



Le littoral dans le contexte du changement climatique



Rapport au Premier ministre
et au Parlement

OBSERVATOIRE NATIONAL
SUR LES EFFETS DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Le littoral dans le contexte du **changement climatique**

Rapport au Premier ministre
et au Parlement

Publications de l'ONERC à la Documentation française

Un climat à la dérive : comment s'adapter ? Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2005.

Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique, La Documentation française, Paris, 2007.

Changements climatiques et risques sanitaires en France. Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2007.

Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation. Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2009.

Villes et adaptation au changement climatique. Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2010.

L'Adaptation de la France au changement climatique. Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2012.

Les outre-mer face au défi du changement climatique. Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2013.

L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change. Rapport de l'Onerc au Premier ministre et au Parlement, La Documentation française, Paris, 2014.

« En application de la loi du 11 mars 1957 (art. 41) et du Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992, complétés par la loi du 3 janvier 1995, toute reproduction partielle ou totale à usage collectif de la présente publication est strictement interdite sans autorisation expresse de l'éditeur. Il est rappelé à cet égard que l'usage abusif et collectif de la photocopie met en danger l'équilibre économique des circuits du livre ».

© La Documentation française, Paris 2015

ISBN : 978-2-11-010037-5

Sommaire

MOT DU PRÉSIDENT	5
RÉSUMÉ	7
INTRODUCTION : LE LITTORAL, UN ESPACE À FORTS ENJEUX	11
Partie A	
Les principaux impacts du changement climatique sur le littoral	19
Partie B	
Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises	43
Partie C	
L'adaptation aujourd'hui : de la gestion de crise à la planification	85
Section 1	
La vigilance « Vagues-submersion »	87
Section 2	
Coûts des événements naturels sur le littoral et dispositif assurantiel	93
Section 3	
Réglementation des territoires exposés aux risques de submersion marine	100
Section 4	
Une stratégie nationale pour anticiper l'érosion littorale	106
Section 5	
Expérimentations de la relocalisation des activités et des biens, vers une recomposition spatiale des territoires menacés par les risques littoraux	111

Section 6

Les connaissances scientifiques, aujourd'hui et demain..... 116

Section 7

Le projet LiCCo et le point de vue d'élus des deux côtés de la Manche..... 128

Nouvelle d'anticipation

Entre terre et mer 135

BIBLIOGRAPHIE..... 147

RAPPORT D'ACTIVITÉ 157

ANNEXES..... 173

Mot du président

Dans les territoires littoraux, comme dans les territoires de montagne, les effets du réchauffement climatique sont précoces et déjà perceptibles par les populations. Il en résulte, dans ces territoires, un intérêt particulier pour les questions relatives au climat et, actuellement, une accentuation des réflexions pour l'anticipation et l'adaptation.

Depuis le début du xx^e siècle, une hausse de près de 20 cm du niveau moyen des mers a été enregistrée, ce qui représente une évolution significative. Pour les côtes les plus basses, une telle hausse correspond à des débordements de plusieurs mètres. Aussi, il n'est plus possible, en 2015, d'omettre ce phénomène dans la gestion des territoires côtiers. D'autant que la hausse du niveau marin va se poursuivre de nombreuses années, principalement du fait de la dilatation de l'océan par la chaleur qu'il emmagasine et du fait de la fonte des glaces continentales qui s'est accélérée au cours des dernières décennies. Au cours de la première décennie du xxi^e siècle, la fonte des glaces continentales représente l'équivalent d'un cube de près d'un kilomètre de côté rejoignant l'océan chaque jour! Selon le 5^e rapport d'évaluation du GIEC, le niveau marin va continuer de monter, entre 26 et 82 cm d'ici à la fin du xxi^e siècle.

Le changement climatique exacerbe les différentes tensions qui s'expriment autour des aménagements côtiers et qui ne feront que s'intensifier à l'avenir. La hausse du niveau marin est un impact majeur. Mais ce phénomène n'est pas le seul à prendre en compte. En effet, les populations répondent depuis longtemps aux problématiques liées à l'érosion avec la mise en œuvre de différentes techniques. L'interaction entre les phénomènes d'érosion et de hausse du niveau marin pose de nouvelles questions aujourd'hui. La plupart de ces questions n'ont pas de réponse évidente et requièrent un traitement spécifique pour chaque territoire en fonction des risques considérés et en concertation avec les populations. La connaissance encore limitée de certains mécanismes d'érosion à l'œuvre sur nos côtes rend plus complexe dans certains cas l'identification des solutions les mieux adaptées.

En parallèle de l'évolution des phénomènes naturels, la transition démographique prend une dimension particulièrement forte pour l'aménagement du littoral. En effet, les rivages métropolitains connaissent une attractivité croissante, tendant à concentrer de plus en plus de logements dans les communes littorales. Cette densification à l'œuvre en France métropolitaine est encore plus nette pour la plupart des outre-mer où la disponibilité foncière est souvent réduite à une bande littorale d'extension très limitée et où la transition démographique n'est pas encore achevée. Le changement climatique remet en lumière, avec un degré d'urgence élevé, le besoin d'aménagement littoral concerté et respectueux de l'environnement.

Répondre durablement aux besoins croissants des populations est un défi majeur pour tous les territoires littoraux, surtout lorsqu'ils sont insulaires.

Est-il raisonnable d'empiéter sur le domaine maritime pour étendre nos infrastructures alors que le niveau de l'océan ne cesse de monter et que les risques de submersion marine sont déjà réels sur de nombreux littoraux? Devons-nous multiplier les ouvrages de défense contre la mer? Devons-nous libérer les zones côtières de leurs usages socio-économiques? Devons-nous relocaliser les biens? Il est urgent de trouver un équilibre dans l'occupation des espaces et l'emploi des ressources. Les effets du changement climatique nous rappellent que notre planète n'est pas infinie, que nos ressources ne sont pas illimitées et que l'inaction n'est pas une option envisageable. Nous devons nous mobiliser et faire face collectivement aux défis présents tout en préparant les défis futurs.

Certes, de nombreux éléments sont encore mal connus, de nombreux phénomènes sont encore mal compris, mais nous avons aussi la chance de disposer de suffisamment d'informations pour ne plus différer certaines actions. Les travaux scientifiques, le 5^e rapport d'évaluation du GIEC, les études de terrain, les approches prospectives sont autant d'éléments dont nous disposons aujourd'hui pour élaborer des projets de territoire cohérents avec les futurs possibles du climat. Imaginer la manière dont les populations de demain pourront vivre sur nos territoires littoraux représente une formidable opportunité pour construire un développement véritablement durable.

Paul Vergès

Résumé

Le littoral français présente des enjeux très spécifiques, tant du point de vue de la démographie, de l'urbanisation, des activités socio-économiques que du point de vue environnemental.

En effet, l'attractivité des littoraux et par conséquent leur artificialisation toujours plus importante augmentent leurs vulnérabilités aux impacts du changement climatique.

Les principaux aspects de ce changement sont la hausse des températures, l'évolution des précipitations et la modification des cyclones, l'acidification de l'eau et la hausse du niveau moyen des mers, à laquelle cet ouvrage prête une attention particulière.

Les données accumulées depuis le début du xx^e siècle révèlent une tendance significative : en moyenne sur les océans du globe, le niveau de la mer a augmenté rapidement au cours du dernier siècle, à un rythme jusqu'à 5 fois supérieur à celui des derniers millénaires, soit un taux moyen d'élévation du niveau de la mer de $1,7 \pm 0,2$ mm/an sur la période 1901-2010 et de $3,2 \pm 0,4$ mm/an sur la période 1993-2014.

Et selon tous les scénarios climatiques envisagés aujourd'hui, il est très probable que le taux d'augmentation du niveau moyen global de la mer au xxi^e siècle sera supérieur au taux observé au cours de la période 1971-2010. Ainsi, à la vingtaine de centimètres de hausse déjà observée depuis 150 ans, devraient s'ajouter encore plus de 26 à 82 cm d'ici la fin du siècle selon les efforts faits pour réduire plus ou moins efficacement les émissions de gaz à effet de serre.

Même si l'élévation du niveau moyen de la mer observée depuis 150 ans peut sembler faible en comparaison des hauteurs de vagues et de marées qui peuvent les dépasser de plusieurs ordres de grandeur, le rapport de synthèse du GIEC (2014) indique qu'une remontée du niveau marin de 0,5 m impliquerait une augmentation de 10 à 100 fois de la fréquence de submersion en l'absence de mesures d'adaptation pour s'en protéger.

Pour protéger les populations des submersions, le dispositif vigilance a été enrichi en octobre 2011 du risque « vagues-submersion¹ ». Celui-ci a été développé par Météo-France en collaboration avec le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) et avec le soutien de la Direction générale de la prévention des risques du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Son objectif est d'informer le public et les acteurs de la gestion de crise en cas de risque de submersion marine. Il constitue, ainsi, le premier maillon de la

1. Il s'agit d'une des mesures de la fiche « Risques naturels » du PNACC 2011-2015.

chaîne reliant la prévention à la gestion des risques météorologiques. Dans de rares cas, cela peut conduire au déclenchement à l'échelle départementale d'une procédure d'alerte des populations accompagnée de mobilisations de moyens de secours et de consignes telles que l'ordre de mise à l'abri ou d'évacuation.

Le service de prévision marine et océanographique de Météo-France, le SHOM et les services de l'État travaillent de concert à l'amélioration continue du dispositif de vigilance vagues-submersion, par une meilleure observation et compréhension du phénomène à l'échelle locale, par l'amélioration des outils à disposition des prévisionnistes, notamment les modèles numériques simulant les vents, les vagues et les surcotes, et par la formation des prévisionnistes.

En France, depuis la création en 1982 du régime d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles, le coût qu'elles représentent est un indicateur de la gravité de l'événement. Il exprime notamment le montant des dommages subis par les entreprises et les particuliers sinistrés lorsque le phénomène naturel à l'origine de la catastrophe a été constaté par arrêté ministériel.

Les coûts des indemnités d'assurances au fil des trente dernières années montrent déjà la vulnérabilité des habitations et des activités. La réduction de la vulnérabilité ou, tout au moins, la maîtrise de l'augmentation passe par des mesures de prévention et d'adaptation pour éviter l'accroissement inéluctable des coûts des catastrophes. Cependant, les possibilités d'adaptation des ouvrages de protection existants semblent réduites, si l'on vise à la fois un coût soutenable dans la durée et un niveau de sécurité garanti et durable.

Un meilleur suivi sur le long terme des phénomènes naturels, de leurs conséquences et des coûts des indemnités qu'ils induisent permettra de préciser les mesures de réduction de vulnérabilité à mettre en place afin de prévenir les risques et de s'adapter au changement climatique notamment sur le littoral.

Les dégâts importants occasionnés par les tempêtes Lothar et Martin en 1999, Klaus en 2009 et Xynthia en 2010 ont incité l'État à mettre en place une série de mesures afin de réglementer l'urbanisation sur les territoires exposés au phénomène d'érosion ou aux risques de submersion marine. Ainsi dès 2011, le plan « submersions rapides » (PSR) a été mis en place pour répondre aux besoins opérationnels de prévention et de protection des territoires face au risque d'inondation.

La Stratégie nationale de gestion des risques d'inondations (SNGRI), transposition nationale de la Directive européenne sur l'évaluation et la gestion des inondations, fixe le cap de prévention des risques d'inondation à court, moyen et long terme. Ces priorités nationales seront déclinées localement via des plans de gestion des risques d'inondation (PGRI) qui vont permettre de planifier, coordonner et mettre en œuvre les actions prioritaires sur les territoires les plus exposés.

Dans cette approche des risques littoraux aggravés par le changement climatique, il importe de bien réfléchir aux modalités de mise en œuvre d'une logique de protection. Celle-ci ne peut s'aborder sans considérer la place des enjeux au sein du système concerné. En ce sens, l'anticipation doit guider toute stratégie

d'urbanisation dans un dialogue et une démarche de projet à court et long terme associant les collectivités à la gouvernance.

Une seconde conséquence attendue de l'élévation du niveau marin est un recul du trait de côte, en particulier des littoraux bas et meubles, même si, à l'heure actuelle, aucune relation systématique entre le phénomène global de recul du trait de côte et l'élévation du niveau de la mer n'a pu être clairement établie.

Face à la pression anthropique exercée sur les littoraux, le gouvernement a adopté en mars 2012 une démarche stratégique intitulée « Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte ; vers la relocalisation des activités et des biens ».

Tout l'enjeu pour les collectivités locales et l'État consiste à mieux prendre en compte l'évolution du trait de côte dans les politiques publiques, de faire des choix d'urbanisme et d'aménagement adaptés et cohérents et de prévoir sur le long terme et dans un contexte de changement climatique les conséquences de ces choix relatifs à la protection du littoral et de ses usages.

La recomposition des territoires doit être vue comme une solution alternative aux options traditionnelles de fixation du trait de côte et de « défense côtière et de lutte contre la mer », impliquant nécessairement l'artificialisation du trait de côte, la coupure des échanges terre-mer et de fortes dépenses sur des opérations parfois peu pérennes.

Dans le cadre de l'appel à projet programmé par la Stratégie nationale décrite précédemment, cinq expérimentations ont été retenues par le ministère en charge de l'Écologie, réparties le long des côtes métropolitaines et ultramarines.

Sur la base des enseignements de ces projets, un guide national sera élaboré proposant des éléments méthodologiques et de doctrine concernant la mise en œuvre de la relocalisation des activités et des biens.

Depuis l'avènement de techniques utilisant le positionnement par satellites, l'évolution du trait de côte est aujourd'hui suivie précisément et fréquemment en France sur de nombreux secteurs, de métropole ou ultramarins. Cependant, à cause du manque de connaissances fiables sur les processus complexes qui sont les éléments moteurs de l'évolution du trait de côte, les impacts d'un changement climatique et d'une élévation du niveau moyen des mers sur ces phénomènes sont encore du domaine de la recherche et demeurent source de nombreuses interrogations. L'érosion côtière ne se traduira donc pas par la simple transposition linéaire des tendances d'évolution passées.

Deux exemples d'évolution des côtes françaises métropolitaines illustrent la difficulté à laquelle sont confrontés les scientifiques pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'évolution des littoraux. Ce sont les plages de poche de Méditerranée et les falaises crayeuses haut-normandes.

De même, la contribution des écosystèmes à la résilience des littoraux est aujourd'hui reconnue tout en étant, elle aussi, difficilement quantifiable.

Enfin, le problème d'érosion côtière ne concerne pas seulement la France et de nombreux pays européens y sont exposés. La coopération internationale et l'échange d'expériences dans des contextes politiques et culturels différents sont des atouts majeurs pour faciliter la concertation entre la population, les décideurs locaux ou nationaux et les scientifiques. C'était l'une des ambitions du projet européen Interreg franco-anglais LiCCo (Littoraux et Changements Côtiers – *Living with a Changing Coast*) qui s'est déroulé de 2011 à 2014.

En guise de conclusion, une nouvelle d'anticipation met en scène l'évolution environnementale et socio-économique d'une zone côtière à l'horizon de 2070.

Introduction : le littoral, un espace à forts enjeux

Sébastien Colas, MEDDE/CGDD,
Observatoire national de la mer et du littoral
Jérôme Duvernoy, MEDDE/DGEC/SCEE/ONERC
Sylène Lasfargues, MEDDE/DGEC/SCEE/ONERC

Le littoral français présente des enjeux très spécifiques, tant du point de vue de la démographie, de l'urbanisation, des activités socio-économiques que du point de vue environnemental. Il est essentiel de donner quelques chiffres clés afin de bien appréhender l'impact potentiel du changement climatique sur les littoraux métropolitains et outre-mer.

Une forte densité de population

Si la densité de population des communes littorales métropolitaines est deux fois et demie plus élevée que la moyenne hexagonale (285 hab./km² en 2010), elle est beaucoup plus faible dans l'arrière-pays littoral, communes non littorales des cantons littoraux, en nette rupture avec le bord de mer (87 hab./km²). Tandis que dans les communes littorales outre-mer (Guyane, Guadeloupe, Martinique et La Réunion), la densité montre de fortes disparités entre la Guyane, où la densité de population est très faible (5 hab./km²), et les trois autres départements insulaires étudiés (de 246 à 379 hab./km²).

À mesure que l'on approche du rivage, la densité de population augmente nettement, en métropole comme en outre-mer. Cela s'explique par l'attrait de la vue sur mer et/ou par des contraintes de relief (Antilles et surtout La Réunion) ou de végétation et d'accessibilité (Guyane), dès qu'on s'éloigne des rivages.

Par exemple, la densité moyenne de la population est proche de 500 hab./km² à moins de 500 m de la mer sur le pourtour méditerranéen, soit 4 fois la densité moyenne métropolitaine. Elle dépasse même 1 000 hab./km² sur l'île de la Réunion (voir figure 4).

La population des départements littoraux ne cesse d'augmenter, tant dans les communes littorales métropolitaines (figure 1), avec une augmentation de + 41 % depuis 1962 (83 habitants en plus par km²), que dans l'arrière-pays qui montre une progression de + 70 % (36 résidents en plus par km²), alors que l'évolution sur l'ensemble du territoire n'est que de + 36 %, soit 27 résidents en plus par km². En outre-mer, cette croissance est encore plus importante et s'élève à + 89 %. Cette nette progression

est surtout alimentée par des soldes migratoires importants en métropole (phénomène d'haliotropisme¹) et des soldes naturels très excédentaires en outre-mer.

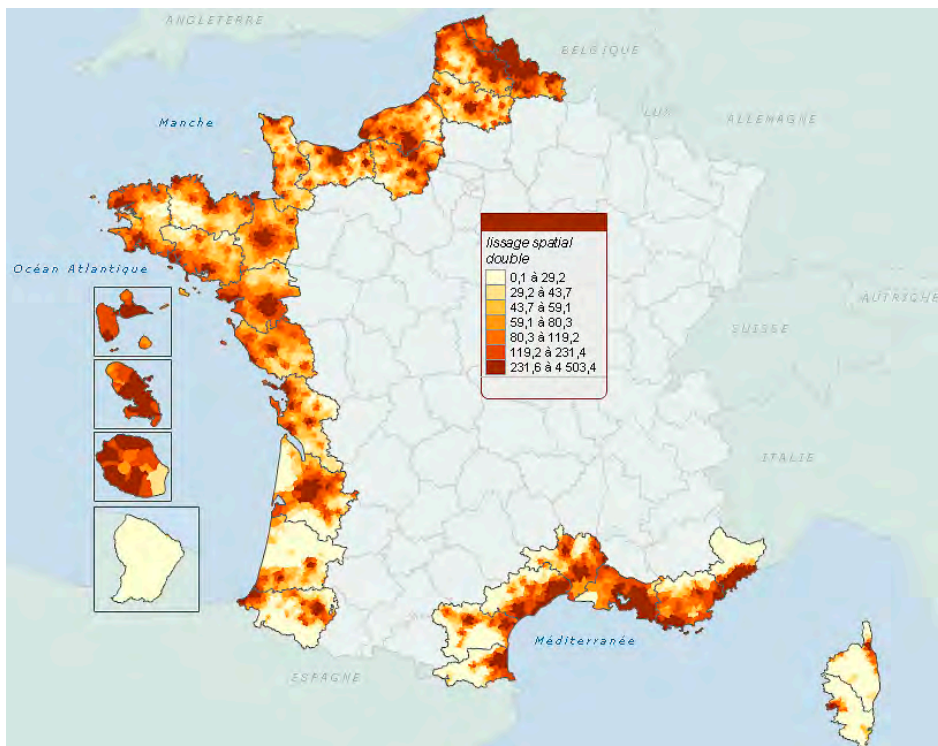


Figure 1 – Densité de population des communes des départements littoraux en 2010

Note de lecture : les informations ont été lissées spatialement pour mieux faire ressortir les tendances.
Source : INSEE, RP 2010. Traitements : SOeS (Outil Geoidd).

Cette croissance démographique ne devrait pas s'essouffler. Sans tenir compte du changement climatique, la population des départements littoraux devrait donc croître plus que celle des départements non littoraux entre 2007 et 2040, avec des hausses respectives de 19 et 13 %.

Cette évolution du nombre d'habitants s'accompagne d'une évolution des caractéristiques démographiques des populations vivant sur les rivages métropolitains. Ainsi, à mesure que l'on s'approche de la mer, la part des personnes âgées de plus de 65 ans augmente sensiblement. Par exemple, à moins de 500 mètres des côtes, la part des plus de 65 ans atteint 26,5 % contre une moyenne métropolitaine de 16,5 % (INSEE, RFL 2010).

Par ailleurs, la capacité d'accueil touristique des communes littorales métropolitaines est de près de 8 millions de lits, soit 8850 lits par commune. C'est plus de 15 fois la moyenne hexagonale. Une telle capacité permet théoriquement d'accueillir plus d'habitants que le nombre de résidents permanents. Théoriquement, près de 14 millions

1. Attractivité des régions littorales et maritimes.

de personnes peuvent résider simultanément dans les communes métropolitaines de bord de mer, qui ne représentent que 4 % de la surface du territoire hexagonal.

De hauts niveaux d'artificialisation et de construction

Du fait de la forte population résidente et des importantes capacités d'accueil touristique, l'occupation du sol des communes littorales métropolitaines est marquée par une forte empreinte de l'artificialisation.

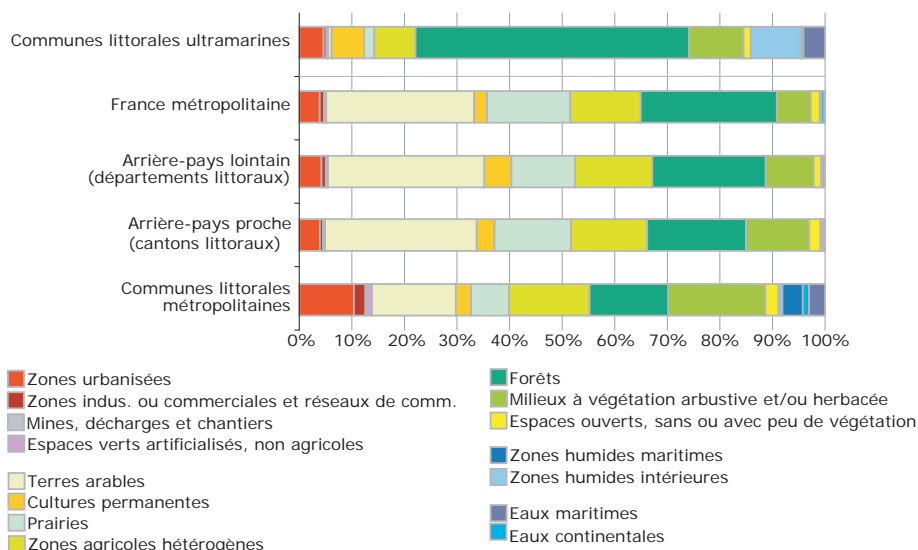


Figure 2 – Occupation du sol en France

Note de lecture : pour la Guyane, seules les terres à moins de 20 km de la mer sont étudiées.

Source : UE-SOeS, CORINE Land Cover 2006. Traitements : SOeS (Observatoire national de la mer et du littoral).

Comme en métropole, l'occupation du sol des communes littorales outre-mer reflète les densités de population élevées (figure 2). Les territoires artificialisés occupent plus de 10 % de la surface des communes îliennes outre-mer et 1 % en Guyane.

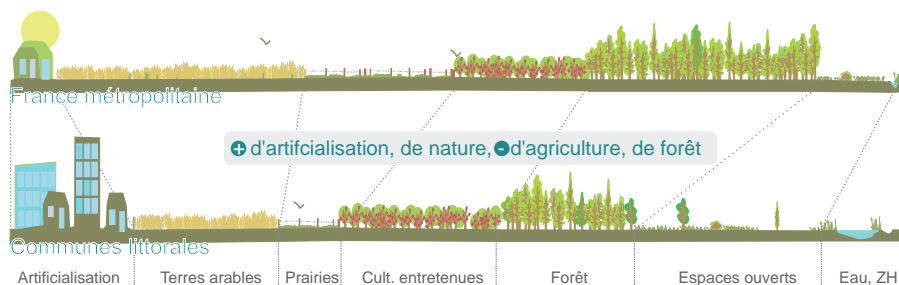


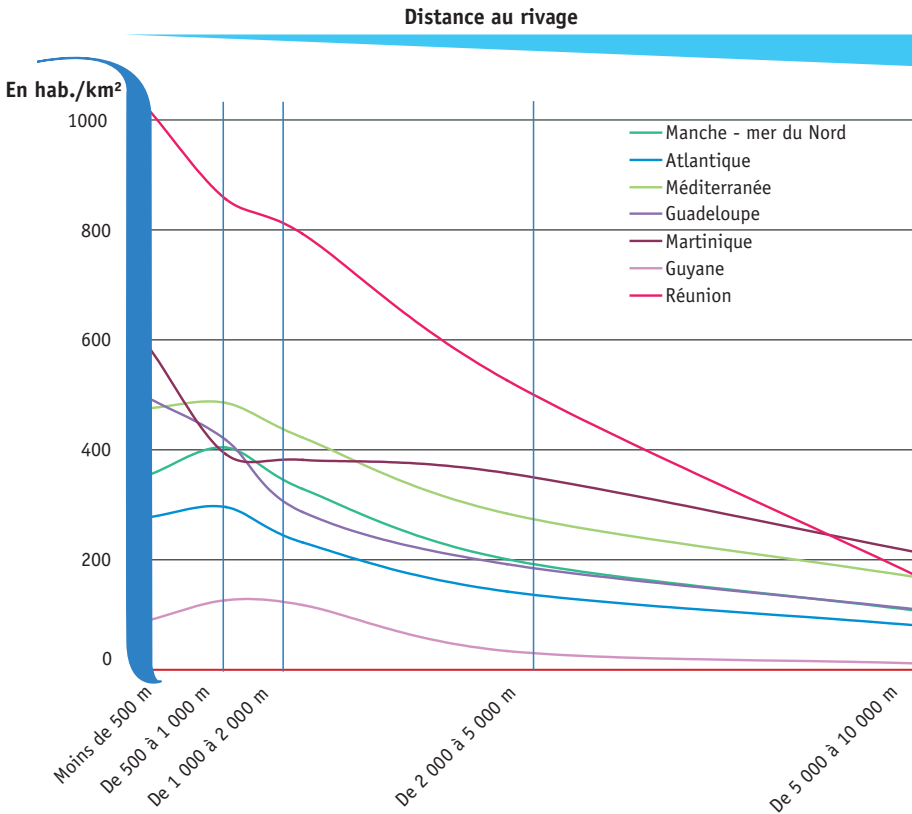
Figure 3 – Occupation moyenne du sol en métropole

Source : UE-SOeS, CORINE Land Cover 2006. Traitements : SOeS (Observatoire national de la mer et du littoral).

Le niveau de l'artificialisation progresse fortement en bord de mer. Sur la période 1990-2012, la pression de la construction de logements, mesurée en

mètres carrés construits par kilomètre carré, est 3 fois plus forte dans les communes littorales métropolitaines que sur l'ensemble du territoire hexagonal. Cette pression est 1,3 fois plus forte dans les communes littorales urbaines que la moyenne métropolitaine des pôles urbains. Ce rapport croît quand on s'éloigne des villes. Il est de 2,8 pour les communes périurbaines et de 4 pour les communes rurales, pour lesquelles la construction est très forte en bord de mer.

De même, la pression de construction de locaux non résidentiels (industrie, agriculture, services, etc.) est près de 2 fois plus forte en bord de mer que la moyenne hexagonale.



Infographie : studio du département de l'édition de la DILA.

Figure 4 – Estimation de la densité de population sur le littoral en fonction de la distance à la mer

Source : UE-SOeS, CORINE Land Cover, 2006 – © IGN, BD Carto®, occupation des sols, 2000 – Insee, Contours Iris 1999 et 2006. Traitements : SOeS (Observatoire national de la mer et du littoral).

