenant en compte les spécificités de chaque territoire sont donc nécessaires.

2.3. POSITIONNEMENT DU LOT 6 DU PROJET EXPLORE 2070

Les aléas considérés dans cette étude sont les aléas côtiers suivants : submersion permanente ou temporaires de zones basses, érosion marine ainsi que les processus associés suivants : pression des vagues sur les infrastructures, affouillement, mise en mouvement de débris. Aux cours d'événements de tempêtes, ces processus interagissent entre eux, constituant une menace globale aux biens et aux personnes. Ce projet se propose d'évaluer cette menace dans sa globalité, à l'échéance 2070 et dans deux scénarios : avec ou sans élévation du niveau marin.

L'un des outils à disposition pour appréhender la vulnérabilité d'un territoire au changement climatique est la réalisation de cartes représentant la vulnérabilité physique des systèmes côtiers à l'érosion et à la submersion marine dans le contexte de l'élévation du niveau marin (Gornitz et al. 1997, Vinchon et al., 2010). Cependant, bien qu'il soit pratiquement certain que l'élévation du niveau marin s'accélère au cours du XXIème siècle, les quantifications de cette aggravation qui ont été proposées demeurent peu fiables (Yates et al., 2011). A de rares

exceptions (Zhang et al. 2004 ; Garcin et al., 2008 ; Gutierrez et al., 2010 ; Yates et Le Cozannet, 2012), les études portent sur des sites locaux bien déterminés, en ayant recours à des lois semi-empiriques (Bruun. 1962) dont le caractère systématique et déterministe sont contestés (Cooper et Pilkey, 2004).

A l'échelle nationale et régionale, les évaluations de la vulnérabilité côtière sont effectuées à partir d'un certain nombre de critères : topographie, géomorphologie, etc. Ces approches sont appelées multicritères. À titre d'exemple, l'indice de vulnérabilité des zones côtières développées par Gornitz et al. (1994) est une fonction des observations de l'érosion historique, des pentes de plage, des marées, des observations et des prédictions des variations du niveau de la mer, de l'exposition aux ondes de tempêtes et de la géomorphologie côtière. Le projet Eurosion (2004) propose une agrégation d'autres indicateurs. Cependant, ces indicateurs peuvent systématiquement être regroupés en 3 catégories :

- les facteurs d'état, représentant la sensibilité du territoire (topographie, géomorphologie) ;
- les facteurs de forçages (ici des facteurs marins), représentant l'agression sous forme de forçages (vagues, surcotes) ou de pressions (élévation du niveau marin) ;
- des éléments de contexte représentant la dynamique sédimentaire locale : la zone subit-elle un déficit chronique de sédiments liée par exemple à des changements de l'usage des sols ou aménagements hydrauliques sur les fleuves ?

Il existe plusieurs combinaisons de critères permettant d'évaluer la vulnérabilité des zones côtières. Les différentes méthodes sont choisies selon l'échelle de travail, les données disponibles et les entités sur lesquelles porte l'analyse. Dans le projet Explore 2070, les indicateurs choisis à l'échelle nationale et à l'échelle régionale ne sont donc pas les mêmes.

Une fois les indicateurs choisis, il faut définir comment les différents critères seront normalisés, pondérés et agrégés en un indice de vulnérabilité unique. Gornitz et al. (1994) ont choisi une agrégation géométrique pour le « Coastal Vulnerability Index » (CVI), en raison de la robustesse des résultats lorsque des données manquent. D'autres auteurs (Vinchon et al., 2006) proposent d'intégrer le dire d'expert dans cette évaluation.

Dans le projet Explore 2070, une méthode de cartographie décisionnelle multicritère est utilisée. Elle permet d'allier les avantages des deux approches issues de Gornitz et al. (1994) et de Vinchon et al. (2006), mais aussi de proposer une spatialisation de la vulnérabilité des territoires. La méthode utilisée est une adaptation d'une approche par indicateurs prenant en compte le dire d'expert. Elle permet de

palier à l'insuffisante explicitation du dire d'experts dans les réalisations précédentes. Elle est structurée par l'Analytical Hierarchy Process (Saaty, 1981 et 2000). L'application de cette méthode a pour objectif de donner des éléments de réponse complémentaire à des études menées plus localement (par exemple dans le cadre de plans de prévention des risques littoraux) en permettant leur intercomparaison et leur normalisation. Elle permet aussi d'envisager des évaluations préliminaires qui pourraient être utiles pour des estimations de la vulnérabilité du territoire recommandées pour les Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE) (Figure 1).

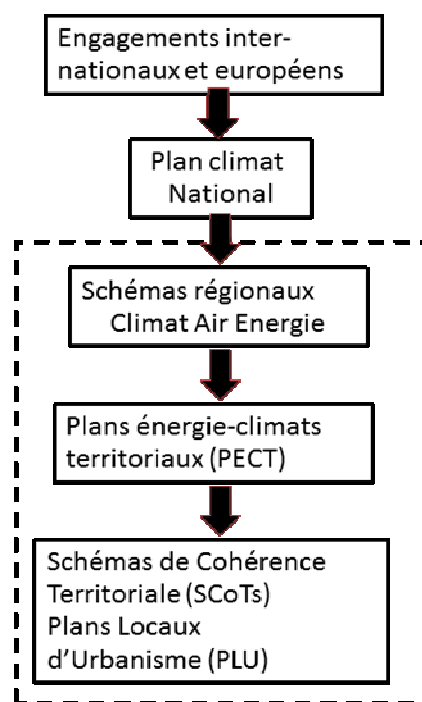


Figure 1 : Dispositif mis en place par la loi « Grenelle II » concernant l'atténuation et l'adaptation au changement climatique ; Le lot 6 du projet Explore 2070 ambitionne de fournir une information au niveau des Schémas Régionaux Climat Air Energie (SRCAE)

2.4. OBJECTIF DU PROJET

Le lot 6 du projet Explore 2070 a ainsi pour objectif de combler une lacune : la production d'informations cartographiques aux échelles régionales et nationales pour appréhender les impacts potentiels du changement climatique et termes d'érosion et de submersion marine. La méthode de cartographie choisie est une analyse multicritères, intégrant le dire d'expert, qui est structurée par une méthode de Cartographie Multicritère Décisionnelle (CMD) : l'Analytical Hierarchy Process (AHP, Saaty, 1981 et 2000). L'échéance retenue est 2070, pour deux scénarios : avec élévation du niveau marin (1m) ou sans élévation du niveau

marin. L'analyse multicritère mise en œuvre définit ainsi une fonction de vulnérabilité, recevant en entrée un certain nombre de critères, et proposant en sortie un indice de vulnérabilité indiquant comment l'entité choisie se situe vis-à-vis des autres : est-elle plus ou moins vulnérable que telle autre entité ?

Ce rapport de synthèse présente successivement :

- les sites d'étude, les données et les méthodes
- Les résultats sur deux zooms (Languedoc-Roussillon et Réunion) et à l'échelle nationale
- Une discussion sur les avantages et les limites de l'approche proposée, suivie d'une proposition de méthode pour l'utilisation de ces données pour aider les processus d'adaptation

3. METHODES, DONNEES, ECHELLES SPATIALES

3.1. METHODE

L'Analytical Hierarchy Process (AHP) est un outil qui permet de lever certaines difficultés des approches précédentes, notamment celles relatives au besoin d'explicitation du dire d'expert. Elle est ici intégrée dans une démarche de cartographie multicritères, afin de cartographier la composante physique de la vulnérabilité de la zone côtière à l'érosion et la submersion dans le contexte des variations du niveau marin.

La mise en œuvre de la méthode comprend les phases suivantes :

- Zonage initial : détermination du territoire sur lequel porte l'analyse
- modélisation du problème de manière hiérarchique à partir des critères de forçage, d'état et de contexte permettant d'évaluer l'aléa côtier ;
- évaluation par dire d'expert: importance relative entre les différentes composantes et sous-critères déterminés ;
- attribution des scores aux entités territoriales choisies ;
- synthétiser le jugement, comprenant un retour de l'expert sur la cartographie générale et sur les raisons qui ont motivé tel ou tel choix.

D'une manière générale, les cartes de vulnérabilité physique ne peuvent pas être validées stricto-sensu: elles représentent l'état actuel des connaissances, et sont considérées comme valables et validées lorsqu'elles satisfont ceux qui les ont produites et les experts ayant une bonne connaissance du terrain. Une étape importante de la cartographie de la vulnérabilité physique est donc l'examen critique des résultats par des experts.

Un groupe de travail a été constitué pour examiner les cartes de vulnérabilité physique. Ses membres ont été invités à commenter le résultat final et à expliquer dans quels cas ils trouvent de la vulnérabilité physique est sur ou sous-estimée. Cette étape a permis d'améliorer la cartographie finale, par exemple en ajustant les scores affectés à certaines formations géologiques. Cependant, il faut souligner que cette étape ne permet pas à l'expert de constituer une nouvelle carte à sa guise car le résultat demeure contraint par les données de bases et la nécessité d'appuyer le jugement par des données, observations ou modèles.

3.2. LES ECHELLES SPATIALES

Le projet comporte une étude à deux emprise spatiales : échelle nationale métropolitaine (ci-après échelle nationale) et échelle régionale pour deux « Zooms » : Languedoc-Roussillon et La Réunion.

L'échelle nationale comprend l'ensemble du littoral de France métropolitaine. Les côtes présentent des profils géomorphologiques très diversifiés (falaises plus ou moins érodables, marais côtiers, plages, littoraux anthropisés) et plusieurs façades maritimes (Mer du Nord, Manche, Atlantique et Méditerranée) induisant des expositions différentes aux vagues, surcotes et marées.

Le littoral de la région « Languedoc-Roussillon » est constitué majoritairement par des plages sableuses (90% du linéaire côtier), souvent étroite et raides, avec des systèmes de barres submergées. Elles sont souvent associées à des systèmes de dunes basses (de moins de 5m) et de « lidos ». Ceux-ci séparent les lagunes et les marais de la mer. Ils sont traversés par des chenaux étroits (« graus ») qui permettent l'échange de l'eau avec la mer. Ces graus, initialement mobiles, ont pour la plupart été fixés par l'homme. Les étangs sont bordés de zones humides, plus ou moins transgressifs sur un arrière-pays constitué de plaine alluviales quaternaires, au pied des formations mésozoïques calcaires. La côte sableuse est localement interrompue par des caps rocheux composés de basaltes et de calcaires cénozoïques (Agde, Cap Leucate) ou de calcaires mésozoïques (Sète). Entre l'Espagne et Collioure, on observe des falaises rocheuses paléozoïques entrecoupées de plages sableuses.

La Réunion est une île volcanique dont la base repose par 4000 m de fond sur le plancher océanique. Son littoral s'étend sur un linéaire d'environ 250 km. La morphologie côtière est dominée par des falaises de basalte entrecoupé de de plages de galets. La zone côtière est approvisionnée en sédiments alluviaux par les grandes rivières notamment celles drainant les cirques. Les plages sont essentiellement constituées de matériaux volcaniques sauf dans le sud-ouest de l'île où un récif frangeant s'est développé. L'île est située en zone cyclonique, mais est aussi exposée aux houles australes qui peuvent générer des dégâts comme en mai 2007. Enfin, les précipitations sont particulièrement importantes, notamment à l'est, favorisant la dynamique sédimentaire des rivières et contrôlant pro-parte l'évolution du littoral aux alentours de leurs embouchures.

3.3. DONNEES

Les données utilisées à l'échelle nationale sont les suivantes :

- géomorphologie côtière (Données Eurosion) et trait de côte HistoLitt (SHOM / IGN);
- topographie (Couche zones basses du Cetmef, complétée avec des données IGN ;
échelle de restitution 1 :100 000) ;
- lithologie au 1 : 000 000 ;
- occupation des sols (BD Corine Land Cover, 1:100 000) ;

A l'échelle des Zooms, des données supplémentaires sont utilisées:

- base de données hydrologique (BD Carthage compatible avec l'échelle 1 :50000) ;
- géologie au 1 : 50 000 (BRGM)
- en Languedoc-Roussillon : données de zonage de l'extension des aléas côtiers érosion
et accrétion (issues du projet RNACC 2 – 2011)
- à la Réunion : données de géomorphologie côtière (De La Torre et al., 2004)

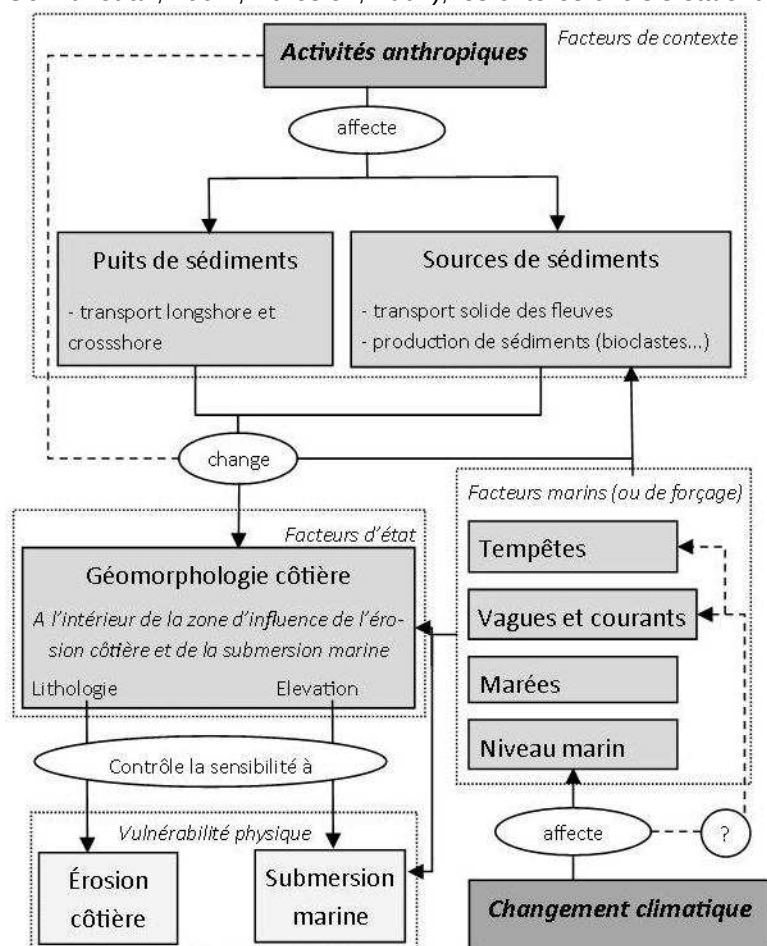
L'hypothèse retenue concernant l'élévation du niveau marin a été de privilégier deux scénarios contradictoires l'un avec et l'autre sans élévation du niveau marin. Des scénarios intermédiaires peuvent être conçus en imaginant une carte intermédiaire entre les deux scénarios choisis. Meyssignac et al. (2011a) ont récemment mis en évidence la complexité de l'exercice de modélisation des variations du niveau marin passées en Méditerranée. Pour le futur, la question est encore plus délicate : Tsimplis et al. (2008) ont modélisé une situation dans laquelle la composante stérique des variations du niveau marin pourrait être très faible sur les côtes françaises en 2100. Par ailleurs, la question de l'évolution future du transport des masses d'eau au niveau du détroit de Gibraltar reste un sujet de recherche. Ceci justifie la prise en compte de scénarios larges, au moins en Méditerranée.

QUESTIONS-REponses SUR LA METHODE UTILISEE :

Comment se justifient les critères utilisés pour la méthode AHP à l'échelle nationale et à l'échelle des zooms (zoom Languedoc et zoom La Réunion) ?

La figure ci-dessous présente schématiquement les relations entre les différents facteurs et processus contrôlant la vulnérabilité physique du littoral. Ces critères sont donc choisis car ce sont ceux qui expliquent la mobilité du trait de côte aux échelles de temps pluri-décennales.

Ils peuvent être évalués ou approchés à l'aide d'une donnée existante : par exemple, la sensibilité à l'érosion de la lithologie peut être évaluée à partir d'une carte lithologique ou géologique, avec l'aide d'un géologue spécialiste des formations récentes. Dans certains cas (effets des activités anthropiques sur la géomorphologie côtière, via des terrassements par exemple), les changements ne sont pas pris en compte car non prédictibles. Notons que dans des études précédentes (Exemple : Gornitz et al., 1991 ; EuroSION, 2004), les critères choisis étaient similaires.