En analysant des données précises et à grande échelle (IGN, BD TOPO®), on constate que les terres situées à moins de 250 m de la mer sont artificialisées en métropole, avec des niveaux très élevés en Provence-Alpes-Côte d'Azur (plus de 40 %) et à des niveaux élevés (au moins 25 %) dans les Pays-de-la-Loire, dans le Nord-Pas-de-Calais et en Basse-Normandie (figure 5). C'est pour l'ensemble du littoral 6 fois plus que la moyenne nationale.

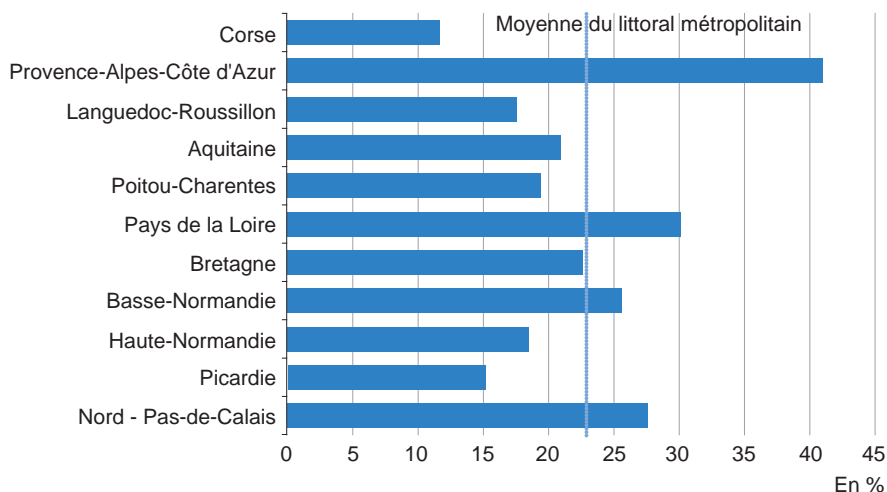


Figure 5 – Part des terres artificialisées à moins de 250 m de la côte

Source : © IGN-SHOM, Histolitt – © IGN, BD CARTO®, 2006 – © IGN, BD TOPO®, 2009. Traitements : SOeS (Observatoire national de la mer et du littoral).

Des enjeux importants dans les zones soumises à l'érosion, la submersion et les tsunamis

Le bord de mer concentre les zones soumises à l'érosion côtière, à la submersion marine et aux tsunamis. Les enjeux y sont importants.

Dans les zones basses (territoires littoraux dont l'altitude est inférieure à la hauteur atteinte par la mer avec une occurrence centennale), le tissu urbain occupe 5,6 % du territoire, c'est plus que la moyenne métropolitaine (3,9 %), mais moins que la moyenne des communes littorales. Beaucoup des zones basses métropolitaines sont en effet des polders et des zones de marais (marais breton, marais de Brouage, etc.), ce qui explique leur assez faible part de territoires urbanisés. À l'inverse, les terres agricoles, dont les prairies, représentent près des trois quarts de leur occupation du sol.

Ces zones basses, d'une superficie de 7 000 km², ont une population estimée à 850 000 habitants. On y compte 570 000 logements. Certains secteurs sont relativement peu habités comme la Camargue ; d'autres, à l'instar de la plaine des Flandres (territoire des Wateringues), ont une population importante et de nombreux enjeux industriels.

Ces territoires concentrent, par ailleurs, une part importante des installations conchylicoles, souvent la première activité impactée en cas de submersion.

Concernant l'érosion des côtes, les territoires urbanisés occupent 22,8 % de l'espace à moins de 250 m des côtes en recul (figure 6). C'est près de 6 fois plus que la moyenne métropolitaine. Cela représente près de 100 km², dont une part importante sur l'arc atlantique. La population vivant à moins de 250 m des côtes en érosion est estimée à un peu plus de 140 000 habitants. Du fait de la

présence importante de résidences secondaires dans ces secteurs, le nombre de logements est plus important avec 150 000 unités. Il a augmenté assez sensiblement ces dernières années (+7 % de 1999 à 2006).

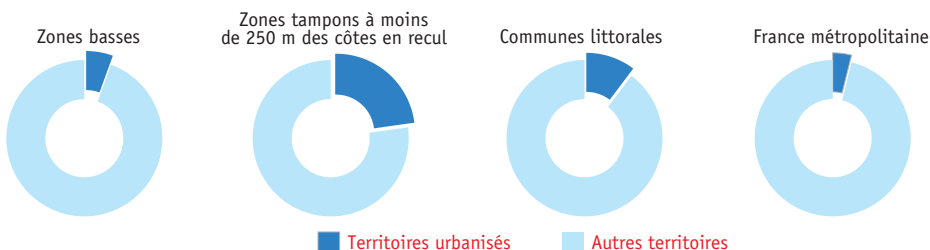


Figure 6 – Territoires urbanisés dans les zones littorales métropolitaines à enjeux

Source : MEDDE-CETMEF-CETE, 2010 – EuroSION database, 2004 – UE-SOeS CORINE Land Cover, 2006. Traitements : SOeS (Observatoire national de la mer et du littoral).

En lien avec cette forte urbanisation, le nombre d’infrastructures de transport inondées en cas de remontée de la mer de 1 mètre est très important (figure 7).



Figure 7 – Kilomètres d’infrastructures de transport inondées en cas de remontée du niveau de la mer de 1 mètre

Source : ONERC.

Des activités économiques liées à la mer

Certaines activités économiques ont une forte spécificité littorale et emploient une proportion plus importante de salariés que dans le reste du territoire. On peut citer le tourisme, la pêche, les activités de transport par eau, la construction navale ainsi que plusieurs secteurs industriels liés aux activités portuaires : raffinage du pétrole, sidérurgie, industrie chimique organique.

Chaque façade a son identité, en fonction de son histoire industrielle et portuaire, de sa géographie et de sa proximité aux grands bassins de vie. En Manche – mer du Nord, l’activité est marquée par la présence du secteur de la cokéfaction et de l’industrie nucléaire. Ainsi, pour pallier un risque sur les débits des fleuves, 14 réacteurs (sur 58) sont implantés en bord de mer de ce secteur maritime, comptabilisant 20 % de l’électricité nucléaire produite en France². Les activités de raffinage

2. Source : EDF : <http://energie.edf.com>.

de pétrole, de transport par eau et de sidérurgie/transformation de l'acier y sont aussi surreprésentées, de même que les secteurs primaires de la pêche et de l'aquaculture. La façade atlantique se distingue par la forte présence des secteurs de la construction navale, de matériel ferroviaire, aéronautique et spatial, mais aussi et surtout par un secteur « pêche, aquaculture » important. En Méditerranée, comme pour les deux autres façades maritimes, la construction navale et aéronautique, le raffinage de pétrole et l'industrie chimique organique sont des plus importants, aux côtés du secteur de transport par eau (maritime, côtier et fluvial).

Cependant, les emplois de la sphère résidentielle demeurent la plus grande part des activités avec en moyenne 44 emplois sur 100 dans ce domaine, et presque un emploi sur 2 (48 %) sur le littoral méditerranéen. Dans les territoires ultramarins les chiffres sont similaires avec 40 emplois sur 100, sauf en Guyane.

Une richesse écologique incomparable

Les richesses écologiques sont considérables sur la bande côtière terrestre et maritime.

Les espaces naturels, principalement les milieux ouverts non prairiaux, les zones humides et les surfaces en eau, couvrent 52 % de la surface des communes littorales. Ces espaces recèlent de nombreux habitats (plage, dune, marais, estuaire, mangrove, etc.) et espèces de grand intérêt. Un peu plus d'une centaine d'habitats écologiques côtiers d'intérêt communautaire sont recensés sur les rivages métropolitains. Ils constituent en particulier des lieux d'hivernage et de reproduction pour de nombreuses espèces, notamment de poissons ou d'oiseaux d'eau.

Les écosystèmes littoraux fournissent également d'importants services écosystémiques. En métropole, le quart du littoral subit l'érosion et recule. La végétalisation des arrière-plages et des plages permet de stabiliser les sols, les protégeant contre l'érosion par le vent et les marées. La couverture végétale offre également des qualités esthétiques et paysagères. Ainsi, la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, qui fait ultérieurement l'objet d'une présentation détaillée dans ce rapport, soutient le développement du génie écologique (action 8).

Un quart du territoire des communes littorales métropolitaines bénéficie d'au moins une protection réglementaire. Ce chiffre est près de deux fois supérieur à la moyenne hexagonale, mais il est inférieur à celui des départements d'outre-mer qui représentent une très grande partie de la biodiversité côtière française. Plus du quart des terres à moins de 250 m des côtes en recul sont désignées en zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique (ZNIEFF) de type I. Les aires marines protégées couvrent 16 % de la surface des eaux françaises (métropole et outre-mer) et l'objectif est d'atteindre 20 % à l'horizon 2020.

Le littoral tient une place particulière dans le projet de loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages avec la mise en place d'une nouvelle catégorie d'aire marine protégée : les zones de conservation halieutique qui permettent de conserver les zones fonctionnelles des ressources halieutiques. De

plus, le projet de loi conforte le rôle du Conservatoire du littoral³, établit la protection de 55 000 hectares de mangroves d'ici à 2020 et interdit le rejet en mer des eaux de ballast sans traitement qui sont nuisibles à la biodiversité.

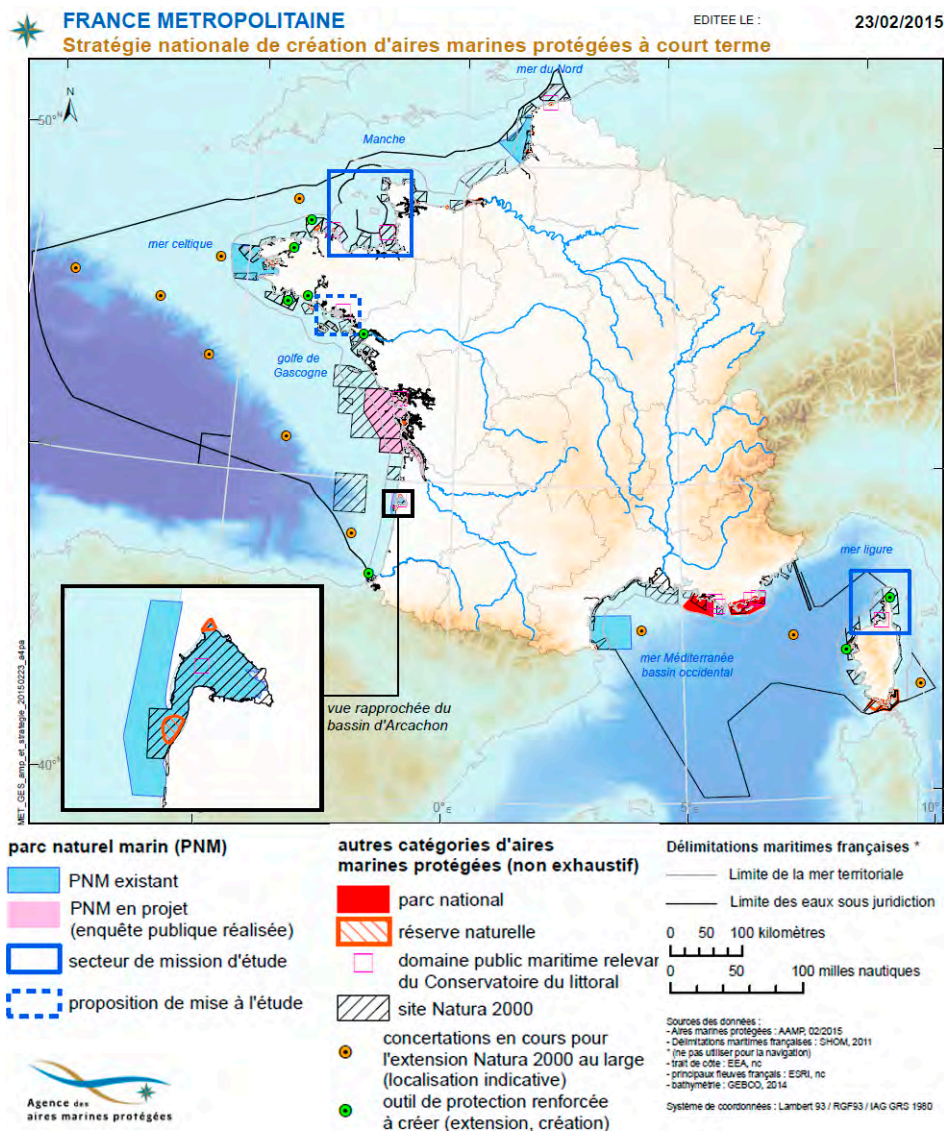


Figure 8 – Carte des aires marines protégées en France métropolitaine, existantes et en projet à la date du 23-02-2015

Source : Agence des aires marines protégées.

3. <http://www.conservatoire-du-littoral.fr/38-changement-climatique.htm>

Partie A

Les principaux impacts du changement climatique sur le littoral

Éric Brun, *MEDDE/DGEC/SCEE/ONERC*

© ONERC/Sylvain Mondon



Zone de rencontre de la mer et des terres, le littoral est directement touché par le changement climatique. Les impacts y prennent des formes multiples, héritant des changements passés ou préfigurant les changements futurs subis par les océans et par les continents.

Compte tenu des enjeux très forts autour du littoral décrits en introduction, il est important d'évaluer la forme que prendra ce changement climatique sur les zones littorales françaises, de métropole et des outre-mer et d'en peser les conséquences. C'est un préalable pour la prise de conscience des impacts induits et pour identifier puis mettre en œuvre les mesures d'adaptation nécessaires, dans le but de réduire les risques et les coûts associés.

Même en élargissant sa définition à la zone s'étendant sur plusieurs centaines de mètres de part et d'autre de l'estran (la zone entre les limites extrêmes de basse et de haute mer), le littoral reste une zone très petite en comparaison de l'échelle typique à laquelle sont produites aussi bien les analyses climatologiques traditionnelles que les projections climatiques globales ou régionales (Stocker *et al.*, 2013). Ainsi il est aujourd'hui impossible de décrire précisément, en tout point du littoral, les variations récentes du climat et d'en prévoir les variations futures. À l'exception d'études locales spécifiques à de petites bandes littorales, il faut se contenter aujourd'hui de projections faites à partir des données estimées de part et d'autre du littoral, soit en mer, soit sur les terres. Cela représente déjà une base de connaissances considérable et suffisamment solide pour appréhender la nature du changement climatique sur le littoral.

Celui-ci subit déjà de nombreux effets du changement climatique dont les principaux sont décrits ci-après. Ces effets seront de plus en plus visibles, que ce soit en métropole ou outre-mer, et seule une limitation très forte des émissions de gaz à effet de serre (GES) pourra contrecarrer cette évolution. Cependant, quels que soient les efforts réalisés, il faudra poursuivre la politique volontariste d'adaptation, notamment pour faire face à la hausse du niveau de la mer que l'inertie thermique de l'océan rend inéluctable. Les deux prochains chapitres de ce rapport seront largement consacrés à ce dernier phénomène.

Hausse des températures

La hausse des températures induite par l'augmentation de la concentration des GES se manifeste à la fois sur les continents et sur les océans. Dans son dernier rapport publié en 2014, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) estime que la température mondiale de l'air près de la surface a connu une tendance à la hausse d'environ 0,85 °C entre 1880 et 2012.

Cette hausse est plus forte, environ le double, au-dessus des terres qu'au-dessus des océans (GIEC, 2014). Cela est dû au fait que les eaux océaniques de surface se mélangent au cours du temps aux eaux plus profondes, si bien qu'il faut bien plus de chaleur pour réchauffer l'océan que pour réchauffer les surfaces

continentales. Même en absence de changement climatique, la très grande inertie thermique de l'océan est perceptible par chacun d'entre nous, car c'est elle qui tempère les cycles saisonniers. Elle explique le fait que les régions côtières connaissent au cours d'une année des amplitudes de température sensiblement plus faibles que les régions plus continentales.

Même en l'absence d'études spécifiques aux littoraux sur l'ensemble du globe, il est raisonnable de considérer qu'en général le littoral se réchauffe à un taux intermédiaire entre ceux respectifs de l'océan et des terres qu'il sépare. Cela dépend évidemment de nombreux facteurs, parmi lesquels le caractère insulaire plus ou moins prononcé ou bien la direction des vents dominants par rapport à l'orientation du littoral concerné. Ainsi, la figure A1 (Gibelin *et al.*, 2014) illustre ces évolutions tant sur le littoral nord-atlantique que sur les zones continentales ou méditerranéennes.

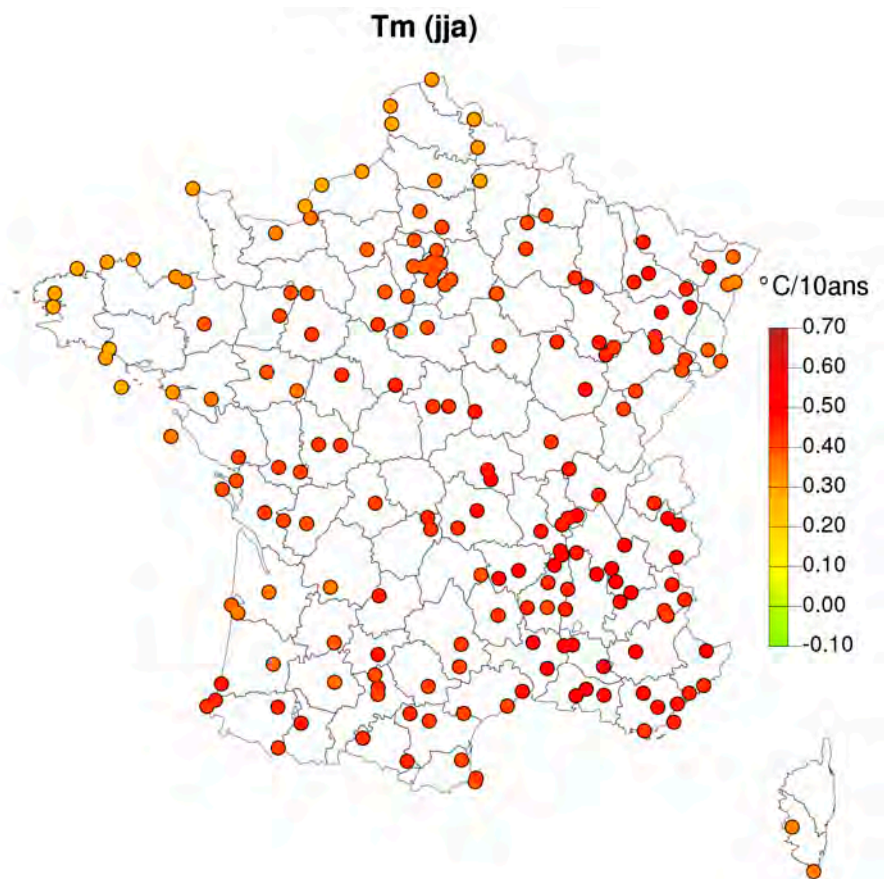
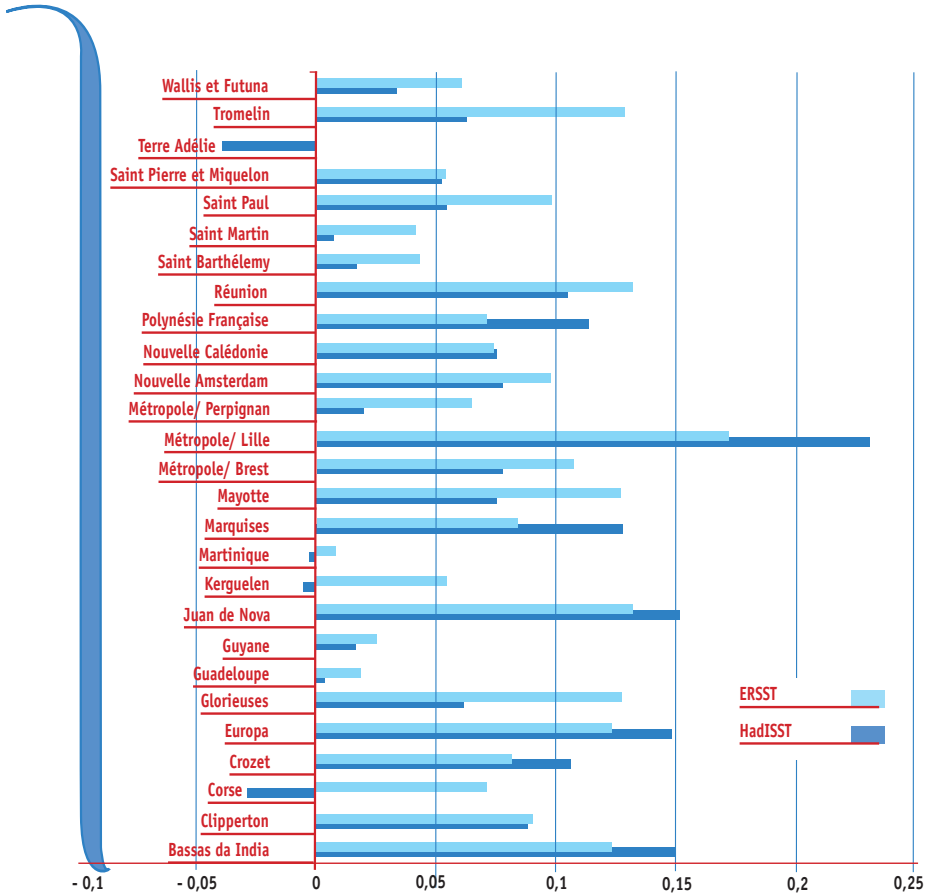


Figure A1 – Tendances annuelles des séries homogénéisées de température moyenne en été en °C par décennie, sur la période 1959-2009. Les points cerclés de noir indiquent les tendances significatives au seuil de confiance de 95 %

Source : Gibelin *et al.*, 2014.

La hausse récente des températures de l'air au-dessus des océans et des continents n'est pas la même selon les régions, mais la hausse de la température de surface de la mer est visible sur la quasi-totalité des domaines maritimes jouxtant la France métropolitaine et les DOM-COM. C'est ce que montre la figure A2 pour la période entre 1950 et 2005.



Infographie : studio du département de l'édition de la DILA.

Figure A2 – Tendence linéaire de la température de surface de la mer (°C/décennie) sur la période 1995-2005 autour des 27 sites indiqués

Source : IRD.

Compte tenu des dernières projections climatiques publiées par le GIEC, les océans et les continents continueront à se réchauffer au cours du ^{xxi}e siècle, même dans le cas où les émissions de GES retrouveraient d'ici la fin du siècle leur niveau d'avant le début de l'ère industrielle, vers 1850. Cela est dû en grande partie à la longue durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère (plus de cent ans) ainsi qu'à l'inertie thermique des océans.

Mais l'ampleur du réchauffement dépendra beaucoup de l'évolution des émissions de GES d'ici la fin du siècle (voir l'encadré «De la modélisation climatique globale à la modélisation régionale», *infra*). Dans le cas où aucune politique climatique volontariste ne parviendrait à infléchir le rythme actuel d'accroissement des émissions mondiales de GES, le réchauffement global sur la Terre à la fin du siècle serait autour de 4,5 °C par rapport à l'ère préindustrielle (GIEC, 2014).

En cohérence avec la hausse des températures observée depuis 1900, le réchauffement attendu sera plus fort sur les continents que sur les océans, compte tenu de l'inertie thermique des océans mentionnée précédemment. Cela est confirmé pour la plupart des scénarios d'émission de GES et par la plupart des modèles de climat utilisés par le GIEC. C'est ce que traduit la figure A3. Elle synthétise, sur la base de l'ensemble des modèles et scénarios considérés, la hausse relative de la température dans chaque grande région, en fonction de la hausse de température moyennée sur l'ensemble du globe.

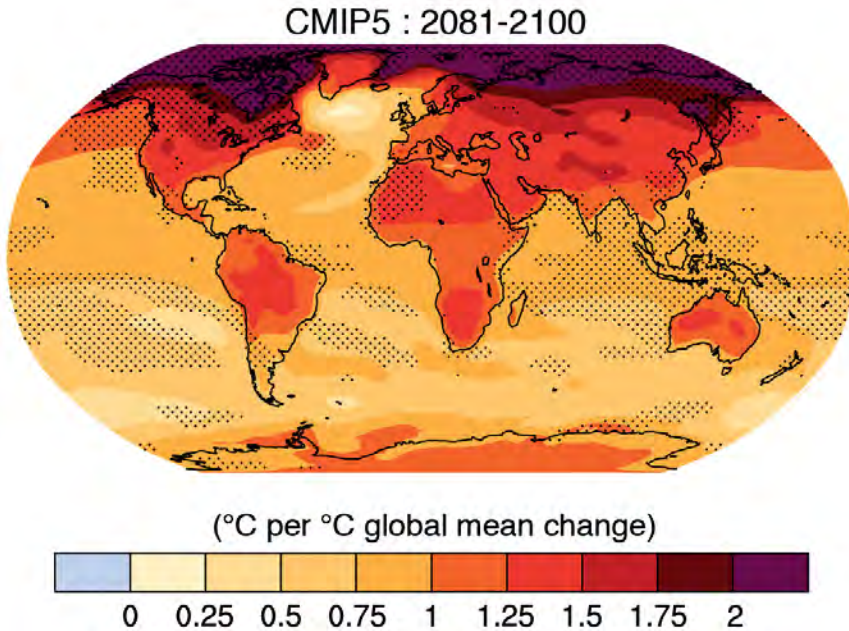


Figure A3 – Configuration de l'évolution de la température selon la moyenne des modèles utilisés dans Climate Models Intercomparison Project 5 (CMIP5), mis à l'échelle selon l'évolution correspondante de la température moyenne mondiale. La configuration a été obtenue en calculant la différence entre les moyennes des vingt dernières années des expériences du ^{xxi} siècle (2081-2100) et des vingt dernières années des expériences historiques (1986-2005) et en remettant à l'échelle chaque différence selon l'évolution correspondante de la température moyenne mondiale.

Source : figure extraite de Stocker *et al.* (2013).

En première approximation, la figure A3 montre que la hausse de la température au-dessus de l'océan Atlantique au large de la France sera comprise entre 50 et

75 % de la hausse moyenne sur le globe, la hausse au-dessus de la Méditerranée entre 100 et 125 % comme au-dessus du territoire métropolitain. La Nouvelle-Calédonie et La Réunion sont dans une zone où la hausse est comprise entre 50 et 75 %, tandis que les Antilles et l'Atlantique au large de la Guyane sont dans une zone de hausse comprise entre 75 et 100 % de la hausse globale.

Il faut garder en mémoire que cette synthèse a été obtenue par des modèles climatiques dont la maille de calcul était pour la plupart comprise entre 100 et 250 km, si bien que des îles comme La Réunion, la Martinique ou la Guadeloupe y sont généralement représentées par des points de grille aux caractéristiques essentiellement ou totalement océaniques. Il ne faut donc surtout pas traduire directement la hausse globale de température projetée (GIEC, 2014) à la fin du siècle (2081-2100) par rapport à l'ère préindustrielle (1,1 à 2,5 °C pour le scénario Representative concentration pathway 2.6 (RCP2.6), 1,9 à 3,5 °C pour le scénario RCP4.5, 2,2 à 3,9 °C pour le scénario RCP6.0 et 3,4 à 5,6 °C pour le scénario RCP8.5) en multipliant cette hausse par les valeurs affichées sur la figure A3.

Le littoral se réchauffera lui aussi dans des proportions sans doute assez proches des valeurs intermédiaires entre celles des océans et des terres qu'il sépare. Au stade actuel des connaissances, il est encore impossible de dresser des projections détaillées tout au long du littoral de la France métropolitaine ou des DOM-COM. En effet, il faudrait pour cela pouvoir simuler l'évolution de l'océan, du continent et de l'atmosphère au plus près de la côte, à des résolutions adaptées à la physiographie du littoral, tout en assurant le couplage avec l'océan hauturier et l'atmosphère aux limites du domaine. C'est encore aujourd'hui hors de portée des capacités de calcul disponibles si l'on veut traiter de grandes zones géographiques telles que le littoral atlantique. C'est pourquoi les projections climatiques régionales, telles que celles faites dans le cadre du projet international COordinated Regional climate Downscaling EXperiment sur l'Europe (EURO-CORDEX) (Jacob *et al.*, 2014), ont limité leur ambition à des simulations à maille très fine (12,5 km), mais où seule l'atmosphère était simulée à cette échelle. Les conditions océaniques étaient déduites des simulations à échelle plus grossières réalisées pour le rapport du GIEC, telles que celles synthétisées dans la figure A3. Ces projections climatiques régionales sont cependant très utiles pour préciser les projections de hausse des températures près des côtes. Ce sont plusieurs scénarios extraits de celles-ci, produits par l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), Météo-France et le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancées en Calcul Scientifique (CERFACS), qui ont été rendus accessibles sous le portail de données « Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements » (DRIAS¹), en réponse aux besoins d'information pour la mise en œuvre des mesures d'adaptation au changement climatique.

Des programmes de recherche s'attachent à approfondir la forme que prendra le changement climatique près du littoral. Deux méthodes sont privilégiées, d'une

1. <http://www.drias-climat.fr/>

part le développement de modèles climatiques couplés océan-atmosphère couvrant de grandes zones géographiques, mais à des résolutions de l'ordre de la vingtaine de kilomètres, d'autre part le développement de modèles locaux à des résolutions très fines (typiquement 100 m à 1 km), mais ne couvrant que des très petites zones.

Évolution des précipitations

L'effet du littoral sur le régime de précipitations est plus complexe que celui sur les températures, en particulier lorsque la côte est bordée de zones montagneuses. Il est aujourd'hui difficile d'apporter plus de précisions que celles déductibles des simulations globales réalisées pour le GIEC ou de celles régionalisées dans le cadre de EURO-CORDEX, citées précédemment. En comparaison des projections de hausse des températures, il y a moins de consensus entre les différents modèles climatiques pour ce qui concerne l'augmentation ou la diminution des précipitations, sauf en quelques régions du monde telles que la Méditerranée. La figure A4 donne une idée très générale des évolutions à attendre pour le littoral de la Métropole et pour les DOM-COM.

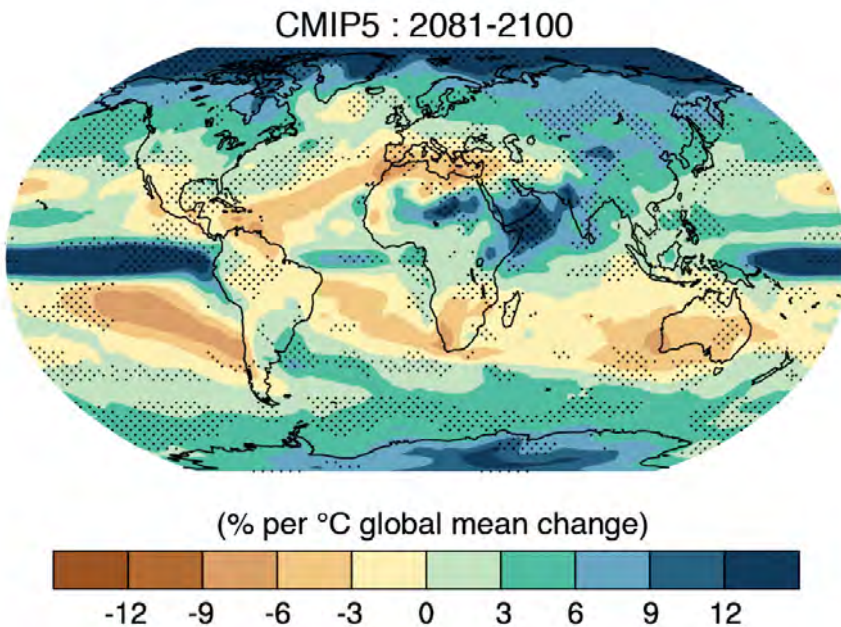


Figure A4 – Configuration de l'évolution des précipitations en pourcentage selon la moyenne des modèles CMIP5, mises à l'échelle selon l'évolution correspondante de la température moyenne mondiale. La configuration a été obtenue en calculant la différence entre les moyennes des vingt dernières années des expériences du ^{xxi} siècle (2081–2100) et des vingt dernières années des expériences historiques (1986–2005) et en remettant à l'échelle chaque différence selon l'évolution correspondante de la température moyenne mondiale.

Source : figure extraite de Stocker *et al.* (2013).

Sur le littoral métropolitain, les précipitations à l'horizon de la fin du ^{xxi}^e siècle devraient diminuer sensiblement sur la moitié sud de la France et plus particulièrement sur les régions méditerranéennes (Ouzau *et al.*, 2014 et <http://www.drias-climat.fr/>). La diminution sera d'autant plus sensible que les émissions de GES auront été fortes d'ici cette échéance. Seules les régions les plus au nord de la France verraient leurs précipitations varier peu en moyenne annuelle, une augmentation en hiver compensant une diminution attendue en été. La plupart des DOM-COM, à l'exception de Saint-Pierre-et-Miquelon, se situent dans des régions où une diminution des précipitations annuelles est attendue.

Il faut noter que même dans les zones où les précipitations devraient diminuer en moyenne annuelle, les pluies seront en général plus intenses, mais sur des périodes plus courtes, favorisant, dans les zones littorales qui s'y prêtent, des éboulements de falaise ou des glissements de terrain.

Impact du changement climatique sur les tempêtes et les cyclones

Les tempêtes, qui ont lieu plutôt en hiver sur la côte atlantique et en automne sur la côte méditerranéenne, jouent un rôle extrêmement important sur de nombreux aspects du littoral. Pendant des siècles, elles ont endeuillé les marins et leurs familles et marqué la culture des populations côtières. Grâce à la qualité croissante des prévisions météorologiques, le nombre des naufrages a considérablement diminué. Mais les tempêtes continuent à causer d'importants dégâts dans les zones littorales, avec parfois des conséquences humaines dramatiques en cas de submersion, comme lors de la tempête Xynthia en février 2010. Elles causent également des dégâts importants par érosion de la côte ou destruction du bâti par les vagues, comme ce fut le cas sur la côte atlantique lors de la succession exceptionnelle de tempêtes durant l'hiver 2013-2014. La Méditerranée connaît régulièrement des tempêtes, parfois exceptionnelles, comme en novembre 1982 et décembre 1997², qui entraînent des dégâts considérables sur le littoral et remodelent parfois les plages des stations balnéaires, engendrant de gros travaux de restauration.

Des tempêtes ou vents forts lointains peuvent également générer une forte houle qui se propage sur des centaines ou milliers de kilomètres puis déferle sur les côtes sous la forme de très grosses vagues souvent destructrices. La côte atlantique, mais aussi les Antilles et La Réunion sont régulièrement concernées par les dégâts d'une houle générée loin de leurs rivages.

Au cours des soixante dernières années, le nombre de tempêtes ayant frappé la France a beaucoup varié d'une année sur l'autre, mais sans montrer pour autant de tendances significatives, ni à la hausse ni à la baisse (CGDD, 2011). Le dernier rapport du GIEC signale le manque de connaissances scientifiques sur l'intensité

2. <http://pluiesextremes.meteo.fr/>

des tempêtes qui ont frappé les régions océaniques de moyenne latitude, au cours du xx^e siècle. Plusieurs méthodes existent pour reconstruire l'historique des tempêtes passées, aboutissant parfois à des résultats contradictoires. Ainsi, depuis les cent dernières années, aucune tendance significative ne se dégage, à la hausse ou bien à la baisse, ni sur le nombre de tempêtes ayant frappé l'ouest et le sud de l'Europe ni sur leur intensité.

Dans le dernier rapport du GIEC, les simulations climatiques pour le scénario RCP8.5, correspondant aux émissions les plus fortes de CO_2 , indiquent à la fin du xxi^e siècle une baisse dans la fréquence des tempêtes de l'hémisphère Nord sans tendance significative sur leur intensité. Mais le rapport insiste sur la confiance encore très faible à accorder aux projections dans ce domaine pour le bassin Nord-Atlantique.

En dehors du strict cadre des tempêtes, il y a un certain consensus dans le dernier rapport du GIEC quant à une hausse des pressions sur la zone atlantique au large de la France pour la fin du siècle. Cette hausse sera d'autant plus grande que les concentrations en GES seront fortes. Cela donne une confiance supplémentaire aux résultats obtenus précédemment par Charles *et al.* (2012) estimant que le changement climatique devrait se traduire par une diminution de la hauteur des vagues à la côte dans le golfe de Gascogne, plus forte en été (figure A5). Cette étude montrait également que ce changement associé à un changement de direction de la houle aurait comme conséquence une diminution du flux de sédiment le long de la côte.

Les DOM-COM situés dans les régions tropicales sont régulièrement frappés par des cyclones tropicaux dont certains causent des dommages considérables sur leur littoral. De façon générale, la connaissance sur les trajectoires et intensités des cyclones s'est considérablement accrue depuis les années 1970 grâce à leur surveillance par des satellites. Le nombre de cyclones dans chacun des principaux bassins océaniques tropicaux varie énormément d'une année sur l'autre et aucune tendance certaine ne se dégage quant à une augmentation de leur nombre au cours des dernières décennies (GIEC, 2014). En revanche, il est quasiment certain que l'intensité et la fréquence des cyclones les plus forts ont augmenté depuis 1970 dans le bassin Atlantique Nord, dans lequel se situent les Antilles.

Pour ce qui concerne l'avenir, il subsiste encore de grandes incertitudes sur l'évolution à attendre des cyclones tropicaux, même pour les scénarios avec les plus fortes concentrations de GES. Il est probable que d'ici la fin du xxi^e siècle le nombre de cyclones soit diminuera, soit ne changera pas, tandis que la force maximum des vents et les quantités de pluie associées devraient augmenter (GIEC, 2014).

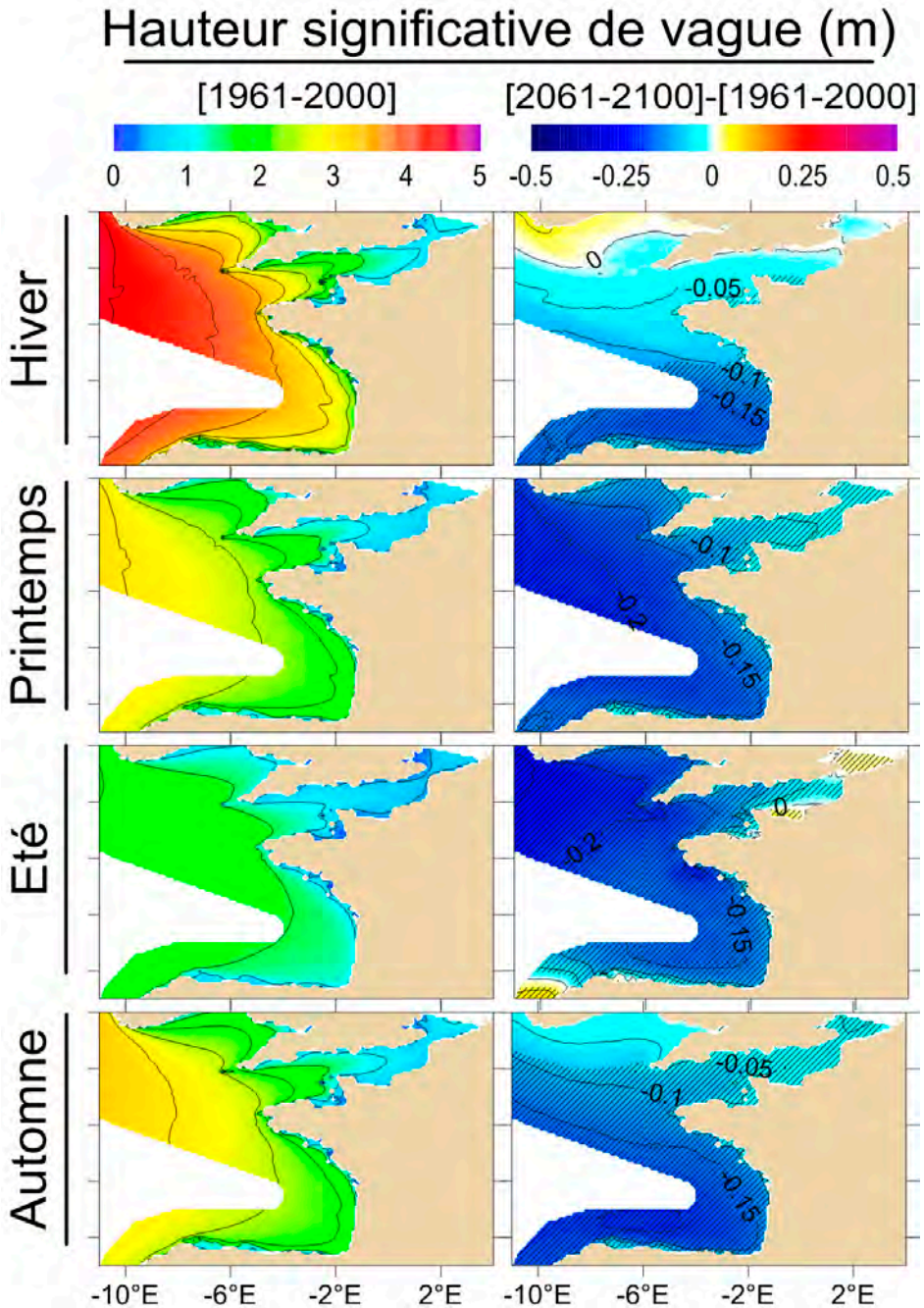


Figure A5 – Hauteur significative des vagues pour la période de référence 1961-2000 (colonne de gauche) et différence de hauteur significative de vagues (colonne de droite) entre le scénario A2 pour la période 2061-2100 et la période de référence. Les zones hachurées indiquent les zones où le changement est significatif à plus de 95 %

Source : adapté de Charles et al. (2012).

Impact du changement climatique sur la hausse du niveau des mers

Une des principales conséquences du changement climatique est la hausse du niveau des mers. Ce phénomène est principalement dû à la dilatation thermique de l'océan qui se réchauffe et à la fonte des glaciers de montagne et des calottes polaires. Avec déjà près de 20 cm de hausse en moyenne sur l'ensemble des océans depuis plus d'un siècle, la hausse du niveau des mers est conséquente et ne cesse de s'accélérer depuis les dernières décennies (GIEC, 2014). Les répercussions sur le littoral sont très importantes, notamment vis-à-vis des risques de submersion marine et des intrusions salines dans les aquifères d'eau douce. Elles constituent un enjeu majeur pour le siècle à venir, compte tenu de la très forte hausse du niveau des mers attendue même pour les scénarios intermédiaires. C'est pourquoi le chapitre suivant de ce rapport sera entièrement consacré à ce phénomène et à ses principales conséquences.

Acidification de l'océan

Depuis quelques années, l'acidification des océans prend une part croissante dans le débat sur le changement climatique. Bien que ni la hausse des températures ni tout autre paramètre climatique n'en soient la cause, l'acidification est associée au changement climatique, car elle résulte elle aussi de l'augmentation de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère. En effet, à l'interface océan-atmosphère s'établit un équilibre entre la pression de gaz carbonique dans l'océan et celle dans l'atmosphère. Cette dernière ayant augmenté consécutivement aux émissions anthropiques depuis l'ère industrielle, l'océan cherche à maintenir l'équilibre des concentrations et puise du CO_2 atmosphérique qui se dissout d'abord dans les eaux superficielles puis dans les eaux plus profondes par mélange.

En première analyse, ce phénomène a le mérite de limiter considérablement la concentration de CO_2 dans l'atmosphère, retardant ainsi le réchauffement du climat. Environ 30 % des plus de 2000 milliards de tonnes de CO_2 émises par les activités humaines depuis 1750 (GIEC, 2014) ont été absorbées par les couches superficielles de l'océan qui se mélangent progressivement aux couches plus profondes. Mais cette énorme quantité de CO_2 dissoute dans l'eau de mer a généré la production d'acide carbonique, si bien que le pH de l'océan superficiel a déjà diminué de 0,1 en moyenne sur le globe depuis le début de l'ère industrielle (GIEC, 2014). Cela correspond à une augmentation de 26 % de l'acidité exprimée en tant que concentration en ions hydrogène.

Il est facile d'imaginer qu'une telle acidification – le GIEC en prévoit d'ailleurs une accentuation au cours du prochain siècle dont l'ampleur dépendra du niveau des émissions futures de CO_2 – suscite de nombreuses études pour en évaluer les impacts potentiels. Au stade actuel des connaissances, il faut s'attendre à des conséquences très importantes sur de nombreux processus dits « biogéochimiques » qui régissent la vie de nombreux organismes et micro-organismes marins (CGDD, 2011 ; PIGB, 2013). C'est particulièrement le cas pour certaines espèces

de plancton, de crustacés, de mollusques et de coraux. Les enjeux relatifs à l'acidification sont considérables, car ils touchent directement aux différents réseaux de chaîne alimentaire dans l'océan, regroupés sous le terme de réseau trophique, à la biodiversité et à de nombreuses activités socio-économiques telles que la pêche et la conchyliculture (PIGB, 2013). Les récifs coralliens sont eux-mêmes directement menacés, avec des conséquences potentielles considérables en termes de biodiversité et de protection du littoral ultramarin contre l'érosion. Comme c'est le cas dans de nombreux domaines de recherche encore récents et touchant un ensemble très vaste de disciplines, les incertitudes sont aujourd'hui encore très grandes quant aux impacts précis de l'acidification sur les écosystèmes (GIEC, 2014 ; projet ACIDBIV³ ; Range *et al.*, 2014 ; ONERC, 2012).

Impact du changement climatique sur la biodiversité des régions littorales

Les zones littorales présentent des caractéristiques physiques très différentes de celles des régions continentales ou marines qu'elles séparent, si bien qu'elles abritent des écosystèmes très spécifiques, voire uniques pour beaucoup d'entre eux. C'est évidemment le cas pour l'estran tantôt couvert ou découvert par les marées, mais c'est aussi le cas pour la bande maritime ou terrestre de part et d'autre de l'estran. Le littoral abrite notamment des zones humides très particulières, notamment dans les deltas fluviaux, où souvent se côtoient et se mélangent eaux douces et eaux salées. Les espèces d'oiseaux y sont très nombreuses. De même les eaux souvent peu profondes au large de l'estran ou bien à l'intérieur des lagons présentent des conditions très particulières où le fond marin bénéficie de conditions lumineuses réservées ailleurs aux seules eaux de surface. Des écosystèmes spécifiques profitent de ces conditions pour s'y développer. C'est le cas au sein des récifs coralliens qui sont connus pour abriter une biodiversité extrêmement riche.

Les écosystèmes qui occupent les zones littorales sont le fruit de processus multiples et très complexes pour lesquels l'environnement climatique joue un rôle particulièrement important. Certaines espèces de zooplanctons requièrent, par exemple, des conditions de température très précises, si bien que les paléoclimatologues se servent de leurs traces dans les sédiments pour reconstituer les températures du passé sur plusieurs millions d'années. Toute modification des conditions climatiques dans une zone littorale risque de bouleverser profondément les fragiles équilibres dans lesquels les écosystèmes existants se sont établis et développés.

Mais les conditions climatiques ne sont pas le facteur unique contrôlant l'établissement et le développement des écosystèmes des zones littorales, ni même dans certains cas le facteur principal, si bien qu'il est aujourd'hui impossible de dresser un panorama complet des impacts possibles du changement climatique sur la biodiversité. Il est par contre certain que celui-ci sera très fort et qu'il concernera de très nombreux domaines, comme cela a été mentionné dans plusieurs rapports et

3. <http://www.circle-med.net>

colloques récents (GIEC, 2014 ; CGDD, 2011 ; projet GICC/LITEAU⁴ ; PIGB, 2013). Parmi les facteurs non climatiques, il faut mentionner la pression sans cesse croissante de nombreuses activités humaines. Parmi celles-ci peuvent être cités l'urbanisation du littoral et ses rejets massifs d'effluents polluants, l'aménagement du littoral pour gagner des terres sur la mer ou sur les marais côtiers, la pêche, les activités maritimes et portuaires et l'aquaculture. L'introduction d'espèces d'origines lointaines, potentiellement invasives, joue également un rôle important notamment par la vidange des ballasts de certains navires ou le creusement de canaux reliant deux bassins océaniques initialement séparés. Coll *et al.* (2010) estiment que 53 % des plus de 600 espèces nouvellement observées en Méditerranée sont arrivées par le canal de Suez. Plus récemment sont apparus les champs d'éoliennes en mer et les turbines marémotrices qui nécessitent la construction en mer d'importantes infrastructures. Ainsi, sur le littoral, la pression subie par les écosystèmes est exercée par le changement global plutôt que par le seul changement climatique.

Certains effets du changement climatique peuvent néanmoins être illustrés :

- la hausse des températures de l'eau et de l'air sur le littoral modifie déjà sensiblement l'environnement de certaines espèces vivantes animales ou végétales. Pour les oiseaux occupant occasionnellement ou en permanence le littoral, la problématique n'est sans doute pas très différente de celle des oiseaux occupant des aires continentales. Il s'agit principalement de changements de répartition géographique ou de pratiques migratoires afin de conserver un environnement favorable à la nidification et à l'alimentation ;
- la hausse de la température de l'eau suite au changement climatique a clairement été identifiée comme facteur clé dans la prolifération de l'huître creuse du Pacifique sur la côte bretonne (Lejart, 2009) dans le cadre du projet de recherche PRORIG du programme LITEAU (Basilico *et al.*, 2011). Comme dans d'autres cas d'espèces invasives, ce phénomène conjugue l'introduction artificielle d'une espèce, ici une huître de culture, qui a trouvé, grâce à la hausse des températures, des conditions favorables pour sa prolifération ;
- des études se focalisent sur l'impact à attendre du changement climatique sur la distribution de certaines espèces, notamment halieutiques. C'est le cas, par exemple, du projet CHannel integrated Approach for marine Resource Management (CHARM), soutenu par le programme Interreg de l'Union européenne dont la démarche et les principaux résultats sont décrits dans l'encadré « Exemple d'étude d'impact du changement climatique sur la ressource halieutique, le projet CHARM », (*infra*) ;
- la hausse des températures sur le littoral touchera également les plages de sable, avec des conséquences potentiellement très importantes sur l'avenir des populations de certaines tortues marines. En effet, comme dans le cas de nombreux reptiles, le sexe des tortues nouveau-nées dépend étroitement de la température d'incubation des œufs (Pieau, 1995). Une hausse sensible des températures des plages ultramarines pourrait provoquer un déséquilibre dans la répartition mâle/femelle des tortues, avec une proportion bien plus importante de tortues femelles qui pourrait à terme menacer les capacités de reproduction de certaines espèces de tortues marines (Petit, 2009) ;

4. <http://www.gip-ecofor.org/gicc/?q=node/353>

– la conjonction d’une hausse des températures et d’une baisse des précipitations sur la majeure partie du bassin méditerranéen fait partie des scénarios d’évolution les plus probables décrits aussi bien dans le 4^e que dans le 5^e rapport du GIEC. De telles conditions augmenteront l’évaporation des eaux méditerranéennes qui est déjà aujourd’hui supérieure aux précipitations. À l’aide d’un ensemble de simulations climatiques régionales, Adloff *et al.* (2015) ont montré que même les scénarios d’émission de GES les plus optimistes conduisaient à une hausse très sensible de la salinité en surface sur la plupart du bassin (figure A6). Les conditions de salinité rencontrées dans le bassin nord-ouest seront alors proches de celles rencontrées actuellement dans le bassin sud-est, dont la biodiversité est sensiblement moins riche (Coll *et al.*, 2010). Le programme de recherche « Mediterranean Integrated STudies at regional and Local Scales » (MISTRALS⁵) du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) a pour objectif de mieux comprendre les divers processus qui régissent le fonctionnement de l’atmosphère, de la mer et des surfaces continentales du bassin Méditerranéen, de façon à évaluer la forme précise qu’y prendra le changement climatique, y compris en termes de biodiversité ;

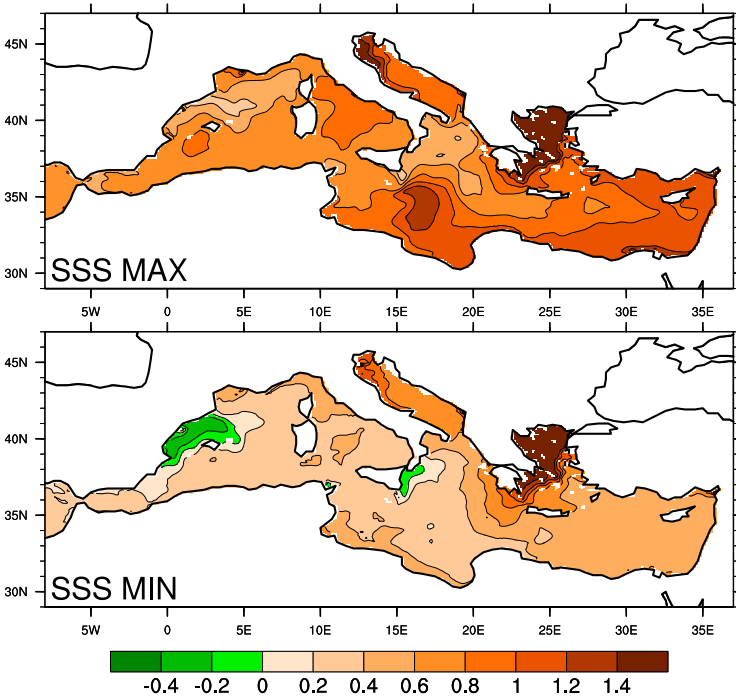


Figure A6 – Composite des anomalies de salinité de surface maximale (haut) et minimale (bas) pour la période 2070-2099 par rapport à la période 1961-1990. Chaque point de grille représente respectivement les maxima et minima parmi l’ensemble des 6 scénarios utilisés dans l’étude.

Source : adapté de Adloff *et al.* (2015).

5. <http://www.mistrals-home.org/spip/spip.php?rubrique1>

- la hausse de la température des couches superficielles de la mer sur la plupart du globe ainsi que les variations de salinité à la hausse ou à la baisse selon les régions (GIEC, 2014) modifieront sensiblement les processus qui contrôlent la circulation thermohaline⁶ et les mélanges entre eaux superficielles et eaux profondes. Cela aura des impacts très importants sur l'oxygénation et sur le contenu en nutriments des eaux superficielles près des côtes, et donc sur les écosystèmes marins près du littoral ;
- dans les étangs salés, des conditions plus chaudes en surface limiteront le mélange avec les couches profondes, favorisant ainsi la concentration des nutriments en surface et le risque d'eutrophisation⁷, avec des impacts forts attendus sur certaines espèces vivant dans ces milieux très particuliers ;
- avec la hausse des températures et des modifications dans les régimes de précipitations, le régime hydrique et l'apport sédimentaire des fleuves seront modifiés radicalement dans certaines régions. Cela bouleversera le fonctionnement physique et biologique des estuaires qui abritent des écosystèmes très spécifiques. Ce bouleversement sera accentué par l'élévation du niveau des mers. Les impacts ne seront pas limités aux seuls estuaires, car ces derniers sont souvent le lieu de reproduction de nombreuses espèces de poissons vivant plus au large et le lieu de croissance de leurs juvéniles. Compte tenu de l'importance des enjeux spécifiques aux estuaires, le MEDDE soutient le projet de recherche « Conséquences du changement climatique sur l'écogéomorphologie des estuaires⁸ » (C3E2) dans le cadre de son programme GICC ;
- avec le changement climatique est attendue avec grande certitude l'intensification des précipitations extrêmes (Stocker *et al.*, 2013), même dans les régions où les précipitations diminueront en moyenne sur l'année. Sur le littoral, ces événements favoriseront des apports fluviaux sporadiques de nutriments en suspension ou dissous dans les rivières en crue, ce qui aura sans aucun doute des impacts sur les écosystèmes proches des embouchures ou situés dans les zones humides côtières. Le programme de recherche MISTRALS, précédemment cité, s'intéresse également à ces processus pour mieux les quantifier et anticiper leur évolution future.