Pourquoi travailler sur l'évaluation d'une vulnérabilité physique et non pas sur l'évaluation de deux aléas (érosion et submersion) ?

Les méthodes consistant à évaluer séparément l'aléa submersion puis l'aléa érosion donnent des résultats incertains (Voir Yates et al., 2011). In-fine, elles ne permettent pas de savoir si telle zone sera effectivement affectée ou non par une érosion ou une submersion aggravée avec un degré de confiance suffisant, ce qui limite la capacité de ces méthodes à fournir une aide à la décision. On note également que les processus d'érosion et de submersion interagissent aux échelles de temps pluri-décennales : par exemple, si la bathymétrie proche se creuse, les caractéristiques des vagues à la côte seront différentes, modifiant ainsi l'aléa submersion.

Dans l'étude Explore 2070, le Lot 6 a fourni une base de données SIG répondant à la question :

« quelle sont les zones côtières les plus sûres (ou les plus dangereuses) au regard de l'aggravation des aléas côtiers érosion et submersion d'ici à 2070 ? ». Contrairement aux approches dans lesquelles on essaie d'évaluer de manière très déterministe chacun des aléas, notre approche se propose ainsi d'évaluer à long terme la vulnérabilité physique des zones côtières à l'érosion et la submersion. "La vulnérabilité physique" signifie ici la «sensibilité de l'environnement physique, des zones côtières elles-mêmes", à des risques d'érosion et de submersion dans le contexte du changement climatique (voir Romieu et al., 2010).

Que représente le classement final ?

Le classement final représente l'importance de la vulnérabilité de chaque entité relativement à toutes les autres. Ainsi, dans le cas des « Zooms », si 3 entités obtiennent les scores 0.1, 0.4 et 0.5, la plus vulnérable sera la 3^{ème}, suivi de la 2^{ème}, puis de la 1^{ère}. On pourra dire également que la vulnérabilité de la 2^{ème} et de la 3^{ème} entité sont relativement proches. Conséquence pratique : dans le cas où l'on souhaite construire une infrastructure de durée de vie longue pour laquelle on souhaite qu'elle soit le plus épargnée possible des aléas érosion et submersion, il sera préférable de l'installer dans l'entité 1. Cependant, une autre entité pourra être préférée si par exemple, pour des raisons économiques, on souhaite que l'infrastructure soit plus accessible. Dans ce cas, les coûts de l'adaptation de l'infrastructure à l'aggravation des aléas érosion et submersion pourront être évalués dans le cadre d'une analyse coûts-avantages.

4. RESULTATS : APPORTS ET LIMITES

4.1. ECHELLE NATIONALE

A l'échelle nationale, nous cherchons à apporter des éléments dans la situation suivante : « on cherche à répartir une ressource financière entre différents territoires, pour l'adaptation aux aléas côtiers (érosion et submersion marine), dans une perspective de long terme (pluri-décennale). Quelles sont les entités prioritaires (1) pour le scénario tendanciel et (2) pour le scénario avec prise en compte du changement climatique ? ».

Nous avons initialement proposé d'appliquer la méthode aux régions ou aux départements afin de faire un état des lieux de la vulnérabilité des zones côtières de ces territoires à l'érosion et à la submersion marine dans le contexte du changement climatique. L'avantage de cette approche est de donner une information au niveau de territoires où peuvent effectivement s'exercer une action publique en faveur de l'adaptation. Cependant, le projet Explore 2070 s'est orienté dans une démarche de définition d'entités relativement homogènes sur le plan de leur fonctionnement morphodynamique. Cette approche se justifie par une volonté des différents services publics d'agir au niveau des entités géomorphologiques, afin d'éviter des « seuils » dans l'exercice de prévention des risques naturels. Ainsi, une question de coordination des politiques de prévention se poserait par exemple dans le cas où une zone basse submersible serait partagée entre deux entités administratives.

A l'échelle nationale, l'AHP est appliqué sur 21 entités (ERENs ou Entités de Restitution à l'Echelle Nationale) qui ont été découpées selon des critères géomorphologiques explicités dans le rapport d'étape n°2 du lot littoral (cf. Figure 4). Les ERENs sont définis principalement en prenant en compte en premier lieu la géomorphologie du littoral et de l'arrière-pays et la lithologie.

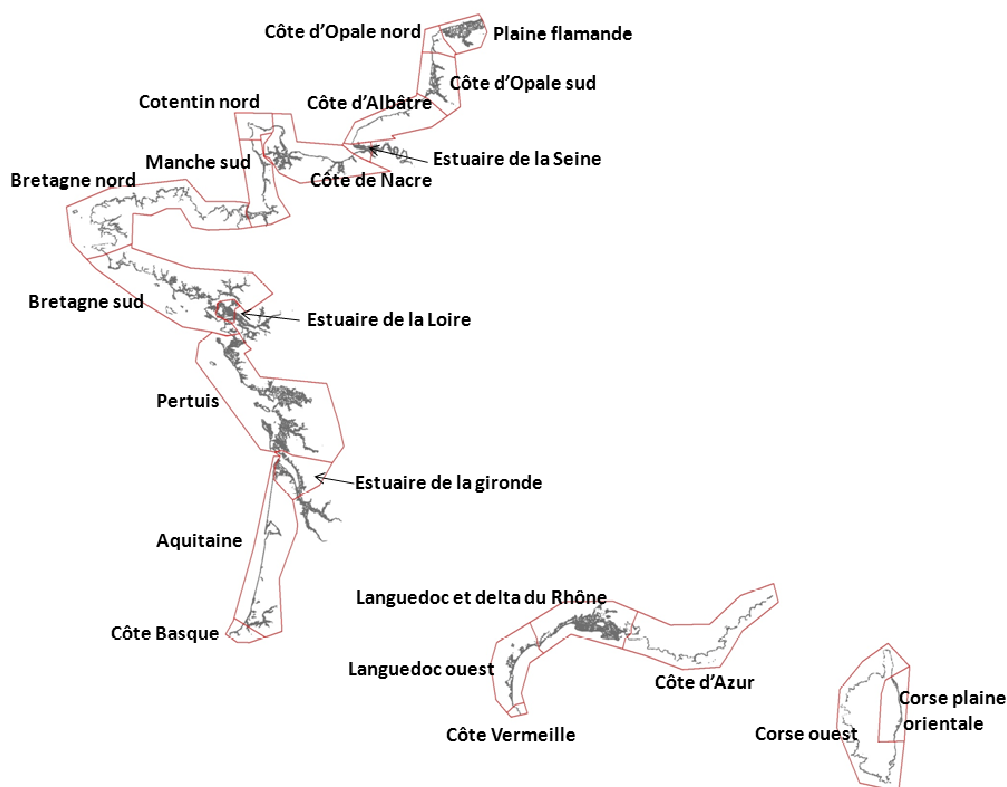


Figure 4: Entités de Restitutions à l'Echelle Nationale (ERENs)

La mise en œuvre de l'AHP a permis de classer, par grandes entités géographiques et pour chaque scénarios (tendanciel et avec changement climatique), les ERENs en fonction de leurs vulnérabilités à l'érosion et à la submersion marine (Figure 5). Dans les deux scénarios, cinq entités ressortent plus particulièrement (scores issus du traitement par AHP > 0.05) : « Pertuis », « Languedoc et Delta du Rhône », « Aquitaine », « Bretagne sud » et « Bretagne nord ». Ces résultats mettent logiquement en évidence la forte vulnérabilité a zones basses très étendues ainsi que les côtes à dominante sableuse. A noter que la valeur de vulnérabilité obtenue pour l'EREN « Perthuis » est largement supérieur à celles de tous les autres ERENs. Cette dominance s'explique principalement par l'étendue des zones basses dans cet ERENs.

Cependant, le classement à l'échelle nationale est directement lié à la segmentation des entités opérée sur des critères géomorphologiques. Les entités qui ressortent de manière prioritaire sont celles qui présentent la plus grande vulnérabilité du fait de leur surface, géologie, géomorphologie et topographie. Or les facteurs d'état (topographie, géomorphologie) sont précisément ceux qui, sur le long terme, déterminent la plus grande partie de la vulnérabilité des entités à l'élévation du niveau marin : en d'autres termes, quels que soient les effets du changement climatique sur les variations du niveau marin, une zone basse telle que les marais vendéens sera toujours plus vulnérable à la submersion marine qu'une côte à falaise telle que

la côte d'Albâtre. Aussi, on observe peu de différences dans les classements avec et sans élévation du niveau marin.