Enfin, il faut rappeler la menace posée par l'acidification des océans sur la biodiversité évoquée plus haut, dont les enjeux sont considérables, car ils ont un impact direct sur le fonctionnement du réseau trophique. C'est l'ensemble de la chaîne alimentaire marine qui pourrait être atteinte avec de lourdes conséquences sur la sécurité alimentaire humaine (la Food and Agriculture Organization [FAO] estime qu'en 2011 la pêche et l'aquaculture apportent 6,5 % des protéines dans l'alimentation humaine mondiale, valeur s'élevant à 8,4 % pour la France).

Impacts socio-économiques

Même s'il est impossible aujourd'hui d'évaluer précisément quels seront les impacts socio-économiques du changement climatique sur le littoral métropolitain

6. Circulation permanente à grande échelle de l'eau des océans, engendrée par les écarts de température et de salinité des masses d'eau.

7. <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/ecosys/eutrophisat.html>

8. C3E2 <http://www.gip-ecofor.org/gicc/?q=node/346>

ou ultramarin, il est certain que ceux-ci seront considérables. La hausse du niveau des mers, dont les principaux aspects sont détaillés dans le chapitre suivant, aura assurément des impacts importants sur la valeur patrimoniale de nombreuses constructions compte tenu des risques que font peser l'érosion des côtes et les événements de submersion sur le bâti.

L'impact du changement climatique sur la biodiversité aura des conséquences très lourdes sur l'exploitation des ressources de la mer, notamment si l'acidification de l'océan se poursuit à rythme accéléré. La pêche et la conchyliculture pourraient être durablement affectées par les modifications profondes de la chaîne trophique. L'émergence de maladies nouvelles liées à la hausse des températures ainsi que la plus grande fréquence d'événements d'eutrophisation des lagunes pourraient avoir également des effets néfastes sur la conchyliculture.

La hausse des températures et la diminution des précipitations estivales sur le littoral métropolitain auront assurément des impacts sur le tourisme. À titre d'exemple, le projet PESETA (Amlung et Moreto, 2009) s'est attaché à mesurer l'impact potentiel du changement climatique sur le tourisme en Europe. Pour cela, l'étude a utilisé un indice climatique spécifique adapté au tourisme en Europe dont les valeurs pour les horizons temporels 2020 et 2080 ont été comparées aux valeurs pour les années dites 1970 dans l'étude, basées en fait sur la période 1961-1990. La figure A7 montre cette évolution pour deux scénarios d'émission de GES utilisés dans le 4^e rapport du GIEC, le scénario intermédiaire B2, proche du RCP6.0 et celui plus pessimiste A2, proche du RCP8.5.

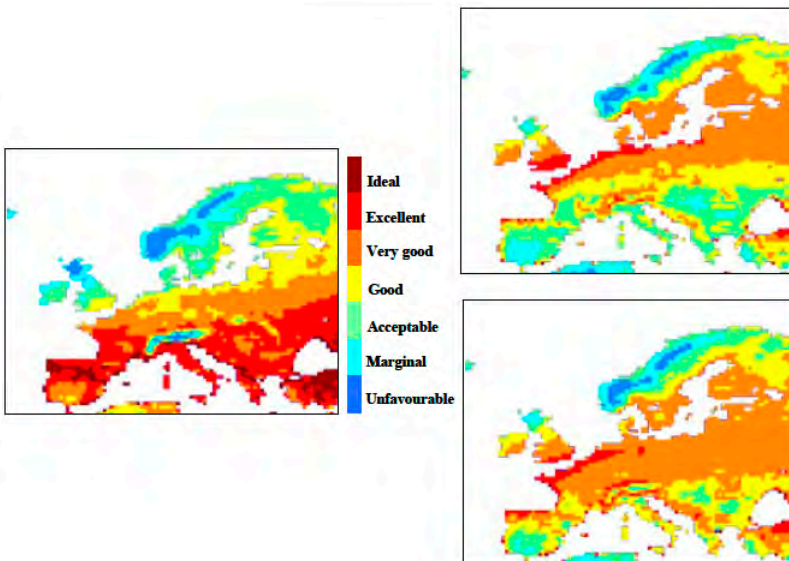


Figure A7 – Évolution en été de l'indice climatique spécifique pour le tourisme entre les années 1970 (gauche) et les années 2080 (droite) pour le climat simulé avec le modèle climatique régional RCAO dans le cadre des scénarios SRES A2 (haut) et B2 (bas)

Source : d'après Amlung et Moreto (2009).

Avec le modèle régional climatique, les conditions climatiques prévues en été à l'horizon 2080 deviennent bien plus favorables sur les côtes nord-atlantiques et Manche que sur la côte méditerranéenne, contrairement à la situation actuelle. Avec ces hypothèses, il faut noter que l'indice climatique pour le tourisme serait plus favorable sur l'ensemble du littoral français dans le cas du scénario B2 que dans le cas du scénario A2, car la hausse des températures prévues serait alors tellement forte dans ce second scénario que l'inconfort deviendrait important même sur le littoral du nord de la France.

Mais comme le soulignent Van de Walle *et al.* (2009) dans une enquête du CREDOC, des études basées sur des indices climatiques touristiques établis dans le cadre actuel sont réductrices. En effet, elles ne prennent en compte qu'une partie des critères qui conditionnent les habitudes touristiques. Les autres critères, tels que l'offre touristique, la dimension culturelle, les conditions économiques ou bien encore les conditions de transport évolueront fortement au cours des prochaines décennies, venant tempérer les conclusions que l'on peut tirer des seuls critères climatiques.

« Exemple d'étude d'impact du changement climatique sur la ressource halieutique, le projet CHARM »

Sandrine Vaz, Ifremer

Le programme européen de coopération transfrontalière Interreg IV a soutenu le projet de recherche « CHannel integrated Approach for marine Resource Management » (CHARM) avec un cofinancement par le FEDER. Ce projet franco-britannique proposait un ensemble d'instruments intégrant les connaissances scientifiques essentielles pour une gestion durable des ressources marines vivantes de la Manche*.

La Manche est une zone importante pour la pêche artisanale avec des caractéristiques hydrodynamiques fortes. En conséquence, les populations de poissons et les assemblages d'espèces présents dans cette mer, peu profonde et sous influence continentale, sont suspectés d'être fortement affectés tant par l'hétérogénéité d'un tel environnement que par l'intensité potentielle de l'impact anthropique. Un des objectifs du projet était de mieux comprendre l'environnement marin de la Manche vis-à-vis de ses ressources biologiques en simulant des scénarios d'impacts de changement des habitats marins et de niveaux de l'exploitation pouvant influencer les ressources vivantes marines.

La Manche et le sud de la mer du Nord ont été soumis à une activité de pêche soutenue depuis plus de cent ans. La preuve des effets négatifs de la surpêche existe pour beaucoup de stocks régionaux comprenant des espèces commercialement et écologiquement importantes telles que la morue (*Gadus morhua*). Ainsi, l'effort de pêche par son effet sur la

* <http://www.charm-project.org/fr/presentation/charm-iii-aperçu>

mortalité et la taille de la population est supposée avoir déjà fortement affecté les populations de poissons dans ce secteur. Bien que les effets de la pêche soient prononcés, des décalages climatiques ont également contribué fortement aux fluctuations dans la diversité et l'abondance de poissons marins par des changements de croissance, de survie et de succès reproducteur.

Avec le développement de nouvelles techniques statistiques et de systèmes d'informations géographiques, des modèles prédictifs de distribution d'habitat sont de plus en plus employés pour relier la répartition géographique des espèces ou des communautés à leur environnement. L'habitat des poissons correspond aux secteurs géographiques dans lesquels les gammes des facteurs environnementaux permettent la présence d'une espèce donnée ou d'un assemblage particulier d'espèces, et délimite leur habitat optimum. Dans ce contexte, les scénarios de climat sont d'un grand intérêt. La corrélation rapportée entre la répartition géographique passée ou actuelle des espèces et une variable de climat peut être employée pour extrapoler une future distribution sur la base d'un certain scénario de changement climatique. La taille de population totale et le taux de mortalité par pêche peuvent également jouer un rôle important dans l'étalement de l'habitat optimum des poissons en entraînant l'extension ou la contraction de la distribution de la population par des phénomènes de densité-dépendance**.

Sur la base des données biologiques collectées sur toutes les espèces de poissons vivant sur le fond (benthiques), proches de celui-ci (démersales) ou vivant en pleine eau (pélagiques), il est possible d'identifier et de décrire les populations et les communautés existantes dans la Manche et de les relier aux conditions physiques et hydrologiques, et parfois à la taille du stock***, quand elle est disponible. Il est donc possible de modéliser et prédire la distribution de populations et de communautés à partir de paramètres environnementaux et de l'état démographique connu de la population. Cependant, la capacité de ces descripteurs à fournir à eux seuls (sans information sur la chaîne alimentaire, les interactions entre espèces ou de la dynamique de population) une prévision acceptable de la distribution des ressources vivantes marines doit être évaluée.

La pêche professionnelle et le changement climatique ont certainement influencé conjointement la composition des populations de poissons marins. Cependant, il est important de séparer les pressions liées au

** Phénomène de densité-dépendance : ensemble des mécanismes naturels influant sur la taille d'une population et dépendant de la densité de cette dernière telles la prédation, les maladies et la compétition pour la nourriture ou l'espace.

*** Stock : partie exploitable de la population d'une espèce dans une zone donnée.

changement climatique de celles provoquées plus directement par l'activité humaine et d'analyser leurs effets relatifs sur les changements de distribution des espèces. Le développement des modèles prédictifs d'habitat permet également de mesurer la contribution relative des descripteurs persistants de l'environnement (la profondeur ou les types de sédiment), des descripteurs changeants induits par le climat (température, salinité) et des descripteurs affectés par la pêche (taille de population totale et taux de mortalité par pêche). Ce travail résulte en une hiérarchisation de l'importance de ces facteurs et permet d'évaluer quels facteurs affecteront le plus une population de poissons donnée en cas de changement.

Des scénarios de changement de climat et de population ont été conçus pour explorer la modification des populations et de la structure des communautés, et ce que serait leur nouvelle distribution spatiale potentielle sous ces scénarios. Les scénarios choisis représentent des situations extrêmes dans les gammes environnementales et de taille de stock observées jusqu'à présent, et ne prennent pas en compte les mécanismes de rétroaction qui peuvent se produire dans la chaîne trophique et dans les interactions interspécifiques.

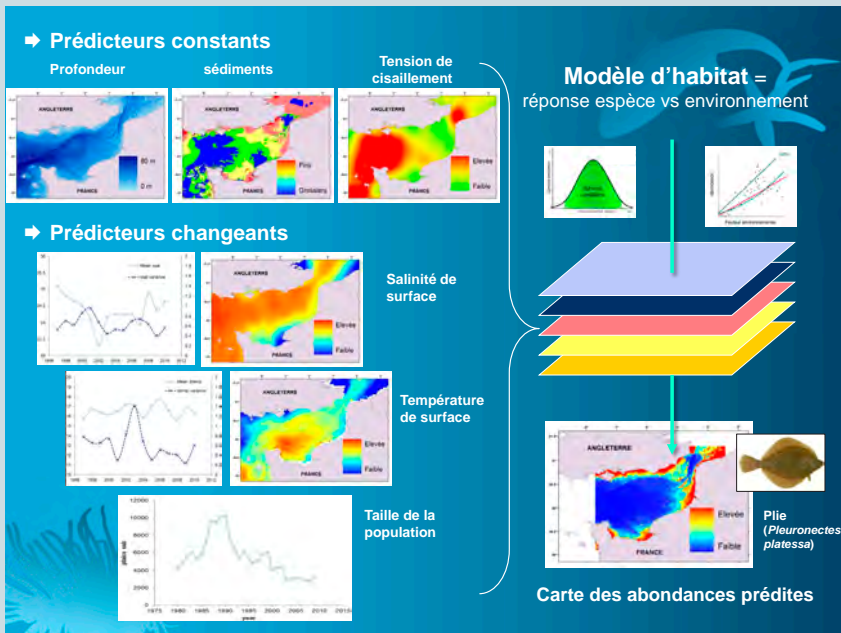


Figure A8 – Illustration de la stratégie de modélisation mise en œuvre pour estimer l'impact du changement climatique sur les stocks de plie

Source : Ifremer.

Bien que les stratégies de modélisation pour simuler les impacts potentiels du milieu naturel et de l'homme présentent des limites fondamentales, l'approche proposée dans le cadre du projet CHARM peut fournir une première approximation utile quant à l'impact potentiellement dramatique du changement climatique et de la surexploitation sur la biodiversité. Une telle approche peut permettre la gestion des habitats partagés des communautés de poissons et la prévision de leurs variations tant en termes de composition que de distribution. Les types de communautés ayant une composition d'espèces, de niveaux d'abondance et de diversité contrastés, et correspondant à une forte affinité pour un habitat résistant aux changements du climat ou aux usages anthropiques, peuvent tirer bénéfice de l'établissement des zones marines protégées ou d'autres plans de gestion spatialement explicites. Ce type de gestion peut être particulièrement important dans le contexte d'usages marins multiples et d'augmentation de la pression anthropique en Manche.

De la modélisation climatique globale à la modélisation régionale

Les modèles climatiques globaux

Pour répondre aux questions posées par le changement climatique et ses impacts, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) utilise des simulations de modèles du système climatique et des études économiques et démographiques, qui représentent un large éventail d'évolutions possibles du climat. Les simulations climatiques sont réalisées à partir de modèles numériques appelés « modèles de circulation générale ».

Ces modèles se présentent sous forme de codes informatiques qui résolvent des équations complexes décrivant l'évolution temporelle du mouvement et de l'énergie des océans, de l'atmosphère et des surfaces continentales. Le modèle intègre ainsi des lois de la physique, dont celles qui déterminent le transfert radiatif entre la Terre et le sommet de l'atmosphère. Ces codes sont parmi les plus gros programmes informatiques qui existent actuellement dans le monde. Leur utilisation nécessite des puissances de calcul considérables. À chaque instant et en chaque point du maillage utilisé, ces modèles intègrent également l'influence des gaz à effet de serre (GES) sur l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales, que ces gaz soient d'origine naturelle ou liés aux activités humaines. L'effet spécifique à ces derniers est appelé « forçage anthropique », c'est-à-dire, dû à l'augmentation des GES découlant des activités humaines. La figure A9 décrit le maillage du modèle de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), l'un des modèles utilisés par le GIEC.

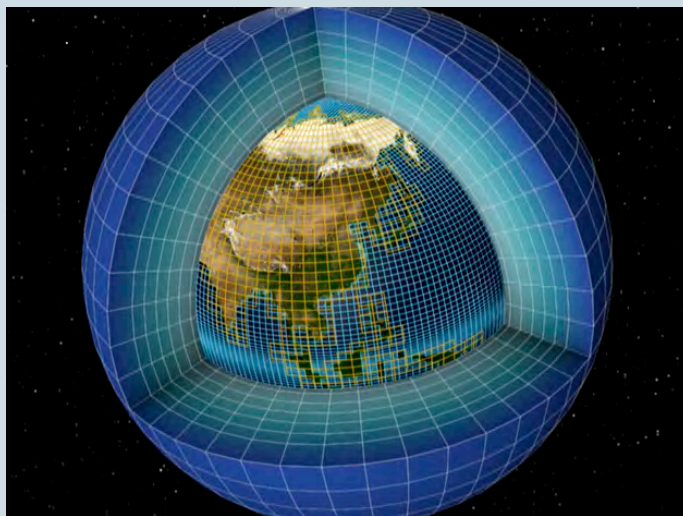


Figure A9 – Illustration du maillage utilisé dans le modèle de climat de l'IPSL pour calculer le mouvement et l'état physique de l'atmosphère, de l'océan et des surfaces continentales

Source : CEA.

Si pour le climat passé récent l'ensemble des forçages (y compris les forçages naturels tels que les éruptions volcaniques) peut être déterminé à partir d'observations, pour les simulations du climat futur, seuls les forçages anthropiques sont utilisés au travers de scénarios d'émissions.

Les scénarios climatiques

Jusqu'au 4^e rapport d'évaluation du GIEC, les projections climatiques étaient fondées sur les scénarios du rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES en anglais), proposant plusieurs évolutions socio-économiques (A1, A2, B1, B2, A1B, etc.). Ces scénarios socio-économiques consistent à faire diverses hypothèses sur le développement économique futur et ses conséquences sur l'environnement. Ils sont fournis par des modèles d'évaluation intégrés qui prennent en compte l'évolution de la population, le fonctionnement de l'économie, le développement industriel et agricole, ainsi que la chimie atmosphérique et le changement climatique. Ils se traduisent en scénarios d'évolution des GES et des aérosols, qui sont introduits comme forçage dans les simulations climatiques. Pour le 5^e rapport d'évaluation, la communauté scientifique a défini un ensemble de quatre nouveaux scénarios appelés « profils représentatifs d'évolution de concentration » (RCP).

Le tableau A1 résume, pour chacun de ces quatre scénarios, le forçage radiatif total approximatif pour l'année 2100 par rapport à 1750, ainsi que la concentration en CO₂ correspondante (GIEC, 2013).

Scénario	Forçage radiatif vers 2100 (W/m ²)	Concentration en CO ₂ vers 2100 exprimée en éq-CO ₂ (*) (ppm)	Profil d'évolution
RCP2.6	2,6	475	Pic puis déclin
RCP4.5	4,5	630	Stabilisation avant 2100
RCP6.0	6,0	800	Stabilisation après 2100
RCP8.5	8,5	1 313	Croissant (sans politique climatique)

(*) Équivalent CO₂ : concentration de CO₂ qui entraînerait le même forçage radiatif qu'un mélange de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre ou d'aérosols.

Tableau A1 – Forçage radiatif total approximatif pour l'année 2100 par rapport à 1750 et concentration en CO₂ correspondante

Exprimé en W/m², un forçage radiatif est un changement du bilan radiatif (différence entre le rayonnement entrant et le rayonnement sortant), soit au sommet de la troposphère (couche la plus basse de l'atmosphère dont le sommet est situé entre 9 et 16 km d'altitude environ selon la saison et la latitude notamment), soit au sommet de l'atmosphère, dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat comme la concentration des gaz à effet de serre.

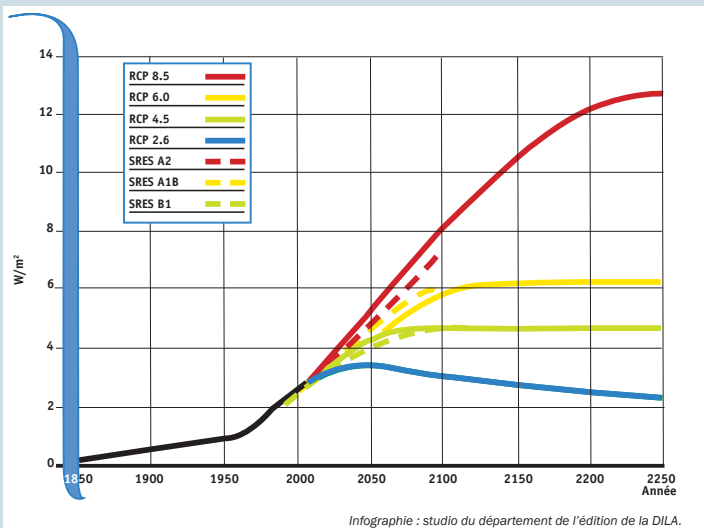


Figure A10 – Évolution du forçage radiatif pour les quatre scénarios RCP et comparaison avec les scénarios SRES

Source : adaptée de Stocker et al. (2013)

Une comparaison avec les anciens scénarios SRES (figure A10), pour leur période commune, montre que le RCP8.5, scénario extrême, est un peu plus fort que l'ancien scénario SRES dénommé « A2 ». Le RCP6.0 est proche du scénario SRES A1B, tandis que le RCP4.5 est proche du SRES B1. Le seul profil d'évolution sans équivalent avec les anciennes propositions

du GIEC est le RCP2.6 qui intègre les effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2 °C.

La modélisation régionale

Notamment à cause des coûts liés au temps de calcul, les simulations climatiques globales sont faites en général à une résolution spatiale de 50 à 200 km. Celle-ci n'est pas suffisante pour préciser certains aspects locaux du changement climatique. Pour contourner ce problème, la communauté scientifique a développé des méthodes de régionalisation climatique, basées soit sur des méthodes statistiques, soit sur des modèles numériques à plus fine échelle. Dans ce dernier cas, le surcoût de calcul dû au maillage plus fin est compensé par une diminution du domaine géographique qui ne couvre plus la terre entière. Les modèles globaux servent alors de conditions de forçage pour les modèles régionaux que l'on peut alors considérer comme emboîtés dans les modèles globaux. Ces méthodes permettent de décrire avec beaucoup plus de précisions les reliefs continentaux ou les fonds marins, ce qui est essentiel pour représenter les climats ou les courants marins locaux. La figure A11 illustre la qualité de la représentation du relief et des fonds marins atteignable aujourd'hui dans des systèmes climatiques régionaux tels qu'ALADIN-Climat développé par Météo-France, avec une résolution de 50 km pour le maillage de l'atmosphère et de 10 km environ pour celui de l'océan.

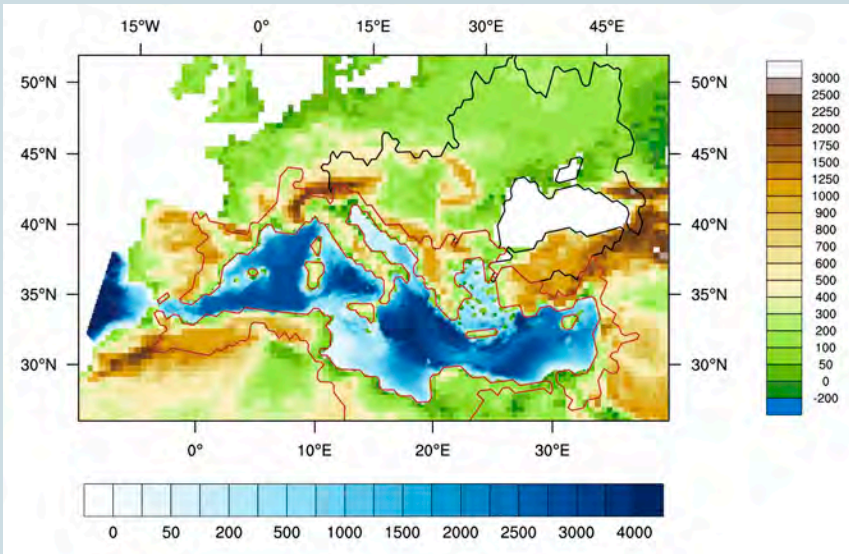


Figure A11 – Altitude des surfaces continentales et profondeur des océans dans le modèle climatique régional ALADIN-Climat de Météo-France

Source : Météo-France.

Partie B

Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises

Synthèse du volume 5 du *Climat de la France au XXI^e siècle*
produit dans le cadre de la mission confiée à **Jean Jouzel**

(**CEA – LSCE/IPSL - CNRS**), écrit par :

Serge Planton, *Météo-France/CNRM*

Gonéri Le Cozannet, *BRGM*

Anny Cazenave, *CNES*

Stéphane Costa,

Université de Caen Basse-Normandie

Olivier Douez, *BRGM*

Pierre Gaufres, *CEREMA*

François Hissel, *ONEMA*

Déborah Idier, *BRGM*

Vanessya Laborie, *CEREMA*

Vincent Petit, *BRGM*

Philippe Sergent, *CEREMA*

Le climat de la France au XXI^e siècle

Volume 5

À travers six actions,
le plan national d'adaptation
au changement
climatique permet à la
France d'anticiper
le futur du climat.

ADAPTER

RAPPORTS

DGEC

Mars 2015



Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises

Serge Planton, *Météo-France/CNRM*,
Gonéri Le Cozannet, *BRGM*,
Anny Cazenave, *CNES*,
Stéphane Costa, *Université de Caen - Basse-Normandie*,
Olivier Douez, *BRGM*,
Pierre Gaufres, *CEREMA*,
François Hissel, *ONEMA*,
Déborah Idier, *BRGM*,
Vanessya Laborie, *CEREMA*,
Vincent Petit, *BRGM*,
Philippe Sergent, *CEREMA*.

Sous la direction de **Jean Jouzel**, *CEA - LSCE/IPSL*



Introduction

À l'échelle d'une vie humaine, le niveau moyen des océans et la répartition océan/continent paraissent figés dans le temps, immuables. Toutefois, les observations géologiques témoignent de larges variations du niveau moyen des mers lors des grands changements climatiques passés, reflétant le volume des glaces continentales. Ainsi, le niveau des mers était-il plusieurs mètres au-dessus de son niveau actuel lors de périodes chaudes passées, comme la dernière période interglaciaire (il y a environ 125 000 ans), ou les périodes chaudes du Pliocène (il y a environ 3,3 millions d'années), témoignant de la vulnérabilité des calottes de glace actuelles (Groenland et Antarctique) à des variations de quelques degrés de la température moyenne à la surface de la Terre. Inversement, le niveau des mers a diminué lors des glaciations, atteignant à son minimum environ 130 m en dessous du niveau actuel lors du dernier maximum glaciaire, il y a environ 20 000 à 25 000 ans, du fait de la formation de calottes de glace en Amérique du Nord et en Eurasie. Au cours de la déglaciation, le niveau de la mer est remonté rapidement jusqu'à 8 000 ans avant la période actuelle, puis plus graduellement pendant les millénaires suivants, et il s'est stabilisé voici environ 3 000 ans. Au cours des deux millénaires précédant le ^{xix}^e siècle, le niveau des mers était stable, avec des variations de moins de 6 cm par siècle.

Toutefois, les données accumulées depuis le début du ^{xx}^e siècle ont mis au jour une tendance significative : le niveau de la mer a augmenté rapidement au cours du dernier siècle, à un rythme jusqu'à 5 fois supérieur à celui des derniers millénaires (de 1,5 à 3 mm par an). Un large consensus existe parmi la communauté scientifique pour attribuer ce phénomène au réchauffement du climat moyen observé sur la même période. La montée des températures dans les basses couches de l'atmosphère entraîne une augmentation du niveau marin par le biais de plusieurs facteurs. D'une part, les océans se dilatent (phénomène « d'expansion thermique »), des océans plus chauds occupant un volume plus important. D'autre part, la fonte et l'écoulement dans l'océan des glaciers de montagne et des calottes du Groenland et de l'Antarctique génèrent un apport d'eau douce plus important à l'océan. Enfin, la hausse des températures s'accompagne de changements du cycle hydrologique qui ont une influence sur le stockage d'eau sur les continents, qui dépend aussi des activités humaines via les systèmes de retenues et le pompage des nappes souterraines.

Observations du niveau de la mer

Variations passées du niveau de la mer

Sur des échelles de temps géologiques, de l'ordre de plusieurs centaines de millions d'années, les variations du niveau marin sont contrôlées par les variations de la forme des bassins océaniques, dues principalement à l'activité tectonique de

la planète : subduction de plaques océaniques, collision des continents, ouverture de nouveaux océans et formation des dorsales océaniques. Les marges continentales enregistrent les modifications des lignes de rivage, et donc du niveau marin.