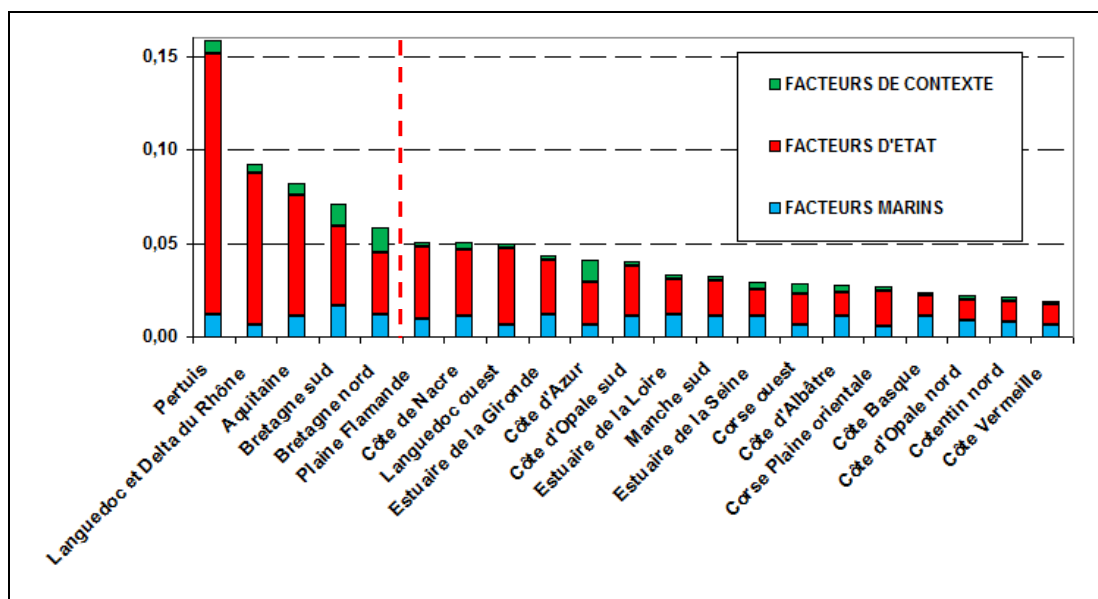


Figure 5: résultat du classement mené à l'échelle nationale (scénario avec élévation du niveau marin) ; L'échelle représente les scores issus du traitement par AHP.

4.2. ECHELLE REGIONALE (ZOOMS)

A l'échelle régionale, les résultats sont stockés dans une base de données qui permet à l'aide de SIG la vulnérabilité physique de la zone littorale. A titre d'exemple, des cartes présentant les résultats sont présentées dans les figures 2 (Zone du Lido de Sète, Languedoc-Roussillon) et 3 (La Réunion), pour les scénarios avec élévation du niveau marin. D'autres cartes sont disponibles dans les rapports finaux des régions Réunion et Languedoc-Roussillon.

Scénario: avec 1m d'élévation du niveau marin

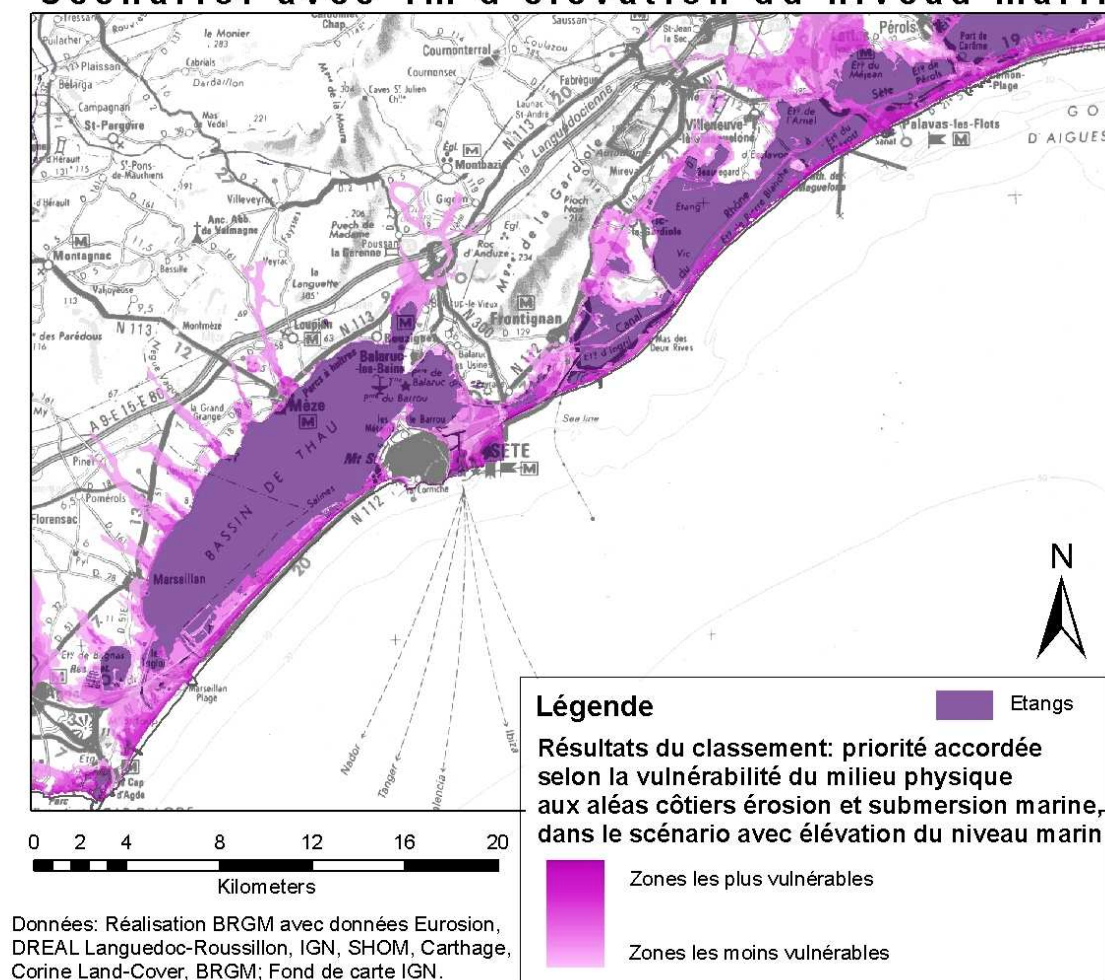


Figure 2: Exemple de résultat pour un scénario « avec élévation du niveau marin » dans la zone du Lido de Sète (Languedoc-Roussillon)

En Languedoc-Roussillon, les deux scénarios (tendanciel et avec élévation du niveau marin), mettent en évidence la vulnérabilité physique plus importante des **zones basses** (par exemple rives des étangs de Sigeon ou de Leucate), des **lidos** (par exemple de Carnon à Frontignan) et des **formations deltaïques** (tout particulièrement en Camargue). Le scénario avec élévation du niveau marin se traduit par des reculs plus importants des plages sableuses que le scénario tendanciel. Les zones basses, notamment situées en bordure des étangs, sont également davantage affectées par l'aléa de submersion marine. Cependant, nos résultats indiquent que même sans élévation du niveau marin, un certain nombre de zones sont vulnérables dans tous les cas, que ce soit en raison de la mobilité naturelle ou anthropogénique du trait de côte ou bien en raison de submersions marines.

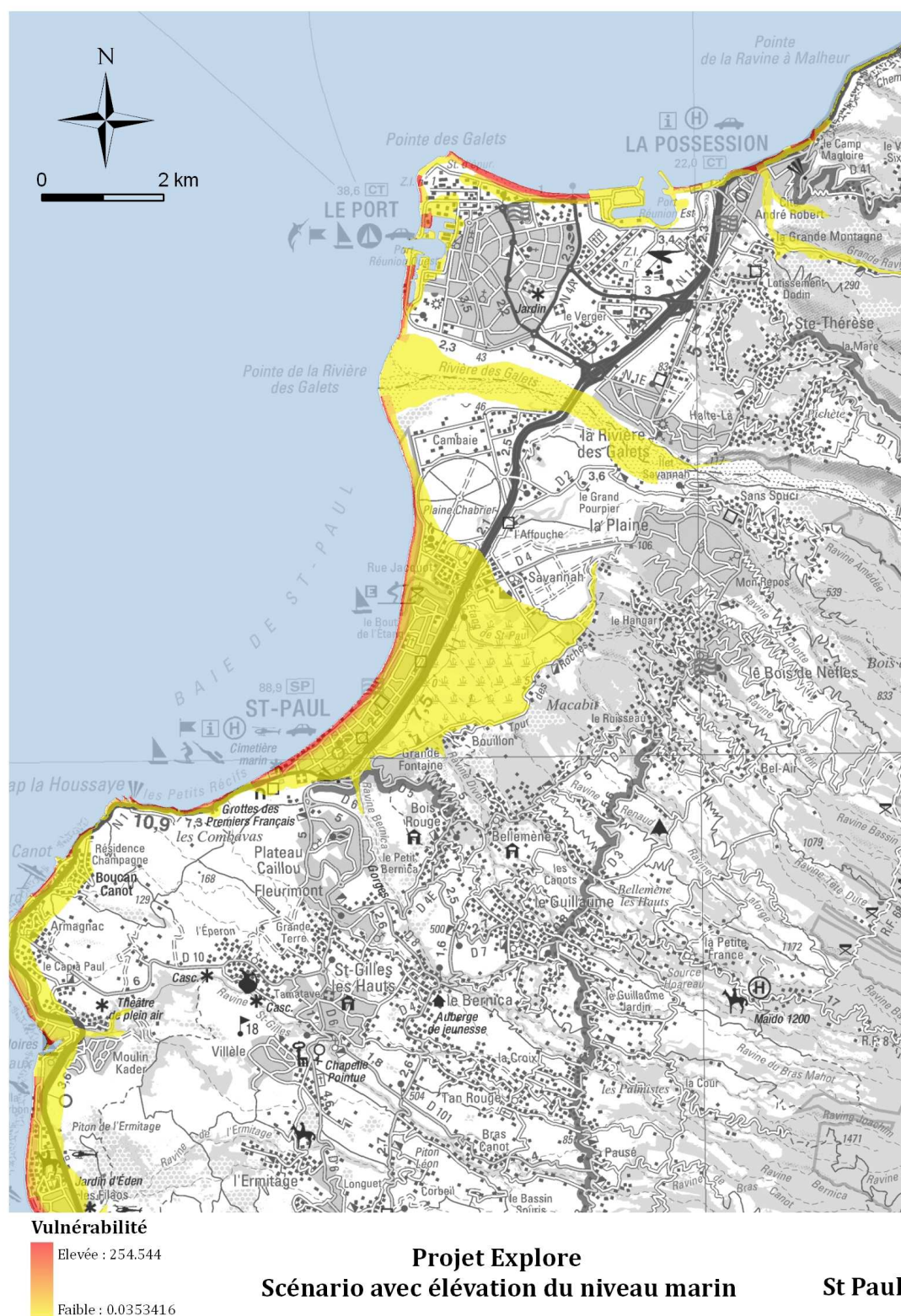


Figure 3: Exemple de résultats à La Réunion (Zone de Saint Paul) dans le cas du scénario « avec élévation du niveau marin.

A la Réunion, les résultats mettent en évidence la vulnérabilité physique de trois zones : Sainte Suzanne au nord-est, Saint Paul au nord-ouest et la zone de l'Etang-Salé au sud. Les risques sont plus importants dans deux premières zones du fait de l'urbanisation et de l'exposition aux vagues cycloniques. Le scénario avec élévation du niveau marin se distingue du scénario tendanciel par un aléa de submersion aggravé dans ces trois zones, ainsi que par une érosion potentielle plus forte des falaises meubles et des plages.

Cependant, les risques littoraux ne sont pas les seuls auxquels les habitants de La Réunion sont exposés. En effet, les aléas induits par les mouvements de terrain ou inondations par débordement de rivières ou même le volcanisme sont également importants dans cette région. La question de l'exposition aux risques côtiers à La Réunion doit donc être évaluée dans un contexte plus large d'approches « multi-aléas » ou « multi-risques » (voir par exemple : Vecchia, 2001 ; Grünthal et al., 2006 ; Douglas, 2007). Ceci suppose un partage large des cartes d'aléa existantes (Le Cozannet et al., 2008). Ce type d'approche permet de favoriser l'implantation d'infrastructures et d'habitations dans des zones où la menace globale est faible, quelle qu'en soit la cause.

4.3. IMPLICATIONS POUR LES RISQUES COTIERS

Ces résultats peuvent être utilisées pour une l'évaluation des risques côtiers. Elle peut se faire par simple confrontation entre les données produites par le lot 6 avec les enjeux existants : personnes, biens, occupation du sol. Le lot 7 a produit ces données, notamment à l'échelle nationale. A titre d'exemple, une évaluation d'une borne supérieure de la population potentiellement concernée par les aléas côtiers en 2070 est présentée dans la figure 6, pour les trois scénarios démographiques suivants:

- Le premier scénario supposant que la population n'augmente pas en zones côtières ce qui sera la conséquence de l'application d'une politique de prévention (Scénario « prévention »),
- Le second est un scénario dans lequel pour chaque EREN, la croissance démographique suit la tendance régionale modélisée par le BIPE (Lot 7 du projet Explore 2070). Nous avons nommé ce scénario scénario de « Croissance modérée »,
- Enfin, le troisième scénario fait l'hypothèse que la zone côtière demeure très attractive jusqu'en 2070. Nous avons dans ce cas doublé le taux de croissance de la population par rapport à la tendance régionale actuelle modélisée par le BIPE. Ce scénario est dénommé scénario « attractif ».

Evaluation d'une borne supérieure de la population exposée aux aléas côtiers en 2070, dans trois scénarios

Population

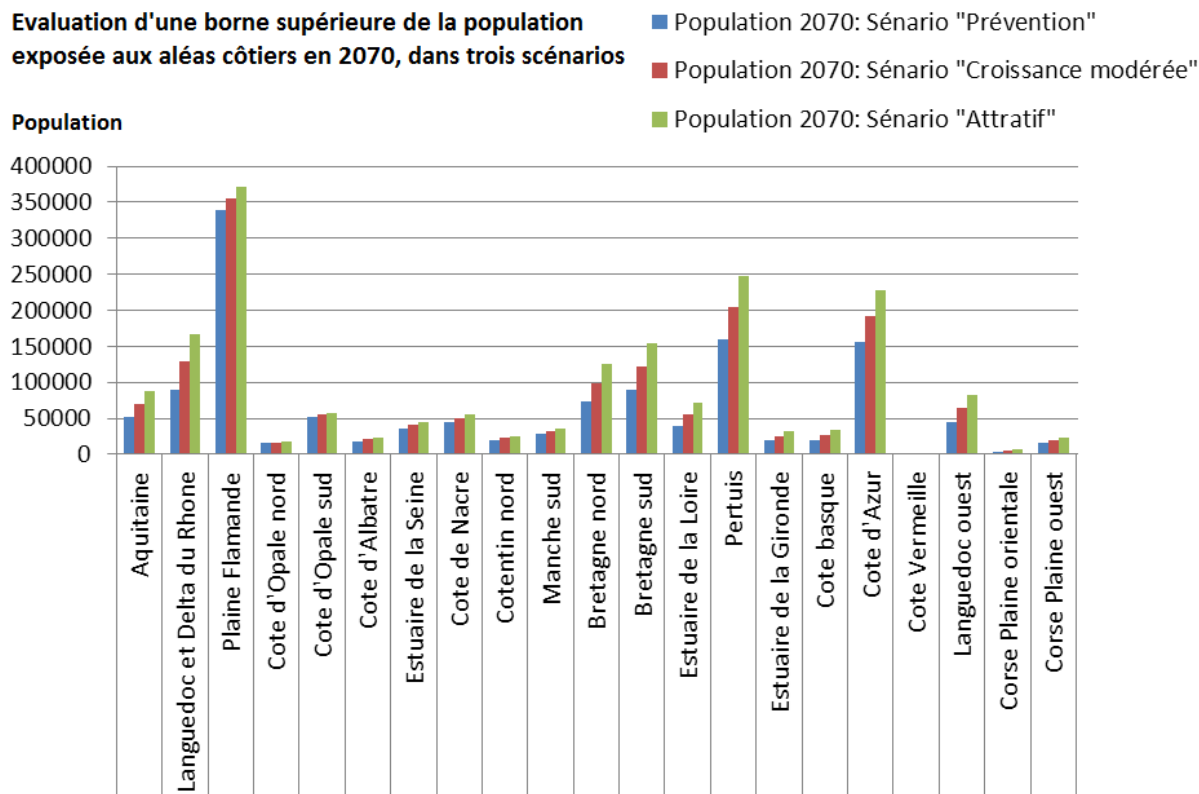


Figure 6: Evaluation d'une borne supérieure de la population en 2070 dans chaque EREN dans trois scénarios démographiques (Données BIPE, INSEE, BRGM).