Au cours du dernier million d'années et sur des échelles de temps comprises entre quelques milliers et plusieurs centaines de milliers d'années, les variations d'élévation du niveau de la mer suivent les cycles astronomiques d'environ 100 000 ans responsables de l'alternance entre périodes glaciaires et interglaciaires. En effet, le niveau moyen des océans dépendant directement de l'équilibre entre la quantité d'eau présente sous forme de glace continentale (glaciers et calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique) et la quantité d'eau dans les bassins océaniques, il est fortement lié à la température atmosphérique terrestre moyenne. La figure B1 illustre cette dépendance sur les derniers 800 000 ans (ce qui englobe 8 cycles astronomiques), mais en excluant les derniers siècles (la concentration en CO₂ vient d'atteindre 400 ppm¹).

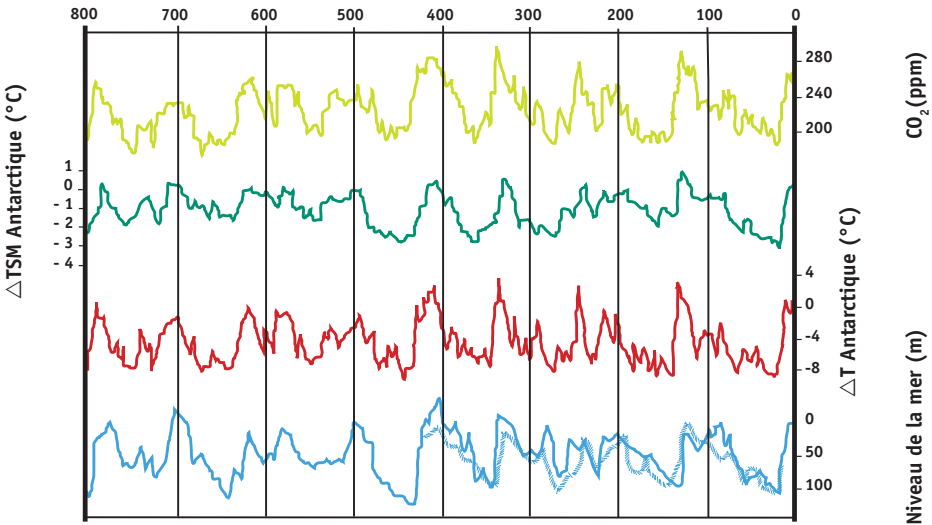


Figure B1 – Reconstitutions sur les derniers 800 000 ans de la concentration de CO₂ dans l’atmosphère (en vert clair), de la température de la surface de la mer (TSM) tropicale (en vert foncé), de la température au dôme Concordia sur l’Antarctique (en rouge) et des évolutions passées du niveau moyen global de la mer (en bleu). Le signe Δ représente une différence par rapport à la valeur actuelle.

Source : d’après Masson-Delmotte et al. (2013).

Les périodes glaciaires sont caractérisées par un niveau moyen des océans bas, allant jusqu’à 130 m en dessous du niveau actuel lors du dernier maximum glaciaire intervenu il y a environ 21 000 ans. À l’inverse, les périodes interglaciaires sont marquées par des niveaux marins élevés. Ainsi, lors du précédent épisode

1. ppm : parties par million. C’est le rapport du volume de CO₂ dans l’atmosphère par rapport au volume total de gaz.

interglaciaire (Éémien, entre 116 000 et 129 000 ans avant la période actuelle), on estime que le niveau marin a dépassé le niveau actuel de 5 à 10 m, avec une estimation la plus probable à 6 m. Au cours de cette dernière période, les données paléoclimatiques indiquent une variabilité significative du niveau des mers, dont l'ampleur fait débat ; elle a pu dépasser 2 m par 1 000 ans. À partir de son niveau au dernier maximum glaciaire, et jusqu'au début de l'Holocène, période interglaciaire actuelle ayant débuté il y a 11 700 ans, le niveau de la mer s'est élevé à un taux moyen d'environ 1 m par siècle. L'élévation du niveau marin s'est ensuite ralentie il y a 6 000 ans. Durant les deux, trois derniers millénaires, le taux d'élévation s'est stabilisé à environ 0,5 mm/an (avec des variations inférieures à 6 cm par siècle), jusqu'à une accélération récente, depuis la fin du XIX^e siècle, clairement détectée dans les observations instrumentales les plus anciennes des marégraphes (Wöppelmann *et al.*, 2008).

Hormis pour les variations observées depuis l'ère industrielle, toutes ces évolutions passées ont pu être reconstruites à partir de données paléoclimatiques et géologiques. La composition isotopique (rapport O^{18}/O^{16} dans les foraminifères² et les coraux) permet, par exemple, d'estimer les volumes des calottes glaciaires et la température des océans pour en déduire le niveau de la mer (Bard *et al.*, 1990 ; Waelbroeck *et al.*, 2002). Aux échelles de temps de quelques siècles à quelques milliers d'années, on utilise aussi des biomarqueurs d'anciennes lignes de rivage ou niveaux d'eau, ainsi que des données archéologiques (Lambeck *et al.*, 2010).

Observations du niveau moyen de la mer

Pour le XX^e siècle et la dernière décennie, deux principaux moyens d'observation du niveau de la mer existent : les marégraphes et les altimètres spatiaux.

Les marégraphes fournissent une mesure relative du niveau de la mer par rapport à la croûte terrestre sur laquelle ils reposent, car ils enregistrent aussi les mouvements verticaux de celle-ci. En cherchant à connaître uniquement la composante climatique du niveau de la mer, il faut donc corriger la mesure marégraphique des mouvements du sol. Si, au contraire, on s'intéresse à la hausse totale locale, celle ressentie par les populations, alors, c'est bien la mesure relative qu'il faut considérer.

L'altimétrie satellitaire fournit quant à elle une mesure absolue référencée au centre des masses de la Terre. L'altimétrie fournit donc essentiellement la composante climatique du niveau de la mer.

2. Les foraminifères sont des organismes unicellulaires marins ayant la particularité de posséder une coquille appelée « test » perforée de pores.

• *Données marégraphiques*

Les premières mesures du niveau de la mer datent du XVIII^e siècle et furent réalisées à partir d'échelles de marée, simples règles graduées fixées sur les quais. Peu précises, elles se limitaient à l'observation des phases de pleines et basses eaux. Une mesure plus précise du niveau marin est permise depuis l'ère post-industrielle grâce aux marégraphes, appareils permettant l'enregistrement automatique des variations de l'altitude de la surface océanique par rapport à une référence locale. Les premiers marégraphes à flotteur du XIX^e siècle, dont les mouvements horizontaux étaient retranscrits sur papier pour obtenir une courbe d'évolution du niveau de l'eau en fonction du temps, ont fait place à des systèmes plus perfectionnés comme les marégraphes à ultrasons ou les marégraphes à pression. Toutefois, leur principe est le même : mesurer le niveau instantané de la mer au cours du temps en un lieu particulier et enregistrer les données (et les communiquer à distance pour les appareils les plus récents).

La mesure du niveau moyen des océans nécessite de filtrer les données pour se débarrasser des variations liées aux vagues et houles, aux marées, ou à des situations météorologiques particulières. Les données de niveau de la mer sont donc moyennées sur des périodes allant du mois à l'année.

Les données marégraphiques historiques ont plusieurs limites. D'une part, elles ont une distribution spatiale hétérogène : elles se situent principalement dans l'hémisphère Nord le long des côtes européennes et américaines (il existe quelques longs enregistrements marégraphiques dans l'hémisphère Sud mais en nombre limité), et ne donnent donc aucune information sur le niveau marin en plein océan. D'autre part, la densité du réseau marégraphique a fortement varié dans le temps, le réseau actuel étant beaucoup plus dense qu'au début du XX^e siècle. Les marégraphes n'ont pas toujours fonctionné en continu et on retrouve ainsi des « trous » dans les séries de données pour nombre d'entre eux.

• *Données altimétriques*

Les données des marégraphes sont complétées depuis le début des années 1990, par les observations des satellites altimétriques : Topex/Poseidon (lancé en 1992), Jason-1 (2001), Envisat (2002), Jason-2 (2008) et AltiKa (2013). Ces données permettent d'obtenir une cartographie quasi mondiale de la hauteur de la surface des océans avec une très grande précision et, par la même occasion, d'estimer la distribution régionale de la vitesse d'élévation du niveau de la mer. Au fil des différentes missions altimétriques, la précision de la détermination du niveau instantané de la surface de la mer est passée de quelques décimètres à environ 1 à 2 cm aujourd'hui.

Le principe de la mesure altimétrique est le suivant : le radar altimètre émet des impulsions radioélectriques et mesure leur temps de propagation aller-retour. Il en déduit la distance exacte entre l'antenne du satellite et la surface de la mer située sur sa verticale, dite « distance altimétrique ». Connaissant avec précision l'orbite du satellite, on peut en déduire l'altitude du satellite relativement à une

surface fixe dans le temps. Il suffit ensuite de faire la différence de ces deux grandeurs pour obtenir le niveau instantané de l’océan par rapport à l’ellipsoïde de référence (figure B2) : niveau de la mer = altitude satellite – distance altimétrique.

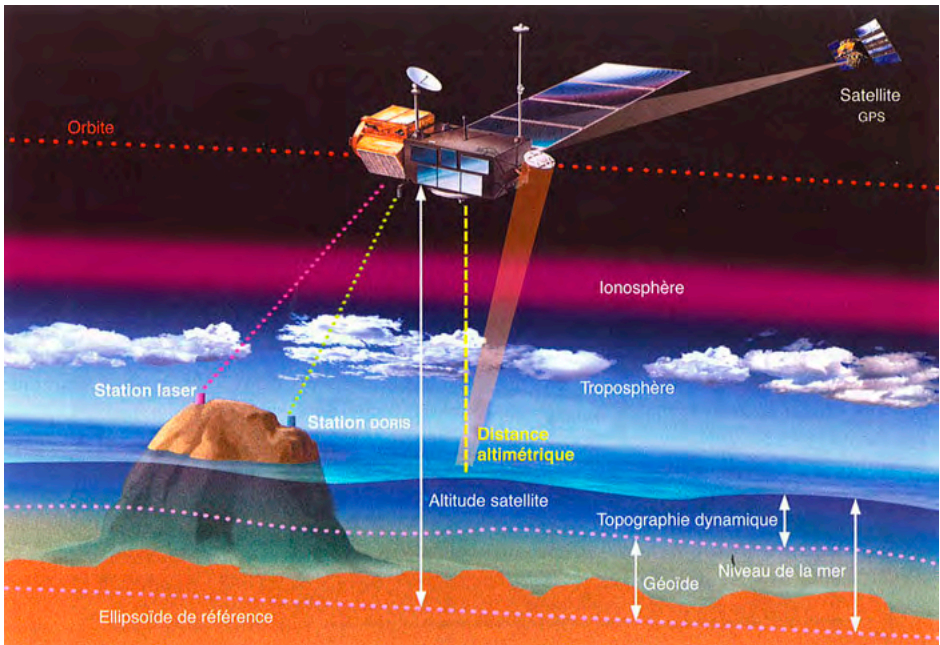


Figure B2 – Principe de l’altimétrie spatiale

Source : AVISO.

Évolution récente du niveau moyen des océans

Les systèmes d’observations décrits précédemment ont permis d’identifier une accélération de la montée du niveau de la mer depuis la fin du XIX^e siècle. Cette section fait le point sur les chiffres avancés dans la littérature scientifique, en distinguant les variations globales du niveau moyen des océans des variations régionales, notamment en France métropolitaine et en outre-mer.

• À l’échelle planétaire

De nombreuses études ont utilisé les données des marégraphes pour reconstituer l’évolution du niveau moyen global des océans depuis la fin du XIX^e siècle.

La figure B3 montre l’évolution du niveau de la mer en centimètres en moyenne globale, pour deux périodes : 1900-2010 (basée sur la reconstruction de Church et White, 2011) – à gauche – et 1993-2012 (à partir de l’altimétrie spatiale) – à droite.

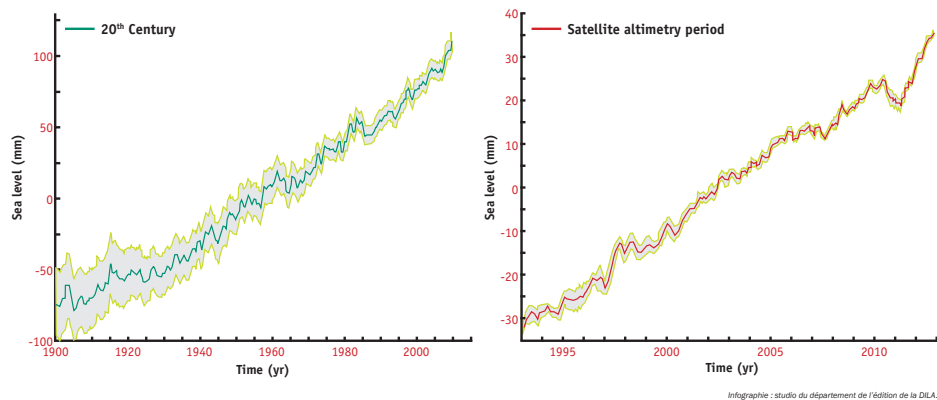


Figure B3 – Évolution du niveau moyen global de la mer, estimée à partir de la reconstruction de Church et White (2011) sur le xx^e siècle (à gauche) et à partir de l’altimétrie spatiale sur la période 1993-2012 (à droite; moyenne des séries temporelles de 4 centres de traitement de données altimétriques, dont AVISO en France). Le grisé représente l’incertitude associée à chacune des courbes. Les cycles annuels et semi-annuels ont été enlevés. À noter, la différence d’échelle verticale entre les deux courbes.

Source : d’après Cazenave et Le Cozannet (2014).

Selon Church et White (2011), l’analyse des données marégraphiques sur la période 1901-2010 indique un taux moyen d’élévation du niveau de la mer de $1,7 \pm 0,2$ mm/an.

Sur la période altimétrique (1993-2014), le niveau marin s’est élevé en moyenne globale de $3,2 \pm 0,4$ mm/an (Nerem *et al.*, 2010, Cazenave *et al.*, 2014). Cette valeur, double de celle des onze dernières décennies, suggère une accélération récente de la hausse de la mer. Cependant, il faut souligner que cette accélération reste délicate à estimer compte tenu de la variabilité multidécaennale du niveau de la mer.

Aux échelles de temps interannuelle à multidécaennale, l’élévation observée du niveau moyen global de la mer résulte de deux sources majeures :

- l’expansion thermique des océans due à leur réchauffement causé par la hausse des températures moyennes des basses couches de l’atmosphère (et au chauffage direct par le soleil dans les régions arctiques devenues libres de glace). Cet effet, dit « stérique³ », augmente le volume de l’océan et donc le niveau de la mer;
- l’augmentation du contenu en eau des océans, par l’apport d’eau douce consécutif à la fonte des glaciers de montagne et des calottes polaires (le Groenland et l’Antarctique). Une petite contribution vient aussi des échanges d’eau avec les terres émergées.

3. L’effet stérique représente la modification de la masse volumique des océans liée aux changements de température et de salinité.

Le tableau B1 récapitule les valeurs estimées des différentes contributions ainsi que la hausse observée pour 3 périodes : 1971-2010, 1993-2010 et sur la période 2005-2013.

Source	1971-2010	1993-2010	2005-2013
Expansion thermique	0,8 ± 0,3	1,1 ± 0,3	0,9 ± 0,15
Glaciers	0,68 ± 0,4	0,76 ± 0,4	
Groenland		0,33 ± 0,08	
Antarctique		0,27 ± 0,11	
Modifications du cycle hydrologique	0,12 ± 0,10	0,38 ± 0,11	
Masse de l'océan (d'après GRACE)			2,0 ± 0,1
Somme		2,8 ± 0,5	2,9 ± 0,38
Observations	2,0 ± 0,3	3,2 ± 0,4	2,78 ± 0,32
Différence (observations – somme)		0,4 ± 0,6	- 0,1 ± 0,50

Tableau B1 – Estimations en mm/an des principales contributions à la variation du niveau moyen global des océans. Les cases vides signifient l'absence d'estimation. La somme de ces contributions est comparée aux observations des variations du niveau de la mer. Les incertitudes pour les sommes sont calculées en combinant les diverses incertitudes.

Source : pour les périodes 1971-2010 (Church *et al.*, 2013), 1993-2010 (Church *et al.*, 2013) et 2005-2013 (Llovel *et al.*, 2014).

La contribution des eaux continentales au niveau de la mer a deux origines : (1) les variations naturelles du cycle de l'eau liées à la variabilité climatique naturelle, et (2) les activités humaines modifiant directement l'hydrologie régionale, telles que la construction de barrages sur les fleuves et le pompage de l'eau dans les aquifères, principalement pour l'irrigation des cultures. Les barrages font baisser le niveau de la mer alors que le pompage des eaux crée une hausse du niveau de la mer. L'amplitude absolue de ces deux phénomènes a été de l'ordre de 0,5 mm/an sur la seconde moitié du xx^e siècle. Mais, étant de sens opposés, ces deux effets se sont plus ou moins compensés. Néanmoins, le pompage des eaux souterraines s'est accentué ces dernières décennies, ce qui explique les valeurs positives de l'effet net des eaux continentales dans le tableau B1.

- *En France métropolitaine et dans les outre-mer*

Les chiffres, représentatifs de la variation globale du niveau des océans, masquent une forte disparité régionale. Si les données marégraphiques avaient déjà suggéré que l'élévation du niveau de la mer n'était pas uniforme spatialement, les données altimétriques permettent de cartographier la variabilité régionale de ce phénomène. La figure B4 montre le taux d'élévation du niveau de la mer sur une carte globale pour la période 1993-2013.

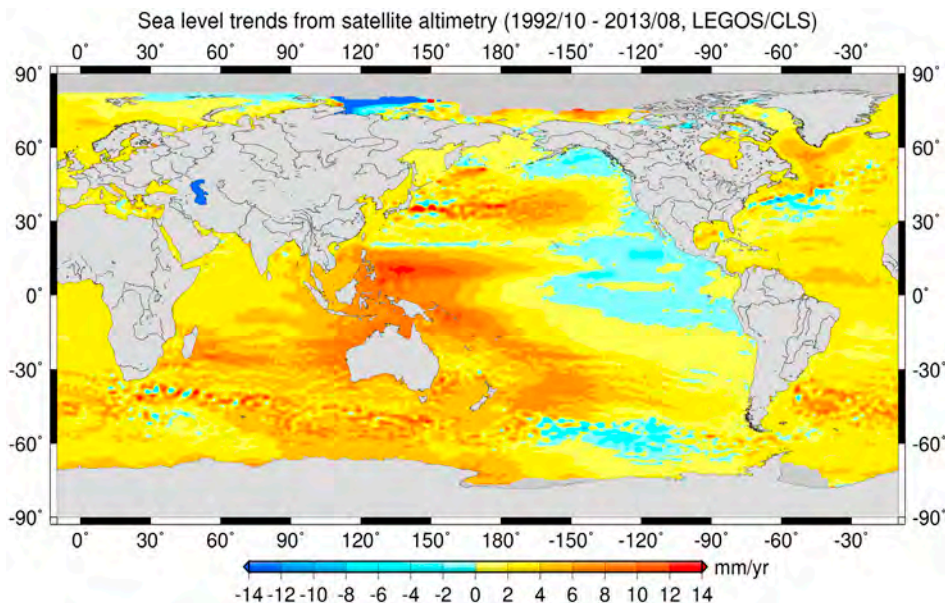


Figure B4 – Carte globale de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2013)

D'après les mesures altimétriques de Topex/Poseidon, Jason-1 et 2 , ERS-1 et 2, et Envisat.

Source : LEGOS.

Sur la figure B4, on observe une tendance à l'élévation du niveau de la mer sur la majorité des océans du globe (zones en jaune et rouge), exception faite d'une petite région dans l'est du Pacifique et au sud de l'Alaska.

Un zoom sur la France métropolitaine est présenté sur la figure B5. On y fait le constat que le niveau de la mer le long des côtes de la métropole (Atlantique et Méditerranée) s'est élevé à un rythme légèrement inférieur à la moyenne globale sur la période 1993-2013.

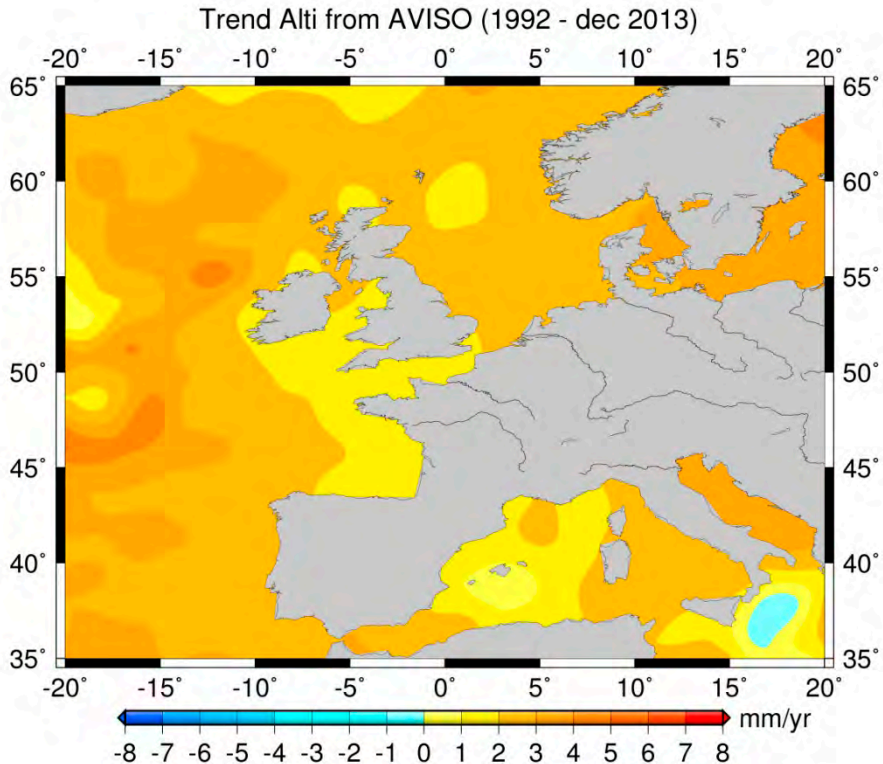


Figure B5 – Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (entre octobre 1992 et décembre 2013) le long des côtes de l'Europe occidentale

Source : LEGOS.

Concernant les outre-mer, des études récentes basées sur des reconstructions en 2D du niveau de la mer avant la période altimétrique (Meyssignac *et al.*, 2012b) ont montré que, depuis 1950, la hausse de la mer a été assez différente d'une région à l'autre. Ainsi, en Polynésie, la hausse a atteint 3,5 mm/an, soit près de deux fois la hausse moyenne globale sur cette période (1950-2010) alors qu'à Nouméa (Nouvelle-Calédonie), la hausse est estimée à 2 mm/an (Becker *et al.*, 2012). À La Réunion, on estime que la hausse des soixante dernières années n'a pas été significativement différente de la moyenne globale (Palanisamy *et al.*, 2015).

- *Que nous disent les marégraphes français ?*

Les données altimétriques donnent peu d'informations sur les variations plus locales au niveau des côtes françaises et se limitent à la période récente. Pour aller plus loin et compléter un peu ces chiffres, intéressons-nous au réseau de données marégraphiques existant sur le territoire français. Ces mesures existent depuis suffisamment d'années pour avoir plus de recul sur l'élévation récente du niveau de la mer qu'avec l'altimétrie.

La France possède un patrimoine de données pour la métropole et les outre-mer, ainsi qu'ailleurs dans le monde, notamment dans les anciennes colonies françaises du Maghreb, d'Afrique francophone et d'Asie. Une partie du patrimoine marégraphique français est déjà connu et mis à disposition via le Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL)⁴. Un service existe aussi en France, le Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL), qui s'occupe de rassembler et diffuser les observations du niveau marin à l'échelle française. Leur nombre varie néanmoins fortement au cours du temps, avec des périodes fastes pour les réseaux d'observations comme la période 1840-1920, suivies de périodes pour lesquelles peu de données existent.

Une autre partie de ce patrimoine reste encore inconnue de la communauté, car découvert récemment dans les centres d'archivages français. Un travail important est fourni depuis quelques années à l'université de La Rochelle par les chercheurs du laboratoire Littoral ENvironnement et Sociétés (LIENSs, UMR 6250 du CNRS) pour collecter, mettre en forme et analyser ces données historiques. Les données marégraphiques françaises sont dispersées dans de nombreux centres, dont une liste détaillée est donnée dans le portail Réseaux de référence des observations marégraphiques (REFMAR)⁵ du Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM). Cette liste n'est pas exhaustive, car nombre de données restent à récupérer dans divers centres d'archivages, notamment les archives départementales. Un grand nombre de ces jeux de mesures marégraphiques sont peu exploitables pour l'étude du niveau de la mer à long terme, par manque de recouvrement temporel suffisant et de continuité des références de mesure.

Selon Gouriou (2012), une vingtaine de séries marégraphiques françaises dépassent le demi-siècle, dont 9 stations (Brest, Marseille, Cherbourg, Le Havre, Cordouan, Saint-Jean-de-Luz, Saint-Nazaire, Saint-Servan et Rochefort) dépassant cent vingt ans. Ces séries sont suffisamment longues pour tirer des conclusions robustes sur les tendances à long terme du niveau marin. Toutes ne sont pas encore exploitables, car un long processus de numérisation des données sous format papier est nécessaire, ainsi que diverses corrections liées aux changements d'instruments, de méthodes de mesures, etc.

4. Ce service, basé à Liverpool, est responsable de la collecte, de la publication et de l'analyse des données marégraphiques du globe.

5. <http://refmar.shom.fr/fr/donnees-historiques>

Le tableau B2 présente certains des résultats obtenus.

Site d'observation	Période	Source	Taux de variation du niveau de la mer (mm/an)
Brest	1807-1890 1890-1980 1980-2004	Wöppelmann <i>et al.</i> (2006)	- 0,09 ± 0,15 1,30 ± 0,15 3,00 ± 0,50
Marseille	1849-1909 1909-1980 1980-2012	Wöppelmann <i>et al.</i> (2014)	0,40 ± 0,30 1,40 ± 0,13 2,60 ± 0,40
Pertuis Charentais	1824-1909 1941-2011 1824-2011	Gouriou <i>et al.</i> (2013)	- 0,20 ± 0,40 2,10 ± 0,30 1,30 ± 0,10
Saint-Jean-de-Luz	1942-1996	Marcos et Tsimplis (2008)	2,10 ± 0,30
Îles Kerguelen	1949-2004	Testut <i>et al.</i> (2006)	1,10 ± 0,70

Tableau B2 – Taux de variation du niveau de la mer aux XIX^e et XX^e siècles, estimés à partir de données marégraphiques françaises

Le cas des outre-mer est quant à lui assez problématique, les séries mises à disposition étant encore trop courtes pour analyser le signal du changement climatique. À titre d'exemple, on ne dispose que de dix années effectives pour La Réunion, quatre pour Mayotte et la Martinique et dix pour la Polynésie française. Il est donc actuellement impossible de donner des chiffres pour des périodes plus longues que la période altimétrique (figure B4) pour ces régions.

Projections du niveau de la mer

À l'échelle planétaire

- *Les projections du niveau moyen global au XXI^e siècle*

Le cinquième rapport du GIEC (IPCC, 2013, AR5) présente une révision des estimations des projections données dans son quatrième rapport (IPCC, 2007, AR4) tenant compte à la fois des nouveaux scénarios dits RCP pour « Representative Concentration Pathways » (voir Ouzeau *et al.*, 2014)⁶, de nouvelles méthodologies de calcul et d'une représentation plus complète de la contribution de l'écoulement de la glace des calottes polaires.