Ces résultats ne permettent pas de qualifier les risques de manière complète, mais uniquement d'identifier des zones pour lesquelles on pense à-priori que les risques pourraient s'accroître de manière importante. Par exemple, la population est une mesure imparfaite pour évaluer l'exposition des personnes en zones littorales du fait de la variabilité saisonnière liée au tourisme, non prise en compte dans cette étude.

Cependant, les résultats obtenus fournissent des informations utiles en vue de l'adaptation. Ainsi, selon les scénarios démographiques retenus, l'accroissement de la population peut devenir un facteur important de l'augmentation des risques côtiers. Ceci est tout particulièrement vrai dans certaines des ERENs qui ont été classées parmi les plus vulnérables, notamment les Pertuis, la Bretagne (nord et sud) et le Languedoc et delta du Rhône. Un levier de la réduction des risques côtiers dans ces régions semble être une maîtrise de l'accroissement démographique en zones exposées. La question de l'acceptabilité de cette mesure « d'adaptation sans regrets » devra cependant être traitée. Sans qu'il soit possible à ce stade de proposer des approches coûts-bénéfices robustes, ce travail préliminaire ouvre la perspective d'une quantification des parts relatives de l'accroissement de la croissance

démographique et du changement climatique dans l'augmentation des risques côtiers d'ici à 2070.

5. DISCUSSION

5.1. AVANTAGES DE L'APPROCHE

La cartographie multicritères de la vulnérabilité physique des côtes à la submersion marine et l'érosion, basée sur la méthode AHP, apparaît bien adaptée. En croisant des lois simples, en ajoutant différents niveaux d'incertitudes et en exploitant les données existantes, il est possible de réaliser une cartographie relativement détaillée qui rallie pour l'essentiel les experts convoqués, ayant une bonne connaissance du terrain et des effets du changement climatique.

Par ailleurs, comparativement à d'autres méthodes de cartographie multicritères, le cadre donné par l'AHP permet de convertir une information qualitative en information quantitative et de pondérer les différents critères. L'avis d'expert (rarement exprimé de manière quantitative) nous a ainsi semblé plus aisé à intégrer que dans d'autres approches telles que celles proposées par Gornitz et al. (1994) ou Vinchon et al (2009).

Enfin, l'AHP fournit également un cadre qui permet de traiter les incertitudes des méthodes. Ceci est une amélioration significative par rapport aux approches déterministes dans lesquelles un seul taux de recul du trait de côte est calculé en chaque lieu.

5.1. LIMITES DE L'APPROCHE

L'hétérogénéité des données de départ complexifie considérablement le prétraitement nécessaire à l'exercice de cartographie multicritère décisionnelle. Pour la région Languedoc-Roussillon, nous avons rencontré des difficultés importantes relatives :

- au positionnement du trait de côte dans les différentes bases de données (les écarts constatés peuvent atteindre et dépasser 100m, soit les taux de recul retenus),
- à la manipulation de la couche SIG « zones basses » CETMEF qui présentaient notamment des problèmes de géométrie.
- à l'utilisation de la carte géologique vectorisée sur 4 départements différents a mis en évidence le besoin d'harmoniser les légendes (attributs des données vectorisées).
-

A la Réunion, l'hétérogénéité des données a également générée des difficultés bien que les données du trait de côte se soient révélées cohérents entre les différentes sources

d'information.

Une autre limite de l'approche réside dans le nombre d'entités à traiter. En effet, dès que leur nombre augmente fortement, la mise en œuvre de l'AHP devient très complexe. La mise en place d'un programme développé en Matlab pour effectuer ces opérations sur la région Languedoc-Roussillon a nécessité des efforts importants. Par contre, , une fois cet outil mis en place, il a été relativement aisé de l'adapter à la région Réunion . La méthode utilisée apparaît ainsi transposable à d'autres régions.

Enfin, ces cartes doivent être naturellement exploitées de manière critique : les rangs élevés de vulnérabilité physique occupés par certaines zones urbaines ou portuaires (par exemple à Sète) ne doivent pas faire oublier que ces cartes sont réalisées uniquement sur la base de lois physiques simples, de la géologie, et de la topographie. En milieu urbain et portuaires, les principaux vecteurs de changement sont bien évidemment l'homme lui-même et non le changement climatique. Il est également nécessaire de souligner que de telles cartes peuvent être re-générées par exemple lorsqu'un nouvel ensemble de données est produit, lorsque les processus sous-jacents sont mieux modélisés ou compris, ou bien lorsque les observations ont montré que la vulnérabilité a été sur- ou sous-estimée.

5.2. IMPLICATIONS POUR L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le lot 6 a pour objectif de produire des informations sur les effets du changement climatique qui soient pertinentes pour l'examen de mesures d'adaptation visant à réduire les coûts humains, environnementaux et financiers qui y sont liés. La figure 7 montre une proposition d'utilisation des résultats du lot 6 dans un processus d'adaptation : un groupe de travail ayant pour objectif de préparer l'adaptation au changement climatique se réunit. Il dispose d'informations concernant :

- des scénarios de changement climatique (issus par exemple de modèles climatiques et d'analyse d'experts)
- de scénarios contradictoires concernant la vulnérabilité des milieux et des territoires (issus des travaux du Lot 6 ou de toute autre approche analogue)
- d'un certain nombre de mesures d'adaptation possibles, issues idéalement de réflexions menées au niveau régional, ou à défaut du rapport Eurosion (2004) où du groupe de travail RNACC Risques côtiers (2009).

Le rôle du groupe de travail serait alors d'examiner la pertinence des mesures d'adaptation

proposées pour les différents scénarios de climat et d'évaluation de la vulnérabilité du territoire. Les critères d'évaluation des mesures d'adaptation pourraient être (Hallegatte, 2009) :

- Les mesures d'adaptation sont-elles robustes ? sont-elles pertinentes pour plusieurs scénarios ?
- Les mesures d'adaptation sont-elles réversibles ? Autrement dit, dispose-t-on de la possibilité de *changer de stratégie* au bout de quelques années ? (concept de chemins d'adaptation).
- Les mesures d'adaptation offrent-elles des bénéfices à court-termes ? S'agit-il de mesures sans regrets qui auront des effets positifs à court terme sur la prévention des risques côtiers ?

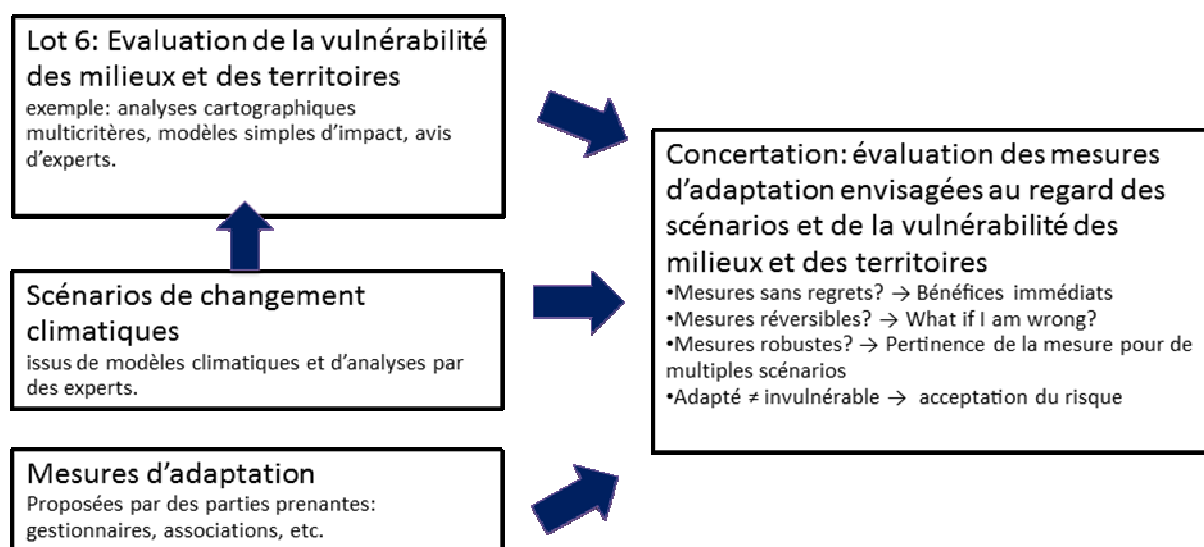


Figure 7 : Utilisation des résultats du lot 6 dans une réflexion sur l'adaptation.