6. Voir aussi http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_decouvrir_scenarios_GIEC.pdf

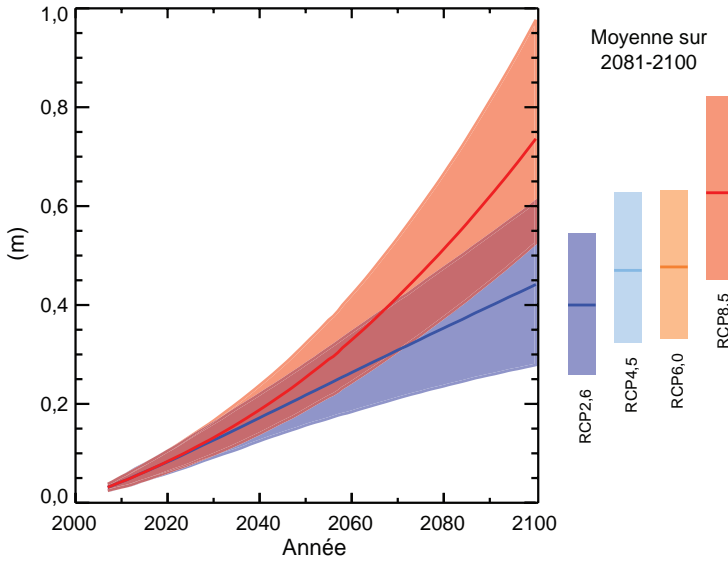


Figure B6 – Projections de l’élévation du niveau moyen global de la mer au ^{xxi} siècle relativement à 1986-2005 pour les deux scénarios d’émission RCP2.6 et RCP8.5. Les plages de couleur autour des courbes correspondent à l’intervalle d’un changement « probable » (67 % de chance). Les barres verticales correspondent à un changement « probable » de la moyenne de la période 2081-2100 pour tous les scénarios RCP, et les barres horizontales aux valeurs médianes associées.

Source : IPCC (2013), Figure SPM.9.

Dans ce rapport, les auteurs donnent une « confiance moyenne » aux estimations fondées sur des modèles décrivant les processus à l’origine des changements du niveau de la mer. Ces modèles utilisent directement les projections des modèles climatiques de l’exercice international d’intercomparaison CMIP5⁷ pour ce qui concerne l’expansion thermique. Les contributions à l’augmentation du niveau de la mer dues à la fonte des glaciers de montagne et des calottes polaires sont basées sur la littérature scientifique. Des résultats de ces estimations sont reproduits sur la figure B6 et des valeurs des changements probables pour le milieu et la fin du ^{xxi} siècle pour les différents scénarios sont reportées dans le tableau B3.

Scénarios	Fourchettes pour 2046-2065 / 2081-2100
Scénario RCP2.6	0,17 – 0,31 / 0,26 – 0,55
Scénario RCP4.5	0,19 – 0,33 / 0,32 – 0,63
Scénario RCP6.0	0,18 – 0,32 / 0,33 – 0,63
Scénario RCP8.5	0,22 – 0,37 / 0,45 – 0,82

Tableau B3 – Projections de l’élévation du niveau moyen global de la mer à la fin du ^{xxi} siècle (en m pour 2046-2065 et 2081-2100 par rapport à 1986-2005). Les fourchettes de valeurs données pour chaque scénario d’émission correspondent à une probabilité de 67 % (changement « probable »).

Source : IPCC (2013).

Une des conclusions déduites de ces estimations est qu'il est très probable que le taux d'augmentation du niveau moyen global de la mer au xxi^e siècle sera supérieur au taux observé au cours de la période 1971-2010 pour tous les scénarios RCP.

L'expansion thermique représente de 30 à 55 % de l'augmentation du niveau moyen de la mer du xxi^e siècle. La fonte des glaciers représente la deuxième contribution la plus importante située entre 15 et 35 %. Les contributions du Groenland et de l'Antarctique recouvrent à la fois celles qui sont liées au bilan net de la fonte et de l'accumulation de la glace ou de la neige à la surface, mais aussi celles qui sont liées à l'écoulement de la glace dans l'océan. Ce sont ces dernières contributions qui expliquent la part la plus importante de l'augmentation des estimations du changement du niveau moyen de la mer dans l'AR5 comparé à l'AR4.

Les auteurs de l'AR5 considèrent par ailleurs que seul l'effondrement des parties des glaciers émissaires de la calotte antarctique dont la langue terminale flotte sur la mer, s'il se déclençait, pourrait entraîner une hausse significativement supérieure aux changements probables du niveau moyen de la mer. Cependant, ils considèrent avec un niveau de confiance moyen que cette contribution ne dépasserait pas quelques dizaines de centimètres d'élévation du niveau des mers au cours du xxi^e siècle.

- *La montée ne sera pas répartie également*

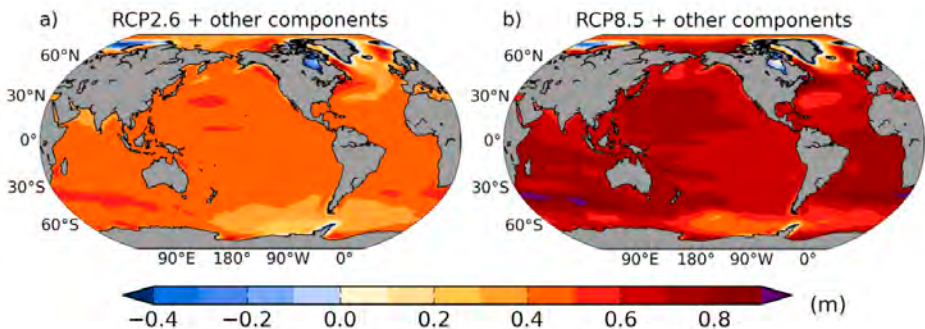


Figure B7 – Élévation du niveau de la mer pour la période 2081-2100 par rapport à 1986-2005. Les calculs prennent en compte les changements de température, salinité et courants simulés par 21 modèles du GIEC forcés avec les scénarios (a) RCP2.6 et (b) RCP8.5. Les figures incluent aussi les effets sur le niveau de la mer des variations régionales de la pression atmosphérique, de l'ajustement isostatique glaciaire et les échanges d'eau avec les terres émergées.

Source : d'après IPCC (2013), figure TS.23.

Comme c'est déjà le cas aujourd'hui, et comme le montre la figure B7, la montée du niveau de la mer présentera d'importantes disparités régionales. Celles-ci résultent de différents facteurs. Le facteur dominant est la distribution non uniforme de la température de l'océan et de la salinité (en lien avec la fonte de la banquise et des glaces continentales, et avec les variations du cycle hydrologique). Les variations géographiques de la pression atmosphérique jouent aussi

un rôle, mais faible en comparaison de la température de la mer et de la salinité. La fonte actuelle (et future) des glaces continentales (glaciers de montagne et calottes polaires) génère aussi de manière indirecte une part de la variabilité régionale du niveau de la mer : sous l'effet des redistributions de masse de glace et d'eau, la croûte terrestre (élastique) se déforme, ce qui modifie légèrement le contour et la profondeur des bassins océaniques, donc le niveau de la mer à l'échelle régionale. De plus, la Terre continue de se déformer en réponse à la dernière déglaciation (phénomène appelé « rebond post-glaciaire » évoqué précédemment), ce qui induit une autre contribution à la variabilité régionale de la mer. Ces effets d'ajustement isostatique sont à présent pris en compte dans les projections régionales de la mer (en particulier dans le 5^e rapport du GIEC). Les modèles montrent que la fonte future des calottes polaires causera une amplification de l'élévation de la mer dans les océans tropicaux de 20 à 30 % par rapport à la hausse moyenne globale. Le phénomène de rebond postglaciaire a, quant à lui, des effets importants dans les régions des hautes latitudes, en particulier une hausse (relative) de la mer très supérieure à la moyenne globale le long de la côte est de l'Amérique du Nord.

Il résulte de tous ces phénomènes que plus de 95 % des régions océaniques connaîtront très probablement une hausse du niveau de la mer à la fin du XXI^e siècle. Par ailleurs, environ 70 % des littoraux du monde vont connaître un changement du niveau de la mer ne s'écartant pas de plus de 20 % de l'élévation du niveau moyen global de la mer.

- *La mer va continuer de monter pendant des siècles*

En dehors des calottes polaires, les glaciers représentent une faible quantité de glace (de l'ordre de 40 cm d'équivalent élévation du niveau de la mer, si tous devaient fondre), ce qui limite leur contribution à l'élévation. Toutefois, la dilatation thermique de l'océan se poursuivra pendant des siècles, même après que la concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre aura été stabilisée, à cause de la lenteur du transfert de chaleur de la surface aux profondeurs de l'océan.

L'élévation finale atteinte, après plusieurs siècles ou millénaires selon la date de la stabilisation, dépendra de cette concentration stabilisée et de la température de l'atmosphère. Les simulations des modèles climatiques suggèrent une augmentation du niveau moyen de la mer de 0,2 à 0,6 m par degré Celsius de réchauffement global par rapport au climat actuel du seul fait de l'expansion thermique. Sur la base de quelques modèles climatiques simulant le climat au-delà de 2100, des scénarios de basses émissions conduiraient à une augmentation du niveau moyen global de la mer de moins de 1 m en 2300 par rapport à son niveau préindustriel et de 1 m à plus de 3 m pour un scénario de fortes émissions.

À plus long terme, l'inquiétude majeure réside dans les calottes antarctique et groenlandaise. Les simulations des modèles indiquent qu'au-delà d'un certain seuil de réchauffement, la fonte en surface de la calotte du Groenland ne sera pas compensée par l'accumulation de neige. Ainsi, si la température de stabilisation

dépasse ce seuil pendant des millénaires, cette calotte (dont la fonte totale représenterait 7 m d'augmentation du niveau de la mer) pourrait fondre en presque totalité. Selon le 5^e rapport du GIEC, ce seuil serait supérieur à environ 1 °C (faible confiance), mais inférieur à 4 °C (confiance moyenne). Si le réchauffement se maintenait durablement à ce niveau, la planète connaîtrait alors une élévation du niveau de la mer de plusieurs mètres au cours des siècles et millénaires à venir. Une contribution liée à un retrait abrupt, irréversible à l'échelle multiséculaire ou millénaire, de parties marines de la calotte antarctique dans des secteurs potentiellement instables est aussi possible. Ces déstabilisations peuvent survenir à long terme, mais aussi à une date rapprochée, surtout celle de l'Antarctique Ouest. Les principales incertitudes résident dans l'intensité de réchauffement nécessaire à leur déclenchement et la date correspondante, sans que l'on puisse encore aujourd'hui affecter un niveau de confiance à cette occurrence.

À l'échelle des côtes françaises

Le niveau de la mer local est influencé par tout déplacement vertical de la surface de l'océan, mais aussi du fond marin, du champ de gravité, et de la surface du sol. Ces déplacements peuvent être dus principalement :

- à des changements de volume de l'océan résultant des effets de la température et de la salinité sur la densité de l'eau ;
- à des changements de masse liés aux échanges océan-glace-atmosphère-continent, à la redistribution de la masse dans l'océan par la dynamique dans l'atmosphère (vents à la surface et changement de pression atmosphérique générant des courants océaniques) ou par la dynamique océanique (circulation induite par les changements de densité, instabilités), ou encore à des changements de la gravité locale (eux-mêmes induits par des changements de masse) ;
- à des changements du niveau du fond de l'océan ;
- à des mouvements du sol d'origine naturelle (mouvements d'origine tectonique, volcanique) ou anthropique (extractions d'eaux ou d'hydrocarbures).

En fait, les projections qui ont été réalisées à l'échelle de régions côtières ne résultent souvent que d'une extension de résultats qui ne sont établis que pour des régions éloignées des côtes. De plus, ces projections d'échelle se limitent à une évaluation des changements de volume de l'océan et, lorsqu'elles prennent en compte les changements de masse, notamment dus à la fonte des glaciers et des calottes, il ne s'agit dans la plupart des cas que d'une extrapolation de résultats établis en moyenne globale.

Or la distribution régionale des variations futures du niveau de la mer dépend de l'ensemble des processus détaillés ci-dessus et donc de l'évolution de plusieurs facteurs : en premier lieu de la distribution 3-D de la température et la salinité de l'océan, de la circulation océanique et de la pression atmosphérique de surface. Elle dépend aussi de la déformation des bassins océaniques, et des effets gravitationnels associés, en réponse aux redistributions des masses de glace et d'eau en lien avec la dernière déglaciation et la fonte actuelle des glaces continentales.

Dans son dernier rapport, le GIEC présente les disparités régionales d'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2090, telles que prévues par la moyenne d'ensemble des modèles climatiques globaux, en tenant compte aussi des phénomènes mentionnés ci-dessus (figure B7). La prise en compte, dans les projections, de l'ensemble des facteurs à l'origine des variations régionales du niveau de la mer est récente et constitue un progrès incontestable de ces dernières années, très utile pour estimer à l'échelle régionale l'évolution future de la mer. Il reste néanmoins certaines incertitudes liées à la variabilité interne (décennale à multidécadennale) qui se superpose à ces phénomènes et que les modèles de climat ne peuvent simuler de façon fiable. Il reste aussi à préciser ces projections à l'échelle des côtes françaises en prenant en compte tous les processus pertinents à cette échelle plus fine.

En conclusion, une étude de l'évolution du niveau de la mer au niveau des côtes françaises (métropole et outre-mer) prenant en compte l'ensemble des processus reste à réaliser.

Impacts liés au changement du niveau de la mer

Impacts sur la submersion marine

La vitesse d'élévation du niveau de la mer actuellement observée peut sembler faible en comparaison des hauteurs de vagues et de marées qui peuvent les dépasser de plusieurs ordres de grandeur. Pourtant, si ces rythmes persistent pendant une longue période, leur ampleur aura de graves conséquences sur les régions côtières de faible altitude et à forte densité de population. Pour ces régions, même une légère hausse du niveau de la mer peut produire de vastes inondations dans les terres (IPCC, 2013).

Outre l'élévation du niveau marin et ses effets, le changement climatique peut affecter les pressions atmosphériques et les vents, avec des conséquences pour les hauteurs, périodes, directions des vagues et les surcotes extrêmes, et donc les submersions marines. Cependant, on considère habituellement que les effets des changements de régimes de vents et de pressions atmosphériques sont d'un ordre de grandeur inférieur aux conséquences de l'élévation du niveau marin (Nicholls *et al.*, 2014). Dans ce qui suit, nous considérons uniquement l'effet de la remontée du niveau marin.

Tout d'abord, nous rappelons les phénomènes en jeu lors de submersions marines. Puis les enseignements issus des observations et les impacts potentiels de la remontée du niveau marin en termes de submersion sont présentés. La problématique de l'effet de la remontée du niveau marin sur la submersion induite par les tsunamis ne sera pas abordée ici.

● *Phénomènes en jeu*

L'élévation du niveau marin pourra induire ou aggraver deux types de submersions : les submersions permanentes de zones basses et les submersions temporaires. Ces dernières sont définies comme des submersions de terres qui ne sont pas submergées en temps normal (Directive européenne 2007/60/CE⁸). Des deux phénomènes, les submersions temporaires se distinguent par la mise en danger des personnes exposées. Ainsi, en mer du Nord, les submersions marines consécutives à la tempête du 1^{er} février 1953 avaient provoqué environ 2 000 décès. Plus récemment, en France, plus de 50 personnes ont péri lors de la tempête Xynthia de 2010.

● *Les causes de la submersion*

Les submersions temporaires sont le plus souvent associées à une conjonction de conditions de marée et de surélévations du niveau de la mer (surcotes) lors de tempêtes ou de cyclones. En dehors des tsunamis, les surcotes marines sont contrôlées par deux processus principaux (figure B8) :

- la surcote atmosphérique induite par les champs de vents et pression ; cette surcote est également sensible aux conditions de vagues, qui modifient les frottements au fond et en surface (Nicolle *et al.*, 2009) ;
- la surcote liée aux vagues (*wave set-up*) induite par le déferlement des vagues à la côte ; à l'approche de la côte, les vagues générées au large déferlent en transférant leur énergie sur la colonne d'eau ; cela provoque une surélévation du niveau moyen, qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres.

Pour fixer les ordres de grandeur sur les côtes métropolitaines, la marée (mar-nage) varie de quelques dizaines de centimètres (Méditerranée) à plus de 12 m (baie du Mont-Saint-Michel). En Manche-Atlantique, les surcotes décennales observées dans les ports (zone abritée) varient de quelques dizaines de centimètres (Socoa) à plus de 1 m (Dunkerque). Sur les plages métropolitaines exposées, les quelques observations et modélisation de *wave set-up* disponibles lors d'épisodes de tempêtes, par exemple sur le site du Truc vert (côte aquitaine), indiquent des valeurs de plusieurs dizaines de centimètres, représentant environ 60 % de la surcote totale (Idier *et al.*, 2012a).

Outre ces facteurs d'élévation du niveau statique, les vagues jouent aussi un rôle à plus haute fréquence : elles influencent l'élévation instantanée du niveau d'eau sur le littoral au travers du jet de rive (*swash*), c'est-à-dire le flux et le reflux des vagues à la côte. Ce phénomène, aussi appelé « *wave run-up* », peut être à l'origine de franchissements.

Le niveau d'eau maximal atteint par la mer au-dessus de son niveau moyen est ainsi déterminé en estimant la hauteur de marée prédite, la surcote atmosphérique, le *wave set-up* et le *swash*. Il convient toutefois de garder à l'esprit que ces phénomènes ne

8. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:32007L0060>

sont pas indépendants et peuvent interagir entre eux. Par exemple, dans certaines zones comme la Manche Est, la marée influence la surcote (Idier et al., 2012b).

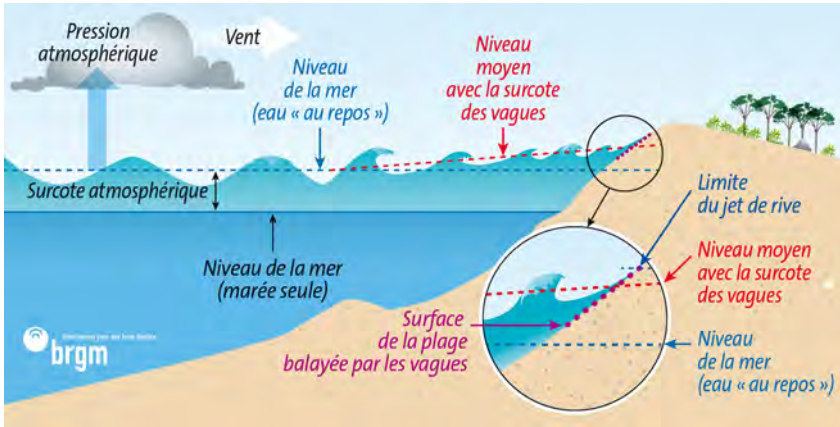


Figure B8 – Principaux phénomènes physiques contrôlant le niveau d'eau; ce schéma n'est pas à l'échelle.

Source : BRGM.

• Les types de submersion

La submersion marine résultant de ces phénomènes hydrodynamiques côtiers peut se manifester sous trois formes différentes (Figure B9) :

- le franchissement (figure B9, temps 2) par paquets de mer, qui correspond au passage des vagues par-dessus les défenses côtières (naturelles ou artificielles), l'accumulation d'eau résultante peut s'avérer importante selon l'ampleur et la durée des franchissements et le linéaire concerné; le franchissement est conditionné essentiellement par la position du plan d'eau (niveau statique) par rapport à la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, et par les caractéristiques locales des vagues (hauteurs et périodes);
- le débordement, qui correspond à une élévation du niveau d'eau statique au-dessus de la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection; il entraîne un déversement direct d'importantes quantités d'eau à terre; les volumes d'eau mis en jeu dépendent de l'écart entre le niveau d'eau et celui de la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, la durée du débordement et de la vitesse de l'écoulement;
- la rupture de structures de protection, causée par l'action répétée des vagues; les structures de protection peuvent être alors endommagées progressivement ou brutalement, et des brèches ou une défaillance généralisée peuvent se produire, provoquant le passage à un régime de débordement (figure B9, temps 3C). Le déversement de l'eau en arrière des ouvrages est également de nature à dégrader fortement le rôle de protection de ces derniers.

Un épisode de submersion peut résulter de la succession de ces différents processus, voire de leur occurrence simultanée, en des endroits différents (Le Roy et

al., 2014). Lors de tempêtes, on assiste généralement tout d'abord à une montée progressive du niveau statique et à un renforcement de l'intensité de la houle (temps 1). Au-delà d'une certaine intensité, il peut y avoir franchissements par paquets de mer, la submersion associée restant en général limitée (temps 2). Si le niveau statique continue à s'élever et dépasse la cote maximale des défenses côtières, la submersion passe alors en régime de débordement (temps 3B). Lorsque le niveau statique diminue du fait de la marée et/ou de la baisse de la surcote, on peut observer, suivant la configuration, une « vidange » partielle de l'eau accumulée à terre vers la mer ou de nouveaux franchissements jusqu'à ce que les conditions de mer diminuent (temps 3A).

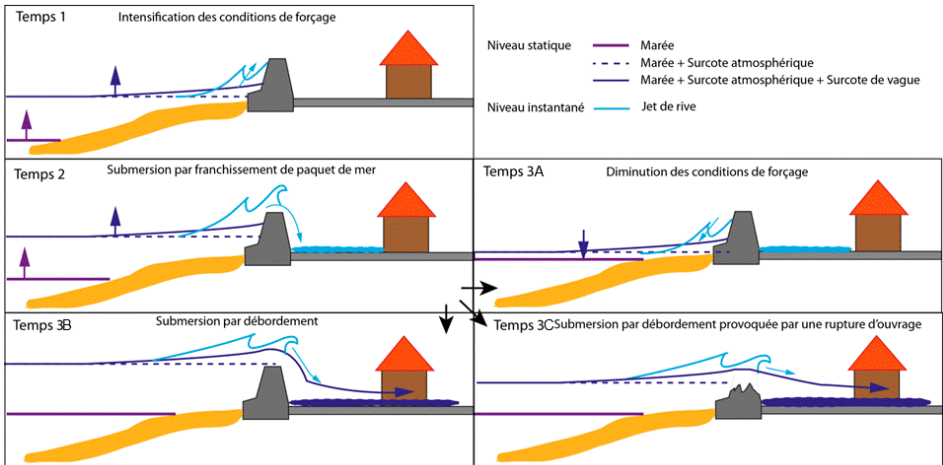


Figure B9 – Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer/dégradation des ouvrages/débordement)

Source : BRGM.

Les dommages induits par les submersions liées à une tempête sont donc dus à la conjonction de plusieurs phénomènes, certains pouvant interagir entre eux. Pris individuellement, chacun des paramètres (par exemple hauteur des vagues ou surcote) peut-être caractérisé par une probabilité d'occurrence. Pour autant, le caractère extrême d'une valeur donnée n'est pas systématiquement associé à une forte submersion ou à de forts dommages (exemple : forte surcote atmosphérique par faible coefficient de marée). Pour analyser les submersions, il convient donc de prendre en compte tous les phénomènes précités, ainsi que leurs probabilités conjointes. Il convient aussi de rappeler que plusieurs scénarios de conditions au large peuvent mener à une même submersion, de sorte que la période de retour de la submersion induite par un scénario au large est en général plus faible que celle de ce scénario.

• Enseignements des observations

Les impacts de l'élévation du niveau de la mer pour les submersions marines sont-ils déjà perceptibles ? Depuis 2007, les rapports du GIEC relatifs aux impacts

côtiers du changement climatique font la synthèse des études examinant cette question (Brown *et al.*, 2014). Ils contiennent de plus un rapport examinant la question de « la détection et l'attribution d'impacts observés » (Cramer *et al.*, 2014). Quel que soit l'impact considéré, il est souligné que la détection et l'attribution des impacts observés sont souvent difficiles par manque de données environnementales. Le cas des submersions marines est cependant particulier, car Menendez et Woodworth (2010), puis Woodworth *et al.* (2011), ont montré qu'en moyenne globale, les niveaux d'eau extrêmes avaient augmenté dans la même proportion que les niveaux moyens. Ces deux études sont basées sur l'analyse des données de la base de données marégraphiques du PSMSL décrites précédemment.

L'analyse est cependant plus délicate lorsque l'on s'intéresse non plus aux niveaux d'eau, mais aux submersions elles-mêmes, ou encore à leurs conséquences. En effet, la plupart des facteurs à l'origine des submersions marines évoluent également dans le temps, dans des proportions qui sont souvent mal connues. Wong *et al.* (2014) ont montré que les dommages induits par les submersions côtières étaient en forte augmentation. Cela traduit vraisemblablement une augmentation de l'exposition aux submersions marines et, peut-être, de meilleures connaissances concernant les dommages induits par les catastrophes naturelles.

Très peu d'exemples locaux d'impacts sur les populations ont été identifiés. Un exemple cité dans le rapport du GIEC de 2007 est le cas d'une île habitée par 250 habitants vers 1900, qui a été abandonnée en 1918 à la suite de l'aggravation des aléas de submersion marine et d'intrusions salines dans les aquifères. Néanmoins, le contexte local de cette partie de la côte Est des États-Unis est marqué par une élévation relative du niveau marin plus rapide que la moyenne. Ainsi, il n'y a pas aujourd'hui de preuves quantifiées que la remontée globale du niveau marin ait causé des aggravations des aléas ou des risques submersions.

- **Impacts potentiels du changement climatique**

- sur la submersion à l'échelle globale*

Le rapport de synthèse du GIEC (2014) indique qu'une remontée du niveau marin de 0,5 m impliquerait une augmentation de 10 à 100 fois la fréquence de submersion en l'absence d'adaptation. Sous l'effet d'une remontée du niveau marin de 1 m, les capacités locales d'adaptation (en particulier les stratégies de protection) atteindraient leurs limites en de nombreux sites. Même en deçà de ce niveau, Hallegatte *et al.* (2013) ont montré que, dès 2050, les conséquences de l'élévation du niveau marin seront telles qu'elles nécessiteront l'adaptation des défenses côtières dans de nombreuses villes du littoral. Pour fixer les ordres de grandeur, sans adaptation à la remontée du niveau marin, 0,2 à 4,6 % de la population globale serait soumise à des submersions marines de récurrence annuelle en 2100 si la remontée du niveau marin moyen global est comprise entre 25 et 123 cm (Hinkel *et al.*, 2014). En raison de leur faible élévation et de leur taille réduite, de nombreuses îles basses sont menacées par une submersion partielle ou totale induite par la remontée du niveau marin lors du *xxi*^e siècle et au-delà.

Les estimations faites aux échelles globales, même si elles donnent des informations sur les tendances et ordres de grandeur, comportent un certain nombre de limites liées, d'une part, aux hypothèses de remontée du niveau marin utilisées dans ces études (prise en compte d'une remontée du niveau marin global absolu au lieu d'une remontée du niveau marin local relatif à la cote terrestre), d'autre part, à la méthode utilisée pour estimer la submersion (hypothèses sur les phénomènes au large, projection statique de niveau de la mer sur une topographie donnée).

sur la submersion à l'échelle locale

En termes de processus de submersion, la remontée du niveau marin aura potentiellement des impacts sur chacun des trois modes de submersion cités plus haut :

- débordement : l'élévation du niveau moyen de la mer pourra faciliter la submersion par débordement ;
- franchissements par paquets de mer : 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 des défenses naturelles ou anthropiques ;
- rupture : 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.

De tels processus ne peuvent être caractérisés qu'à l'échelle locale. Les encadrés « La modélisation numérique comme outil d'évaluation de l'impact de la remontée du niveau marin sur l'aléa submersion » (ci-dessous) et « Le cas des grands estuaires : Seine et Gironde » (p. 68) présentent des exemples de telles réalisations.

La modélisation numérique comme outil d'évaluation de l'impact de la remontée du niveau marin sur l'aléa submersion

Les outils de modélisation hydrodynamique permettent aujourd'hui de représenter l'ensemble des processus marins (marée, surcotes, vagues, etc.) du large jusqu'à la côte de manière satisfaisante. Pour ce qui concerne la modélisation des processus de submersion à terre, plusieurs approches ont été développées :

- la plus simple consiste à projeter un niveau marin extrême à la côte le long de contours topographiques, ce qui conduit généralement à surestimer les effets des tempêtes ;
- les modélisations les plus avancées permettent de décrire toute la dynamique temporelle et spatiale de la submersion marine lors d'une tempête et de calculer des vitesses d'écoulement.

Ces dernières modélisations s'appuient sur des outils développés récemment (Zijlema *et al.*, 2011) et nécessitent une connaissance fine de la topographie, ainsi que de toutes les structures susceptibles d'être franchies ou au contraire de protéger de la submersion.

À titre d'exemple, nous présentons en figure B10 des résultats de travaux de modélisation d'un événement de submersion passé : la submersion intervenue à Gâvres (Bretagne) lors de la tempête Johanna (10/03/2008). La simulation de cet événement s'appuie sur une modélisation « emboîtée », allant de la modélisation au large des vagues et des niveaux d'eau, jusqu'à la submersion à terre, en prenant en compte explicitement le bâti (Le Roy *et al.*, 2014). Le modèle utilisé a permis de reproduire la dynamique des phénomènes de submersion par franchissement, puis la propagation à terre, à une résolution spatiale de 1 m. Le résultat de cette modélisation est en très bon accord avec les observations disponibles et les témoignages d'habitants. Cet exemple illustre la maturité actuelle des outils de modélisation d'événements de submersion complexe en milieu urbain.

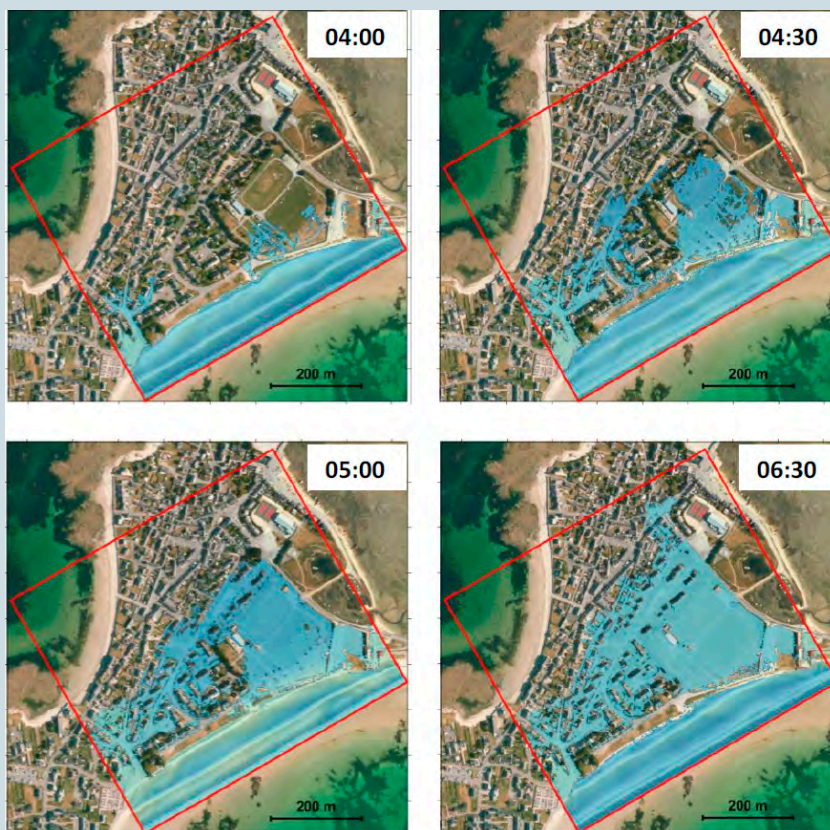


Figure B10 – Modélisation de la submersion marine lors de l'événement de tempête Johanna, le 10/03/2008, à Gâvres. Quatre instants de l'épisode de submersion sont représentés ici (heure en temps universel).

Source : Le Roy *et al.* (2014).

Ce type de modèle est aujourd'hui de plus en plus utilisé pour estimer l'aléa submersion dans le cadre des plans de prévention des risques littoraux (PPRL), et donc pour caractériser non seulement l'aléa submersion actuel mais aussi l'aléa futur, sous l'hypothèse d'une remontée du niveau marin de 60 cm en 2100, conformément à la circulaire du 27 juillet 2011 et au guide méthodologique relatifs à la prise en compte du risque de submersion marine dans les PPRL.

- *Hypothèses, coûts et adaptation*

À l'issue de nombreuses études d'impact de la remontée du niveau marin sur la submersion, une question récurrente porte sur la prise en compte des phénomènes d'érosion ou d'accrétion. En effet, une côte pour laquelle un stock sédimentaire suffisant serait disponible pourrait potentiellement s'adapter à une élévation du niveau marin à travers une translation du système vers l'intérieur des terres (résilience), alors qu'une côte à déficit sédimentaire verrait vraisemblablement augmenter les phénomènes de submersion permanente (recul moyen du trait de côte) et temporaire (érosions événementielles, brèches, etc.). Pour répondre à cette question, plusieurs travaux de recherche sur la modélisation à long terme des littoraux sont en cours.

Pour évaluer des coûts de dommages potentiels futurs, il est nécessaire de réaliser non plus une carte pour un scénario donné, mais une réelle carte d'aléa, croisant fréquence et intensité des submersions marines épisodiques, ainsi que les mouvements du trait de côte induits par la submersion permanente, l'érosion et l'accrétion. Il est également nécessaire de disposer de bases de données permettant d'évaluer les coûts des dommages directs constatés sur des événements passés. En pratique, les dommages potentiels induits par des événements de submersion aggravés par l'élévation du niveau marin sont difficiles à évaluer : par exemple, les travaux de Hallegatte *et al.* (2011) ont montré à travers l'exemple du cyclone Katrina (2005) que les dommages indirects ne pouvaient être déduits simplement d'une évaluation des dommages directs. En tout état de cause, des niveaux d'incertitude importants sont associés aux évaluations existantes des coûts potentiels des dommages induits par les submersions marines dans le contexte du changement climatique. De telles évaluations restent aujourd'hui des exercices de recherche.

Enfin, les travaux présentés ci-dessus portent sur l'estimation de la submersion induite en faisant l'hypothèse d'un scénario d'élévation du niveau de la mer donné (exemple : 60 cm). Cette approche est la plus couramment utilisée. Aujourd'hui, une question récurrente, en particulier en termes d'adaptation, est de savoir à quelle échéance la submersion dépassera une période de retour considérée comme critique. Ce type d'approche a été largement développé aux Pays-Bas, au travers « *des tipping points* » (Kwadijk *et al.*, 2010).

Le cas des grands estuaires : Seine et Gironde

À la potentielle aggravation des impacts à la côte due à la conjonction et aux interactions entre surcotes et vague s'ajoute une transformation de l'onde de marée lors de son passage dans des régions littorales à géométrie particulière. C'est notamment le cas des estuaires dont la géométrie influe fortement sur la propagation de l'onde depuis l'embouchure, pouvant conduire à son atténuation comme à son amplification. À l'interface entre fleuves et mers, les estuaires présentent en outre la particularité de subir les conséquences du changement climatique à deux titres : du fait des variations de niveau de la mer, d'une part, et à cause d'éventuelles variations des débits des rivières qui les alimentent, d'autre part. Ces deux facteurs font des estuaires des lieux particulièrement sensibles aux variations climatiques.

Les impacts du changement climatique en estuaire ont fait l'objet de modélisations numériques, notamment dans le cadre du projet européen Theseus pour l'estuaire de la Gironde (Laborie *et al.*, 2014), et de l'action de la Commission technique d'étude et d'évaluation des surcotes marines dans l'estuaire de la Seine (CTeesMes) pour la Seine (non encore publiée). Cet encadré présente des résultats obtenus dans le cadre de ces actions.

L'estuaire de la Gironde présente une sensibilité importante au changement climatique du fait de sa nature hypersynchrone* : sa géométrie d'entonnoir est responsable d'une amplification de l'onde de marée depuis l'embouchure jusqu'à la confluence de la Dordogne et de la Garonne. Les surcotes observées à la côte peuvent donc se retrouver aggravées en amont. Le niveau de risque est encore augmenté lorsque les fortes surcotes surviennent de façon concomitante avec des débits élevés des deux fleuves qui l'alimentent, voire un fort vent d'ouest qui favorise la retenue de l'eau dans l'estuaire. C'est la conjonction de deux de ces facteurs qui est responsable des événements catastrophiques survenus dans l'estuaire ces dernières décennies (1981, 1999 et 2010 notamment).

Les impacts du changement climatique sur l'estuaire de la Gironde ont été étudiés grâce à un modèle hydraulique alimenté par des données de niveau et surcote marins et de débits fluviaux pendant le ^{xxi}^e siècle. Les données de forçage maritime y sont établies par des simulations prospectives sur la base des scénarios de changement climatique du GIEC. À défaut d'évolution sensible des débits fluviaux, les données de débit utilisées reproduisent simplement les événements hydrologiques observés au cours des dernières années. Les résultats des simulations dans le cas du scénario A1B, proche de l'actuel RCP6.0, indiquent que les hauteurs d'eau pourraient atteindre, d'ici 2100, jusqu'à 80 cm dans certains

* Dans un estuaire hypersynchrone, du fait de sa configuration géométrique, l'amplitude de la marée augmente entre l'embouchure et l'amont, avant de diminuer.

secteurs à proximité de Bordeaux ou d'Ambès pour des événements hydro-météorologiques de périodes de retour centennales. Cette évolution reste plus limitée près de l'embouchure où la montée du niveau de la mer ne se reflétera que partiellement dans l'augmentation des hauteurs d'eau lors d'événements climatiques, de 25 à 50 cm pour les événements centennaux. Les changements de l'équilibre des flux hydrauliques en provenance de la mer et des fleuves auront également une conséquence sur la dynamique sédimentaire, avec un déplacement moyen du bouchon vaseux vers l'amont. Celui-ci peut en particulier entraîner des restrictions supplémentaires de prélèvement pour la production d'eau potable pendant un à deux mois (entre Ambès et Bordeaux).

L'estuaire de la Seine présente également une sensibilité importante au changement climatique, modulée par le débit de la Seine. Pour examiner cette question, un modèle hydrodynamique bidimensionnel fondé sur le code de calcul Telemac2D a été utilisé pour simuler l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer en estuaire de Seine et a produit des résultats pour des gammes de variations de débit et d'élévation du niveau marin jamais testées (Lemoine, 2014).

Les principaux résultats issus des simulations montrent que :

- l'amortissement de la propagation de l'élévation du niveau marin en estuaire est principalement régi par le débit de la Seine : plus le débit de la Seine est important, moins l'élévation du niveau marin se propage dans l'estuaire de la Seine ;
- pour les débits proches du débit moyen de la Seine (400 m³/s), l'élévation du niveau marin à la frontière maritime est retranscrite intégralement, voire amplifiée sur l'ensemble du linéaire de l'estuaire.

Le cas des structures portuaires

L'initiative CTeesMes pour la modélisation des submersions sur l'agglomération havraise a mis en évidence le phénomène de seiches dans les bassins portuaires. Les seiches sont des oscillations des plans d'eau dues à une résonance des ondes gravitaires entretenue par le régime marégraphique. Les modélisations réalisées ont montré une amplification possible des pics de marée à l'intérieur des bassins du port du Havre. Celles-ci peuvent atteindre 30 cm durant des événements climatiques importants.

Si le changement climatique a un impact modéré sur l'amplitude des ondes de marée et donc des seiches, le différentiel de niveau qui en résulte n'en est pas moins conséquent et doit être pris en compte dans l'analyse des risques de submersion des zones à proximité du port. Le phénomène peut également conduire à limiter les plages temporelles utilisables pour l'exploitation portuaire.

Impacts sur l'érosion côtière

Une seconde conséquence attendue de l'élévation du niveau marin est un recul du trait de côte, en particulier des littoraux bas et meubles (Wong *et al.*, 2014). Le trait de côte marque l'interface entre la terre et la mer. De nombreux indicateurs peuvent être utilisés pour le tracer : limite de végétation permanente, pied de dune, pied ou sommet de falaise. En France, il est défini comme la ligne correspondant aux laisses⁹ des plus hautes mers pour une marée de coefficient maximal 120 dans des conditions météorologiques normales.

• Phénomènes en jeu

Le trait de côte est susceptible d'évoluer de différentes manières en réponse à l'élévation du niveau de la mer (figure B11) : si l'on suppose qu'aucun ajustement morphologique n'a lieu à mesure que le niveau marin s'élève, les zones les plus basses peuvent alors être inondées. Au contraire, une baisse rapide du niveau de la mer sans ajustement morphologique se traduira par un régime d'émergence, avec un gain des terres sur la mer.

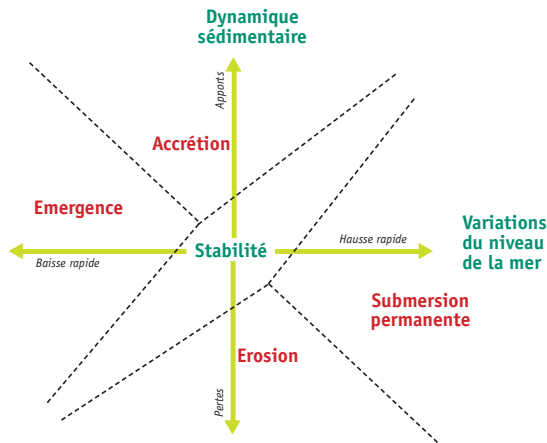


Figure B11 – Différents modes d'évolution du trait de côte

Dans le cas général, les littoraux ne réagissent pas de manière passive à l'élévation du niveau de la mer. En effet, les sédiments de la zone littorale peuvent être déplacés par de nombreux processus, notamment les vagues et les courants (figure B12), modifiant ainsi l'aspect de la zone côtière (bathymétrie, topographie). Des matériaux peuvent être transportés par les fleuves jusqu'aux estuaires, ou bien prélevés sur les falaises ou des coraux, pour finalement être redistribués sur les côtes. Enfin, les activités humaines peuvent modifier cette dynamique de manière directe (exemples : défenses côtières, rechargements en sable) ou indirecte (exemples : modification des transports solides dans les bassins versants via des aménagements fluviaux ou des modifications d'occupation des sols).

9. Niveau atteint par la marée à la pleine mer.

L'évolution du trait de côte se manifeste à différentes échelles de temps (événementielle, saisonnière, interannuelle, etc.) : à titre d'exemple, le recul de la côte sableuse d'Aquitaine s'effectue à un rythme de 1 à 3 m/an en moyenne (Bonneton *et al.*, 2013), mais a atteint 20 m sur de nombreux sites après la succession de tempêtes de l'hiver 2013-2014 (Bulteau *et al.*, 2014). Lors de la seule tempête Xynthia, des reculs du trait de côte allant jusqu'à 20 m ont été observés sur des plages de Vendée et de Charente-Maritime (figure B13). Cela est encore plus vrai pour les côtes à falaise pour lesquelles sont souvent fournies des valeurs de recul annuel. Or, ces dernières relatent très mal la multiplicité des facteurs responsables des mouvements gravitaires, ainsi que l'évolution saccadée dans le temps (évolution souvent multidécennale) et dans l'espace de ces formes d'ablation. À titre d'exemple, le recul des falaises crayeuses de Seine-Maritime est de l'ordre de 20 cm/an, mais des effondrements peuvent faire reculer le haut des abrupts de plus 10 à 15 m en quelques secondes (Costa *et al.*, 2004). Ainsi, les littoraux sont des systèmes dynamiques, dont l'évolution ne peut s'expliquer par la seule élévation du niveau de la mer.

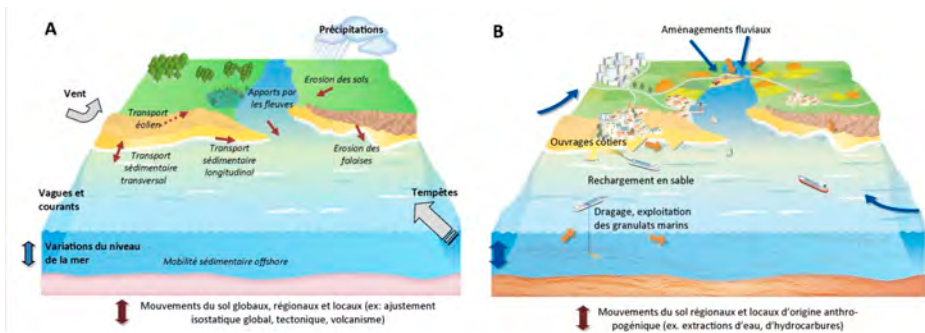


Figure B12 – Processus naturels (A) et anthropiques (B) impliqués dans la mobilité sédimentaire en zones côtières. Les variables hydrométéorologiques indiquées en gras dans la figure A (exemple : vagues, précipitations) peuvent elles-mêmes être affectées par le changement climatique. Cependant, on considère généralement que l'élévation du niveau marin est la manifestation du changement climatique qui aura le plus d'impacts sur le recul du trait de côte dans les prochaines décennies à siècles.

Source : d'après Cazenave et Le Cozannet (2014).



Figures B13 – Exemples de reculs dunaires consécutifs à la tempête Xynthia. À gauche : recul d'environ 8 m à Saint-Jean-de-Monts. À droite : recul ayant causé l'endommagement de maisons situées en première ligne à la Tranche-sur-Mer.

● Enseignements des observations

Les observations de mouvements du trait de côte proviennent en premier lieu de mesures *in situ* ou de photographies aériennes anciennes. Dans les années 1970 et 1980, l'Union internationale de géographie a procédé à un inventaire des données disponibles afin de réaliser un état des lieux d'ensemble du phénomène de recul du trait de côte aux échelles de temps décennales et multidécennales dans le monde (Bird, 1987). Cette étude a révélé que l'érosion du littoral était un phénomène global, affectant naturellement des falaises de roche tendre, mais aussi un certain nombre de deltas et de marais côtiers et les plages sableuses. En particulier, cette enquête a suggéré que 70 % des plages étaient actuellement en érosion. Si, dans la plupart des cas, les taux de recul du trait de côte observés ne dépassaient pas 1 m/an, ils représentent un enjeu significatif lorsque des constructions ont été réalisées dans le voisinage immédiat du trait de côte. L'érosion demeure aujourd'hui mal connue pour un grand nombre de zones côtières (par exemple, les îles du Pacifique).

En Europe, les études EuroSION¹⁰ et Corine Erosion Côtière ont procédé à un état des lieux de l'érosion. Elles ont mis en évidence que 30 % des plages étaient en recul en Europe (41 % en France métropolitaine), ce qui reste un chiffre élevé pour une forme géomorphologique d'accumulation. Elles ont montré également que 60 % des rivages limono-vaseux européens (49 % en France) sont actuellement en accrétion. Des travaux menés dans les départements d'outre-mer ont également permis de réaliser un premier état des lieux vis-à-vis de l'érosion : 25 % des 630 km de côtes de l'archipel guadeloupéen sont en érosion contre 60 % de côtes dites stables et 12 % en accrétion (dont la moitié en raison de l'action de l'homme) ; à La Réunion, 50 % des côtes sont en érosion. Ainsi, les observations des mouvements du trait de côte montrent non seulement que l'érosion affecte une part significative du littoral dans le monde et en France, mais aussi qu'il existe des situations très diversifiées selon les sites, les régions, les différents types de côtes (plages, falaises, marais) et les forçages auxquels ils sont exposés (marées, courants, vagues, activités anthropiques).

Quel rôle joue l'élévation du niveau de la mer actuelle dans la crise érosive des littoraux ? L'analyse des observations disponibles montre que la réponse à cette question dépend du contexte local. Ainsi, des régimes de submersion permanente ont été observés dans des zones actuellement en subsidence rapide (affaissement du sol), pour lesquelles le niveau de la mer relativement à la côte peut s'élever de plusieurs centimètres par an. À l'opposé, on peut observer l'accrétion, voire l'émergence, de certains littoraux affectés par des soulèvements du sol, vis-à-vis desquels le niveau de la mer baisse actuellement¹¹.

10. www.euroSION.org

11. Dans les deux cas, cependant, des contre-exemples existent. Le cas de la mer Caspienne pour laquelle le niveau de la mer s'est élevé de 3 m en dix-huit ans peut illustrer cette situation : si dans de très nombreux secteurs, de nombreuses parties du trait de côte ont reculé, quelques secteurs demeurent en accrétion, en raison d'une dynamique sédimentaire très active ou d'activités humaines. Ainsi, même dans des cas pour lesquels l'élévation du niveau de la mer est très rapide, ses effets peuvent parfois être compensés par une dynamique sédimentaire très active. Cela montre le rôle majeur que peuvent avoir des facteurs côtiers locaux dans les mouvements du trait de côte.

Le rôle des facteurs locaux devient généralement prépondérant lorsque l'élévation du niveau de la mer se rapproche de la moyenne globale actuellement observée (Stive, 2004). Il semble que ce soit le cas de la majeure partie des côtes françaises métropolitaines et d'outre-mer selon les données géodésiques (GPS permanents, nivellement, interférométrie radar satellitaire) et côtières actuellement disponibles¹². Pour de nombreux sites, il est possible d'expliquer pourquoi le trait de côte est mobile : effets des vagues et des courants, de tempêtes, de cyclones ou d'activités anthropiques s'exerçant sur le stock de sédiments disponibles. Ces facteurs masquent la plupart du temps les effets de l'élévation du niveau de la mer actuelle, rendant impossible leur détection.

En résumé, les observations suggèrent qu'aucune relation systématique entre le phénomène global de recul du trait de côte et l'élévation du niveau de la mer ne peut aujourd'hui être clairement établie. Ce jugement est modéré par le fait que les données sur l'érosion demeurent aujourd'hui trop parcellaires pour conclure de manière définitive. Il est donc nécessaire de poursuivre les efforts de collecte de données relatives à la dynamique sédimentaire côtière, afin de mieux comprendre les implications actuelles, mais aussi futures, de l'élévation du niveau de la mer, notamment à travers la pérennisation d'observatoires locaux et régionaux (exemples : Observatoire de la côte aquitaine, du Languedoc-Roussillon, Réseau d'observation du littoral normand-picard, etc.). Ces efforts sont actuellement appuyés par la mise en réseau de différents observatoires du trait de côte grâce au soutien de l'Institut national des sciences de l'univers (Dynalit) ou encore du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie dans le cadre de la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte décrite dans le chapitre 6¹³.

• *Impacts potentiels du changement climatique*

Si l'aggravation des submersions marines est la conséquence la plus immédiate de l'élévation du niveau de la mer, les conséquences pour l'érosion pourraient être très différentes selon le scénario d'émissions de gaz à effet de serre. Si l'objectif de 2 °C est atteint, nous avons vu précédemment que le niveau de la mer pourrait ne s'élever que de quelques dizaines de centimètres. De tels scénarios pourraient n'avoir que des conséquences modérées sur le recul du trait de côte. Au contraire, si la trajectoire d'émission suit ou excède les scénarios RCP6.0 ou RCP8.5, l'élévation du niveau de la mer dépassera le mètre après 2100, voire avant pour des projections extrêmes du niveau de la mer, ce qui aura des conséquences majeures pour l'érosion des littoraux meubles et la submersion permanente de zones basses. S'il demeure possible de financer la protection de villes côtières pour ces scénarios, la seule adaptation économiquement viable consiste à se retirer de nombreuses zones côtières rurales ou périurbaines, parmi les plus basses.

12. On peut cependant noter le cas particulier de la Guyane, pour lequel Gratiot *et al.* (2008) ont observé une cohérence temporelle entre la position de la limite de la mangrove et les cycles de marée de 18,6 ans. Leur étude suggère donc que les mangroves de Guyane sont très sensibles à de petites variations du niveau de la mer.

13. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-de-gestion.html>

La première source d'incertitudes concernant les impacts de l'élévation du niveau de la mer sur l'érosion est donc le scénario de variation du niveau marin lui-même. La seconde est liée aux modèles permettant de quantifier le recul du trait de côte induit par l'élévation du niveau marin. Avec les développements récents dans le domaine de la modélisation morphodynamique long terme, il devient possible de mieux anticiper les changements du trait de côte induits par l'élévation du niveau de la mer. De plus, la dynamique sédimentaire peut être affectée par d'autres manifestations du changement climatique, notamment des changements d'orientation des vagues. Il demeure donc aujourd'hui difficile d'estimer avec exactitude le recul du trait de côte futur à différentes échéances temporelles. En revanche, les zones les plus exposées à ces risques d'érosion sont aujourd'hui bien identifiées (Gornitz, 1991) : il s'agit avant tout des littoraux meubles, particulièrement ceux pour lesquels un déficit sédimentaire est actuellement observé.

En France métropolitaine, les régions du Languedoc, du delta du Rhône et de l'Aquitaine sont particulièrement concernées, mais le reste de la côte atlantique et la plaine de Corse orientale le sont également. En revanche, dans un premier temps, les conséquences de l'élévation du niveau de la mer devraient rester limitées pour les marais côtiers qui sont aujourd'hui le plus souvent en accrétion. Les lagunes littorales dont les cordons protecteurs sont les plus fragiles pourraient également être exposées à la montée du niveau marin. Celles-ci deviendraient alors plus larges, plus profondes et leurs eaux deviendraient plus salées. L'élévation du niveau de la mer ne devrait pas non plus significativement accélérer le recul des côtes de falaises de Haute-Normandie ou du Pays basque. Dans ces régions, les besoins d'adaptation apparaissent donc plus localisés.

Les risques induits par le recul du trait de côte futur dépendent non seulement des conséquences du changement climatique, de la dynamique sédimentaire côtière locale et régionale, mais aussi de l'exposition des infrastructures à l'aléa recul du trait de côte et de la dynamique démographique. Quelles que soient les zones côtières affectées par une nouvelle littoralisation, il conviendra de faire en sorte que l'exposition aux risques ne s'accroisse pas, en décourageant les nouvelles constructions dans les zones les plus exposées. En outre-mer, peu de scénarios de mobilité du trait de côte ont été réalisés¹⁴. Pourtant, l'adaptation peut s'y révéler particulièrement complexe, car les zones basses côtières y sont des zones essentielles pour le développement.

Impacts sur les intrusions salines dans les aquifères côtiers

Les aquifères littoraux constituent des ressources en eau souterraine importantes tant pour les activités humaines (alimentation en eau potable, usages agricoles, industriels, touristiques et conchylicoles) que pour l'environnement (zones humides littorales, marais et lagunes côtières situées à l'exutoire de ces nappes) et ce dans de nombreuses régions du monde. Par ailleurs, le littoral est le lieu d'un développement économique et démographique intense où vit environ 60 % de la population mondiale sur une bande de 60 km de large.

14. Les zones les plus vulnérables ont cependant été identifiées à La Réunion (Explore 2070).

Dans ce contexte particulier, l'eau douce qui s'écoule vers la mer entre en contact avec l'eau de mer. Une zone d'interface se forme entre l'eau douce plus légère et l'eau de mer sous-jacente dont la densité est plus importante. Cette interface n'est pas statique en cas de surexploitation de l'aquifère par exemple ; on parle alors d'« intrusion marine ».