Il n'y a pas d'évidence, aujourd'hui, que l'élévation du niveau marin soit une cause importante d'aggravation des aléas côtiers, sauf peut-être sur la côte est des Etats-Unis (Zhang et al., 2004 ; Guttierrez et al., 2010). Cette situation est amenée à évoluer, néanmoins, la gestion de l'impact de l'élévation du niveau marin sur le littoral apparaît moins urgente que l'amélioration de la prévention des risques côtiers à court terme. Ceci montre que le groupe de travail devrait naturellement attacher une importance toute particulière à la définition de mesures « *sans regrets* », qui contribueraient à réduire les aléas et les risques actuels (RNACC, 2009). Les travaux d'un groupe de travail sur l'adaptation pourraient ainsi être bénéfiques si elles permettent déjà de répondre à des problèmes de développement et de prévention des risques naturels.

Il n'existe pas aujourd'hui, à notre connaissance, de mesure d'adaptation qui donnerait des résultats bénéfiques dans tous les cas (RNACC, 2009). La stratégie souvent adoptée de maintien du trait de côte dans son état actuel représente un coût croissant. 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). Cette stratégie se traduit par des dommages collatéraux tels que l'érosion et les affouillements dans de part et d'autres des structures « en dur » (murs, épis, brise lames...) ou environnementaux (rechargement de plages). Sur ce dernier aspect, la synthèse de Peterson et Bishop (2005) montre que les dommages cumulés issus de la systématisation de cette pratique ne sont pas actuellement mesurés de manière satisfaisante. Dans cet exemple, une mesure en faveur de la prévention des risques côtiers (Lot 6 du projet Explore 2070) vient contrecarrer l'objectif de maintien de la biodiversité (Lot 5 du projet Explore 2070). Ceci montre l'intérêt de réunir un groupe « Adaptation » capable de prendre en compte l'ensemble des composantes liées à cette problématique.

6. CONCLUSION

La méthode mise en place par le lot 6 du projet Explore 2070 a permis de produire des cartes de la vulnérabilité de zones côtières aux aléas érosion et submersion pour plusieurs scénarios de changement climatique, à l'horizon 2070. Le principal avantage de cette méthode réside dans sa faculté d'aider l'utilisateur à déterminer les poids relatifs des différents critères utilisés pour la cartographie multicritère de la vulnérabilité du territoire. Deux scénarios contradictoires (avec 0 et 1m d'élévation du niveau marin) ont été utilisés à l'échelle régionale. Leur mise en œuvre est cohérente avec la demande de procéder à une analyse de la vulnérabilité des territoires au niveau des Schémas Régionaux Climat Air Energie (échelle des régions administratives). Enfin, une méthode pour déterminer des orientations relatives à l'adaptation est proposée.

Le dispositif mis en place par la loi « Grenelle II » pour l'adaptation et l'atténuation du changement climatique privilégie une action au niveau régional. Il existe aujourd'hui de nombreux travaux menés à ce niveau, visant à évaluer la vulnérabilité du territoire et à proposer des mesures d'adaptation (par exemple via les Contrats Plan Etat Régions ou d'autres mécanismes). Dans ce contexte, le lot 6 du projet Explore 2070 propose une méthode d'analyse régionale de la vulnérabilité qui est adaptée à celles actuellement recommandées pour évaluer la pertinence de mesures d'adaptation (Hallegatte, 2009). Enfin, l'application de la même méthode à des entités nationales vient compléter cette approche en proposant un moyen d'évaluer la cohérence des différentes approches régionales entre elles.

Dans les étapes suivantes du projet 2070, le groupe « Adaptation » doit se réunir. Nous recommandons que le groupe « Adaptation » émette un avis sur le produit livré par le lot 6 et sur la méthode proposée dans ce rapport de synthèse. Une étape ultérieure pourrait être la transmission – pour information - de ce rapport de synthèse aux groupes régionaux actuellement en charge de la mise en œuvre des volets « Adaptation » des SRCAE. Ces groupes pourraient ainsi évaluer si certains développements méthodologiques proposés par le projet Explore 2070 peuvent être transposés au niveau régional.

7. **BIBLIOGRAPHIE**

Bruun P. (1962) Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal Waterways and Harbours Division*, 88(1-3), 117-130.

Bertin X., N. Bruneau, Breihl J-F., A. B. Fortunato, M. Karpytchev, 2011 : Importance of wave ag and resonance in storm surges: the case of Xynthia, Bay of Biscay. *Ocean Modelling*, **42**, 16-30.

Cazenave A. et W. Llovel (2010) Contemporary sea level rise. *Annual Review of Marine Science*, 2, 145-173, doi: 10.1146/annurev-marine-120308-081105.

Cazenave A. et F. Remy (2011) Sea level and Climate: observation and causes of changes (review article). *Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change*, 2, 647-662.

Chang S.W., T.P. Clement, M.J. Simpson et K.K. Lee (2011) Does sea-level rise have an impact on saltwater intrusion ? *Advances in Water Resources*, 34, 1283-1291, doi:10.1016/j.advwatres.2011.06.006.

Charles, E., D. Idier, J. Thiébot, G. Le Cozannet, R. Pedreros, F. Ardhuin, S. Planton, 2012a: Present wave climate in the Bay of Biscay: spatiotemporal variability and trends from 1958 to 2001. *Journal of Climate*, in press.

Charles, E., D. Idier, P. Delecluse, M. Déqué, G. Le Cozannet, 2012b: Climate change impact on waves in the Bay of Biscay, France, *Ocean Dynamics*, in review.

Church J.A., N.J. White, R. Coleman, K. Lambeck et J.X. Mitrovica (2004) Estimates of the regional distribution of sea-level rise over the 1950 to 2000 period. *Journal of Climate*, 17(13), 2609–25

Church J.A. et N.J. White (2011) Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. *Surveys in Geophysics*, 32, 585–602, doi: 10.1007/s10712-011-9119-1.

Cooper J. A. G., Pilkey O. H. (2004) - Sea-level rise and shoreline retreat; time to abandon the Bruun rule. *Global Planet. Change*, 43, p. 157-171.

Dodet, G., X. Bertin, and R. Taborda, 2010: Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. *Ocean Modelling*, **31**, 120-131.

Douglas, J. (2007). Physical vulnerability modelling in natural hazard risk assessment, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, 283-288, doi:10.5194/nhess-7-283-2007

Douglas B.C. (2001) Sea level change in the era of the recording tide gauge. *Sea Level Rise, History and Consequences*, ed. BC Douglas, MS Kearney, SP Leatherman, pp. 37–64. San Diego, CA: Academic Press .

Dörfliger N., S. Schonburgk, M. Bouzit, V. Petit, Y. Caballero, P. Durst et O. Douez (2010) Montée du niveau marin induite par le changement climatique : conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole. *Rapport intermédiaire, BRGM/RP-59456-FR*, 152p.

Eurosion (2004) Living with coastal erosion in Europe : Sediment and Space for Sustainability (www.eurosion.org).

Frissant N., C. René-Corail, J. Bonnier et Y. De La Torre (2005) *Le phénomène d'intrusion saline à la Réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles. Rapport BRGM/RP-54330-FR*, 64p.

Garry, G., E. Graszka, M. Toulemont et F. Levoy (1997) Plan de prevention des risques littoraux (PPR), Guide méthodologique. Paris, La Documentation française, 54p, ISBN : 2-11-003883-7.

Grunthal G, Thieken AH, Schwarz J, Radtke KS, Smolka A, Merz B (2006) Comparative risk assessments for the City of Cologne—storms, floods, earthquakes. *Nat Hazard* 38:21–44

Garcin, M., J. F. Desprats, M. Fontaine, R. Pedreros, N. Attanayake, S. Fernando, C. H. E. R. Siriwardana, U. De Silva, and B. Poisson, Integrated approach for coastal hazards and risks in Sri Lanka, *Natural Hazards and Earth Systems science*, 2008.

Garcin M., Desprats J.F., Pedreros R., Fontaine M., Sedan O., Lenotre N., Attanayake N., De Silva U., Fernando S., Siriwardana C. (2009) Risques côtiers à Sri Lanka – approches par SIG, scénarios et modélisation. *La Houille Blanche*, 1, 2009, 52-59.

Gornitz V.M., Beaty T.W., Daniels R.C. (1997) - A coastal hazards database for the US West coast. ORNL/CDIAC 81 NDP-043 C. Oak Ridge National Laboratory.

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

- Holgate S.J. et P.L. Woodworth (2004) Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s. *Geophysical Research Letters* 31:L07305, doi:10.1029/2004GL019626
- Holgate S. (2007) On the decadal rates of sea level change during the twentieth century. *Geophysical Research Letters*, 34:L01602, doi:10.1029/2006GL028492 .
- Horstman, E. M., Wijnberg, K. M., Smale, A. J., and Hulscher, S.: Long-term Coastal Management Strategies: Useful or Useless?, *Journal of Coastal Research*, 233-237, 2009.
- Idier D., Falquès A., Garnier R., Ruessink G., Shoreline instability under low and shore-normal wave incidence, *Journal of Geophysical Research - Earth Surface*, 2011
- Lecacheux S., Pedreros R., Le Cozannet G., Thiébot J., De La Torre Y., Bulteau T., 2012 : a method to characterize the different extreme waves for islands exposed to various waves regimes. A case study devoted to La Reunion island. *Natural Hazards and Earth Science Systems*; en revisions.
- Le Cozannet G., Hosford S., Douglas J., Serrano J-J., Coraboeuf D., Comte J. , 2008, *Connecting Hazard Analysts and Risk Managers to Sensor Information*, *Sensors* 2008, Special Issue: "Remote Sensing of Natural Resources and the Environment (Remote Sensing Sensors)", 8, 3932-3937
- Le Cozannet, G., S. Lecacheux, E. Delvallee, N. Desramaut, C. Oliveros, and R. Pedreros, 2011: Teleconnection Pattern Influence on Sea-Wave Climate in the Bay of Biscay. *Journal of Climate*, **24**, 641-652.
- Meyssignac B., F. Calafat, S. Somot, V. Rupolo, P. Stocchi, W. Llovel et A. Cazenave (2011a) Two-dimensional reconstruction of the Mediterranean sea level over 1970-2006 from tide gauge data and regional ocean circulation model outputs. *Global and Planetary Change*, doi:10.1016/j.gloplacha.2011.03.002
- Meyssignac B., D. Salas-Melia, M. Becker, W. Llovel W. et A. Cazenave (2011b) A Spatial trend patterns in observed sea level: internal variability and/or anthropogenic signature ? soumis à *Climate of the Past*.
- Nicholls, R.J., P.P. Wong, V.R. Burkett, J.O. Codignotto, J.E. Hay, R.F. McLean, S. Ragoonaden and C.D. Woodroffe, 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.

Pedrerros R., M. Garcin, Y. Krien, D. Montfort Climent, J. Mujica et B. François (2010) Tempête Xynthia : compte rendu de mission préliminaire. *Rapport BRGM/RP-58261-FR*, 45p., 31 figs. 1 Ann.

Petit V. (1996) avec la collaboration de J.Y. Caous, I. Czernichowski, P. de la Quèrièrè, B. Mazenc, H. Talbo, G. Ehiermael, B. Sourisseau, P. Bérard et F. Bel (1996) Les aquifères littoraux en France métropolitaine. *Rapport BRGM RP-39298-FR*, 120p.

Peterson C. H. and Bishop M. J., 2005: assessing the environmental impacts of beach nourishment, *Bioscience*, Vol 55, No. 10, pp. 887-896.

Romieu, E., Welle, T., Schneiderbauer, S., Pelling, M., and Vinchon, C.: Vulnerability assessment within climate change and natural hazard contexts: revealing gaps and synergies through coastal applications, *Sustainability Science*, 5, 159-170, 10.1007/s11625-010-0112-2, 2010.

Saaty, T.L. (2008) – Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sciences*, Vol.1, N°1, 2008.

Stive M.J.F., S.G.J. Aarninkhof, L. Hamm, H. Hanson, M. Larson, K.M. Wijnberg, R.J. Nicholls et al. (2002) Variability of shore and shoreline evolution. *Coastal Engineering*, 47(2), 211-235.

Strack O.D.L. (1976) A single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers. *Water Resources Research*, 12(6), 1165-1174.

Suanez S., Garcin M., Bulteau T., Rouan M., Lagadec L., David L., Les observatoires du trait de côte en France métropolitaine et dans les DOM, Echogeo, n° 19, édition électronique, 2012.

Thiébot J., Idier D., Garnier R., Falqués A., Ruessink G., The influence of wave direction on the morphological response of a double sandbar system, *Continental Shelf Research*, 2012.

Tsimplis M., M. Marcos et S. Somot (2008) 21st century Mediterranean sea level rise: steric and atmospheric pressure contributions from a regional model. *Global and Planetary Change*, 63(2-3), 105-111, doi: 10.1016/j.gloplacha.2007.09.006.

Vecchia, V. A unified approach to probabilistic risk assessments for earthquakes, floods, landslides, and volcanoes. In *Proceedings of a multidisciplinary workshop held in Golden, Colorado November 16–17 1999*, Open-File Report 01-324, U.S. Geological Survey; 2001. 2.

Vinchon C., Aubie S., Balouin Y, Closset L., Garcin M., Idier D., Mallet C. (2009) - Anticipate response of climate change on coastal risks at regional scale.in aquitaine and languedoc-roussillon (france) *Ocean & Coastal Management* 52 (2009) 47–56.

Watson T.A., A.D. Werner et C.T. Simmons (2010): Transience of seawater intrusion in response to sea level rise, *Water Resources Research*, 46, W12533, 10p, doi:10.1029/2010WR009564.

Werner A.D. et C.T. Simmons (2009) Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers, *Ground Water*, 47, 197-204, doi:10.1111/j.1745-6584.2008.00535.x.

RNACC : 2009 : Le Cozannet, G. ; Lenôtre N., Nacass, P. ; Colas, S. ; Perherin, C., Vanroye C. ; Peinturier C. ; Hajji, C. ; Poupat, B. ; de Smedt, S. ; Azzam C. ; Chemitte, J. ; Pons, F., 2009, Impacts du Changement Climatique, Adaptation et coûts associés en France pour les Risques Côtiers ; Rapport du Groupe de Travail « Risques Naturels, Assurances et Adaptation au Changement Climatique », BRGM RP 57141

RNACC : 2011 : Yates-Michelin, M., G. Le Cozannet, Y. Krien, Y. et N. Lenôtre (2011) Amélioration de la méthode RNACC : caractérisation des incertitudes relatives à la quantification des impacts de l'élévation du niveau marin. *Rapport final BRGM/RP 59405-FR*, 145p., 32 Tab, 57 fig., 5 annexes.

Yates, M.L., G. Le Cozannet, and N. Lenôtre. Quantifying Errors in Long-term Coastal Erosion and Inundation Assessments. *Journal of Coastal Research*, SI57, ICS2011 Proceedings., 2011.

Yates M. et Le Cozannet G., 2012 : Evaluating European Coastal Evolution using Bayesian Networks, NHESS ; Soumis.

Zhang,K.Q., B.C.Douglas and S.P. Leatherman, 2004:Globalwarming and coastal erosion. *Climatic Change*, 64, 41-58.

8. ABBREVIATIONS

AHP : Analytical Hierarchy Process

CMD : Cartographie Multicritère Décisionnelle

MEEDDM : Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer

SRCAE : Schémas Régionaux Climat Air Energie