Les aquifères côtiers sont plus ou moins sensibles aux intrusions salines en conditions naturelles ou sous influence anthropique (prélèvement par pompage), en fonction de leur structure, de leur hétérogénéité et de leur relation avec les eaux de surface. En effet, l'impact d'une invasion d'eau salée dans un aquifère littoral peut se révéler souvent irréversible. Une augmentation du niveau marin associée aux changements climatiques aura comme conséquence la migration de l'interface eau douce/eau salée vers le continent et donc une intrusion saline (Werner et Simmons, 2009). Une bonne compréhension d'une intrusion saline induite par une augmentation du niveau marin est donc essentielle pour la gestion des ressources des aquifères côtiers.

Pour une nappe, le niveau piézométrique (niveau d'eau de l'aquifère) s'élève généralement vers l'intérieur des terres (zones de recharge de l'aquifère). L'intrusion d'eau salée a la forme d'un biseau qui plonge sous la nappe d'eau douce, d'où son appellation commune de « biseau salé » (figure B14). Ce contact entre ces eaux de densités différentes va évoluer suivant les lois de la diffusion et de l'hydrodynamique en fonction d'un contexte géomorphologique, lithologique et hydrogéologique propre à chaque région, mais également par rapport à la recharge et à l'exploitation de l'aquifère. À noter, que, du fait de la miscibilité des fluides, l'interface n'est pas nette, mais correspond à une zone de transition.

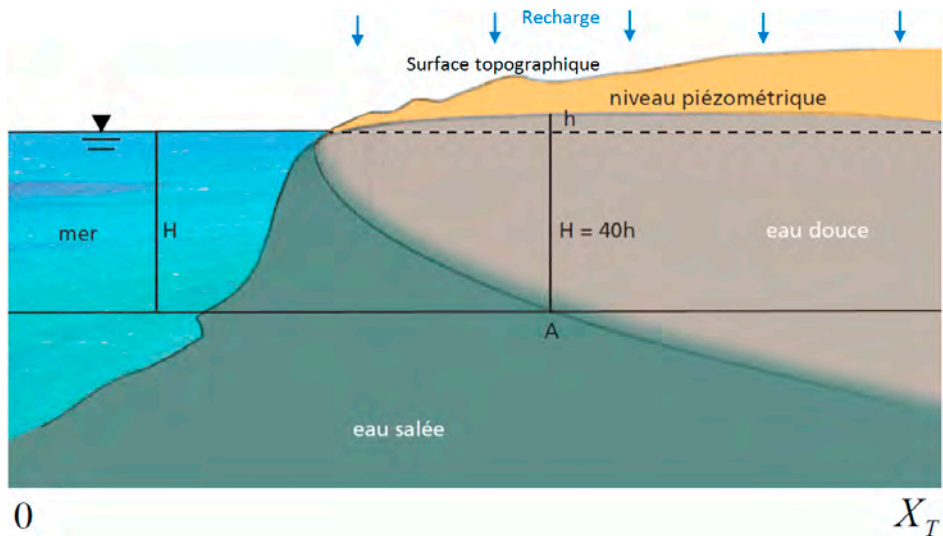


Figure B14 – Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon Ghyben-Herzberg

Source : Frissant et al. (2005).

Les aquifères côtiers et insulaires en France métropolitaine (5 500 km de côte) et dans les outre-mer constituent des ressources en eaux souterraines importantes

pour les usages d'alimentation en eau potable, agricoles, industriels et touristiques. À l'échelle de la France métropolitaine, on dénombre quelque 95 aquifères superficiels et 17 aquifères profonds côtiers (Petit et al., 1996).

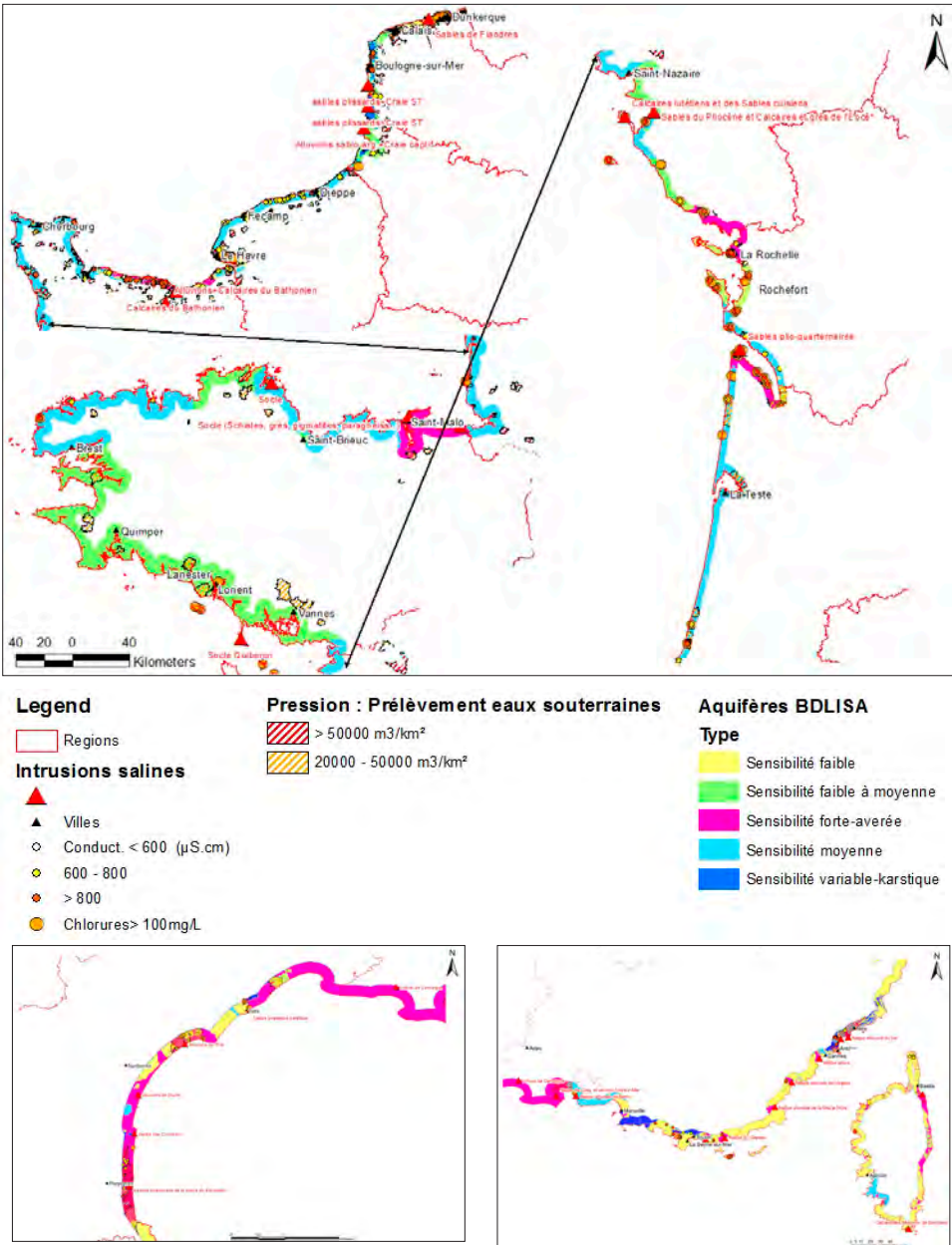


Figure B15 – Carte de vulnérabilité des aquifères côtiers en France métropolitaine à la remontée du niveau marin de +2 m et pression par prélèvements

Source : Dörfliiger et al. (2011).

Une carte de la vulnérabilité spécifique des nappes souterraines vis-à-vis d'une intrusion marine en contexte de surélévation du niveau marin de plus de 2 m est présentée sur la figure B15. Cette carte intègre les données relatives à la nature des terrains réservoirs souterrains et la pression des prélèvements.

● *Phénomènes en jeu*

La compréhension de l'intrusion marine associée à une augmentation du niveau marin est importante pour la gestion future des aquifères côtiers. Elle est abordée en considérant trois cas avec les conditions aux limites suivantes au niveau de l'interface « aquifère-mer » :

- une limite contrôlée par un flux d'eau douce vers la mer ne variant pas lors d'une augmentation du niveau marin, car on suppose que l'augmentation du niveau piézométrique de l'aquifère est concomitante à la montée du niveau marin ;
- une limite contrôlée par un niveau piézométrique maintenu constant malgré l'augmentation du niveau marin ;
- une augmentation du niveau marin associée à une remontée générale du niveau piézométrique.

● *Enseignements des observations*

On considère aujourd'hui que l'impact de la remontée du niveau marin actuel sur les intrusions salines reste limité. Toutefois, ce constat n'est pas à extrapoler pour le futur, car le niveau de la mer continuera à augmenter et parce qu'il y a des contextes littoraux vulnérables et favorables aux intrusions salines. Comme pour les autres impacts étudiés, la caractérisation des phénomènes par des chroniques de données suffisamment longues est indispensable pour progresser dans la connaissance de l'évolution à long terme des aquifères côtiers.

● *Impacts potentiels du changement climatique*

Les effets du changement climatique, notamment la modification du niveau marin et la recharge des aquifères, impacteront les aquifères côtiers sur les aspects suivants :

- modification des intrusions salines et migration dans des proportions variables de l'interface eau douce – eau salée ;
- inondation des zones basses par de l'eau de mer et infiltration de l'eau de mer vers les aquifères libres ;
- remontée de front salé via les estuaires et infiltration vers les aquifères libres ; phénomène qui pourrait être accentué par la baisse des débits des cours d'eau du fait du changement climatique et/ou l'augmentation des prélèvements ;
- contamination des eaux souterraines par le bore, en plus des chlorures des eaux marines au niveau des plaines d'inondation ;
- modification de la recharge des aquifères due à une variabilité spatio-temporelle des précipitations et de l'évapotranspiration ainsi que du volume d'eau douce et de la répartition d'eau douce dans les aquifères ;

- modification des zones de décharge des aquifères pouvant impacter les écosystèmes des zones humides ;
- augmentation du niveau piézométrique associée à l'élévation du niveau marin et à la modification du régime des précipitations pouvant occasionner des impacts sur des infrastructures du sous-sol (système d'assainissement, réservoirs enterrés, etc.).

L'intensité de ces impacts peut varier de manière significative selon les lieux, la nature des aquifères, et leurs modalités d'exploitation. Les impacts associés aux modifications des régimes de recharge et de décharge peuvent être aussi naturellement influencés par la variabilité climatique. Pour certains aquifères, l'exploitation des eaux souterraines par forage (pompage) peut accentuer les impacts potentiels du changement climatique et de l'augmentation du niveau marin.

Impacts sur les infrastructures côtières et portuaires

Les infrastructures côtières ont pour fonction de protéger le littoral vis-à-vis des risques naturels (érosion marine, submersion) ou de réduire l'agitation du plan d'eau. Si les ouvrages de haut de plage représentent le type de construction le plus largement répandu, selon les conditions locales de marnage notamment, des ouvrages transversaux ou des brise-lames (émergés ou submergés) sont également réalisés. L'inventaire des ouvrages relevés sur le littoral métropolitain dans le cadre du projet « Sao Polo » en 2012 conduit à un linéaire d'environ 500 km d'infrastructures côtières se répartissant comme suit :

- ouvrages de haut de plage : 407 km (81,7 %) ;
- ouvrages transversaux : 83 km (16,7 %) ;
- brise-lames : 8 km (1,6 %).

Concernant les ouvrages portuaires (figure B16), deux grands types peuvent être distingués :

- les digues à talus : ce sont des ouvrages dont la face exposée à la mer est composée soit d'enrochement naturel, soit de blocs en béton ;
- les digues verticales : en béton ou en maçonnerie, la face exposée à la mer est verticale ou très fortement pentue.

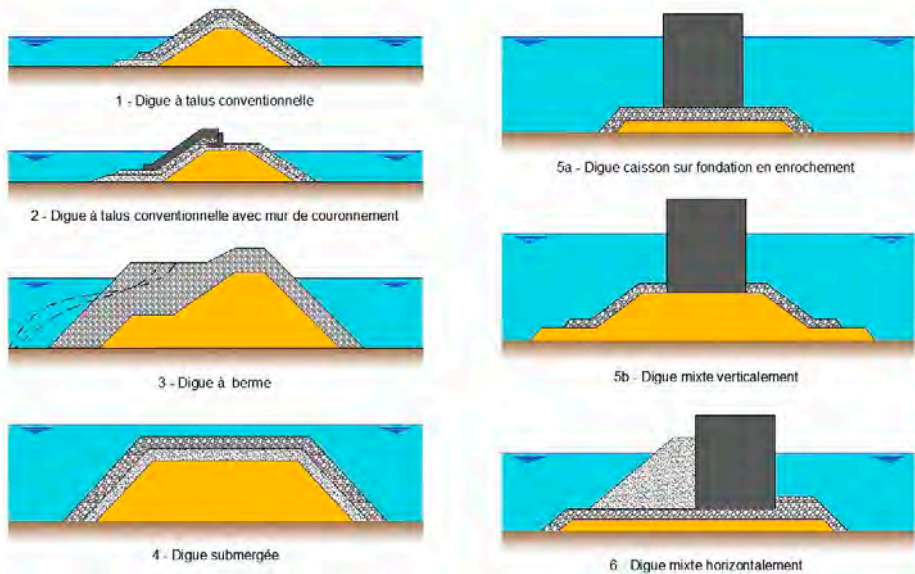


Figure B16 – Coupes types de différentes digues

Source : CIRIA, CUR, CETMEF (2009).

L'arrière de ces ouvrages peut être le plan d'eau du port, une voie de circulation, un parking, un terre-plein ou un quai. En France métropolitaine (hors Corse), 180 km de digues portuaires ont été répertoriés :

- 139 km de digues à talus (dont 113 km en enrochement naturel et 26 km avec une carapace en blocs béton) ;
- 41 km de digues verticales.

Les digues sont des ouvrages extrêmement coûteux et construits pour plusieurs décennies ; certains ont des enjeux économiques ou patrimoniaux importants. Il est donc capital d'anticiper les changements globaux attendus pour adapter les structures en service et réviser si nécessaire la conception des nouveaux ouvrages.

● *Phénomènes en jeu*

Les ouvrages de protection côtière et portuaire sont dimensionnés à partir des données de forçages météo-marins et des conditions géotechniques de fondation. Les contraintes hydrauliques principales sont la houle incidente et le niveau marin (figure B17). Le changement climatique aura donc une influence sur les sollicitations sur ces ouvrages (Hawkes *et al.*, 2010). On peut penser qu'il induira principalement deux effets à prendre en compte : la modification des houles au large (hauteur, période, direction ; Hemer *et al.*, 2013) et l'augmentation du niveau marin (niveau moyen, surcotes marines).

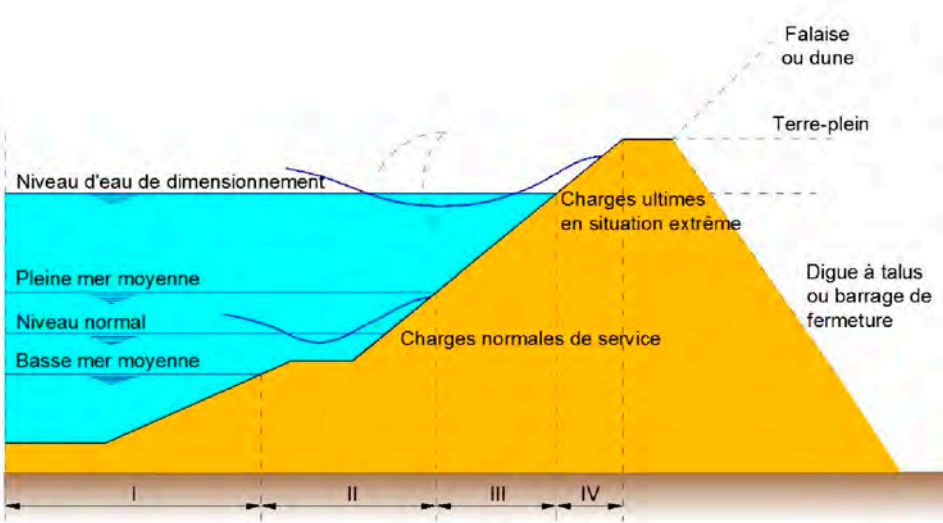


Figure B17 – Dimensionnement d'un ouvrage maritime par zones d'exposition en fonction des niveaux marins (affouillement en pied, run-up et franchissement en crête).

Source : CIRIA, CUR, CETMEF (2009).

En ce qui concerne la hauteur de houle, deux zones sont à distinguer : la zone de *shoaling*¹⁵ au large, et la zone de déferlement à la côte.

En zone de *shoaling*, où sont implantés seulement quelques grands ouvrages portuaires¹⁶, la remontée du niveau marin aura peu d'influence sur les vagues devant l'ouvrage. Dans l'hypothèse d'une stationnarité du régime de houle, les vagues devant l'ouvrage auront même tendance à être réduites du fait de la remontée du niveau marin. Le changement du régime de houle aura alors un effet déterminant sur le dimensionnement de ces ouvrages.

En zone de déferlement, les structures sont construites en faibles profondeurs. La profondeur impose alors une amplitude maximale de houle à cause du déferlement bathymétrique. Ces ouvrages seront exposés à des vagues plus importantes du fait de la remontée du niveau marin. Le changement du régime de houle au large aura dans cette zone peu d'effet sur le dimensionnement des ouvrages.

À noter qu'en fonction du type d'événement, le même ouvrage peut se trouver parfois en zone de *shoaling* (niveau élevé) et parfois en zone de déferlement (houle forte). Pour estimer l'effet sur les vagues de la remontée de 1 m du niveau marin pour un ouvrage situé sur une pente de 1 %, il faut imaginer un ouvrage déplacé de 100 m vers le large et donc soumis à des vagues plus fortes s'il est situé en faible profondeur.

15. Secteur où les vagues se gonflent et se cambrent sous l'effet de la diminution de profondeur.

16. Un exemple de tel ouvrage est la digue d'Antifer, dont la partie au large, parallèle au trait de côte, est située à une distance de l'ordre de 2600 m du rivage. La longueur de cet ouvrage est de 800 m environ, et il est fondé à une profondeur d'environ 22 m.

● Enseignements des observations

Même s'il est aujourd'hui difficile d'observer des effets du changement climatique sur les infrastructures côtières et portuaires, un certain nombre de mesures sont mises en place pour s'adapter aux conditions climatiques futures. Cette forme d'adaptation, directement intégrée dans les pratiques de gestion des risques naturels, a en réalité souvent pour objectif de combler un déficit de protection vis-à-vis des aléas actuels (Adger *et al.*, 2007). Cependant, une certaine forme d'anticipation des changements à venir commence à être considérée dans la pratique de l'adaptation (Mimura *et al.*, 2014). Ainsi, par mesure d'ajustement après un épisode tempétueux, mais aussi par stratégie d'adaptation après évaluation économique du coût des dommages, certains pays prennent l'initiative de relever leurs digues ou d'abandonner à la mer certains polders : c'est le cas des Pays-Bas et d'une partie de l'Angleterre.

En France, pour la « prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles », l'ONERC (2010) a recommandé de retenir 3 hypothèses de surélévation à l'horizon 2100 :

- hypothèse optimiste : 40 cm ;
- hypothèse pessimiste : 60 cm ;
- hypothèse extrême : 100 cm.

La même année, les inondations consécutives à la tempête Xynthia (février 2010) ont mis en évidence les limites de la politique de prévention du risque de submersion marine qui était menée jusqu'alors. Ainsi, dans le cadre de la révision des PPRL, une élévation de 20 cm est d'ores et déjà prise en compte dans le calcul du niveau marin actuel. Pour le calcul du niveau marin à l'horizon 2100, 40 cm supplémentaires sont rajoutés correspondant à l'hypothèse pessimiste. Concernant la conception des digues portuaires, le niveau marin est habituellement augmenté de 1 m à l'horizon 2100 (hypothèse extrême de l'ONERC). Comme cela a été vu précédemment, ces valeurs, établies en 2010, semblent désormais faibles, même si l'on ne se réfère qu'aux scénarios du GIEC de 2013. Quoi qu'il en soit, cette recommandation montre la pertinence de retenir le principe général de la circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux¹⁷, consistant à anticiper une élévation du niveau marin future en l'intégrant dans les pratiques d'évaluation des risques.

Notons que pour les sollicitations hydrauliques autres que le niveau de la mer, l'évolution en fréquence et en intensité des houles extrêmes n'est pas établie en France sur ces vingt-cinq dernières années. En particulier, les séries de houle disponibles, qui permettraient de confirmer ou non ces informations, n'ont pas une longueur suffisante. L'évolution des surcotes météorologiques est également

17. http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201115/met_20110015_0100_0021.pdf

beaucoup moins documentée que celle des niveaux marins ; les méthodes de calcul sont moins robustes et les incertitudes plus importantes.

- *Impacts potentiels du changement climatique*

L'étude de l'impact du changement climatique sur les structures côtières a démarré dans le cadre du projet Discobole du programme RGCU (Lebreton et Trmal, 2009). Les auteurs montrent que le renforcement des vagues à proximité des ouvrages a pour conséquence un plus fort endommagement de la carapace ainsi qu'une augmentation des débits de franchissement. Ces travaux ont été prolongés dans le cadre du projet « Sao Polo » du programme Gestion et impacts du changement climatique, GICC (Sergent, 2012). Pour conserver les mêmes volumes de franchissement, l'utilisation des formules empiriques amène aux conclusions suivantes : pour une hausse de 1 m du niveau marin, les ouvrages perméables implantés en faible profondeur doivent être rehaussés de 2 m environ, les ouvrages imperméables doivent être rehaussés de 3 m environ. En outre, les ouvrages perméables en enrochements subiront une augmentation de contraintes sur la carapace non négligeable. Ainsi, pour conserver les mêmes conditions de stabilité, les blocs d'un même ouvrage situé en faible profondeur pourront voir leur masse plus que doubler pour compenser une hausse d'un mètre du niveau marin.

Le projet « Sao Polo » a ensuite modéré ces premières conclusions à travers trois pistes.

Piste 1. Un dimensionnement probabiliste des structures côtières a désormais été entrepris à l'aide de la méthode de Monte-Carlo. Les deux variables plus ou moins corrélées sont les hauteurs de houle au large et la surcote à marée haute. Encore une fois, le rehaussement des ouvrages nécessaire pour conserver les mêmes franchissements est déterminé. Ce dimensionnement probabiliste modère les premières conclusions (1,4 m de rehaussement pour un ouvrage perméable au lieu de 2 m). Il tient en effet compte de tous les types d'événements extrêmes en conditions de déferlement (fortes houles) ou de *shoaling* (niveau élevé), alors que l'approche empirique déterministe prenait seulement en compte des conditions de déferlement en faible profondeur. La méthode probabiliste peut analyser aussi tous les types de changement : remontée du niveau marin, mais aussi augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes.

Piste 2. Les règles de dimensionnement qui ont été initialement appliquées sont des règles pour des structures neuves, comme si on démolissait l'ouvrage désormais mal dimensionné et on le reconstruisait en l'adaptant aux nouvelles sollicitations. Une option peu étudiée est le renforcement de l'ouvrage existant. Des tests sur modèles réduits physiques en canal à houle ont donné les conclusions suivantes pour une remontée d'un mètre du niveau marin :

- pour un ouvrage portuaire en enrochements, le renforcement de la structure avec une troisième couche de blocs (de même dimension que la première et deuxième couche) et un rehaussement du mur de couronnement de 1,5 m suffisent

pour réduire les volumes de franchissement à leurs valeurs initiales. La stabilité est aussi améliorée par rapport aux conditions initiales ;

- pour un ouvrage portuaire imperméable, deux options permettent de conserver le volume de franchissement initial : un parapet du type béquet de seulement 1 m de hauteur et l'ajout d'un réservoir avec des orifices pour l'évacuation des volumes de franchissement (cet aménagement peut servir hors tempête de promenade de front de mer) ;

- pour un ouvrage côtier de haut de plage en enrochements, deux options permettent de conserver le volume de franchissement initial : une troisième couche d'enrochements avec remontée du mur de couronnement de 2 m ou une troisième couche avec pente plus douce et avec remontée du mur de couronnement de 1 m seulement. La troisième couche est nécessaire pour garantir la stabilité de l'ouvrage.

Piste 3. La fonction de l'ouvrage est à analyser avec une approche coût-bénéfice. Les options possibles en fonction de la gravité du changement climatique sont : le laisser-faire, le renforcement, la reconstruction ou le repli stratégique. Pendant un certain temps, le laisser-faire restera ainsi la meilleure solution. Il sera cependant nécessaire d'anticiper le renforcement ou la reconstruction. En effet, si l'adaptation n'est pas anticipée, d'énormes volumes de matériaux de construction vont devoir être simultanément mobilisés afin de renforcer les ouvrages de protection lorsque ceux-ci commenceront à être clairement sous-dimensionnés. Les règles de construction neuve peuvent aussi intégrer une marge de manœuvre optionnelle précautionneuse : l'ouvrage prévoit de pouvoir éventuellement être rehaussé ou renforcé plus tard, par exemple en augmentant l'assise. Il est donc utile d'anticiper le moment où des travaux devront être entrepris. Il faudra aussi vérifier si le rythme de production actuel de matériaux de construction suffira à répondre à la demande.

Enfin, tous ces travaux font l'hypothèse que les fonds restent fixes. Lorsque les fonds sont mobiles, une incertitude importante existe sur l'évolution bathymétrique future devant l'ouvrage. Il est possible que la pente des fonds se raidisse ; ce qui accentuera encore les vagues et les sollicitations sur l'ouvrage. Seule une modélisation hydrosédimentaire complète de l'ouvrage et de son site d'implantation, selon des scénarios climatiques régionalisés, peut préciser la géométrie optimale de la future structure. De tels outils relèvent encore aujourd'hui du domaine de la recherche.

Partie C

L'adaptation aujourd'hui : de la gestion de crise à la planification

© Laurent Mignaux/MEDDE - MLETR



Section I

La vigilance « Vagues-submersion »



Patrick Santurette, *Météo-France*
Didier Jourdan, *SHOM*
Boris Leclerc, *MEDDE*

Les territoires littoraux français sont exposés à l'action de la mer et peuvent être vulnérables aux inondations par submersions marines. Les marées, l'exposition aux tempêtes, les fortes vagues soumettent le littoral à des aléas spécifiques. La submersion marine, inondation rapide et parfois sévère du littoral, focalise l'attention des pouvoirs publics et des médias depuis les événements liés à la tempête Xynthia en février 2010.

Un million et demi de personnes habitent dans des zones littorales potentiellement exposées au risque de submersion marine¹. Des tempêtes telles que Xynthia peuvent naturellement se reproduire et l'historique sur le temps long des phénomènes marins extrêmes montre que de telles tempêtes se sont déjà produites et donc se reproduiront dans le futur, avec des effets plus forts liés à l'élévation du niveau de la mer en raison du changement climatique. Il faut donc tout faire pour éviter que les impacts d'un tel événement soient aussi catastrophiques, ce qui constitue en soi une adaptation sans regret, c'est-à-dire utile quelle que soit l'ampleur du changement climatique, aux évolutions futures liées au changement climatique.

Le phénomène des submersions marines

Comme cela a déjà été précisé dans la partie B, la submersion marine est liée à une forte élévation du niveau de la mer résultant de la conjugaison de plusieurs phénomènes :

- la marée, due aux phénomènes astronomiques et modulée par la géographie du rivage – plus le coefficient de marée est fort, plus le niveau de la mer à marée haute est élevé ;

1. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-premiere-evaluation.html>

– une surélévation du niveau de la mer (surcote météorologique) par rapport au niveau imputable à la seule marée, due aux conditions atmosphériques. Le passage d'une dépression tempétueuse produit une surélévation du niveau marin selon trois processus principaux :

- la baisse de la pression atmosphérique (le poids de l'air sur la surface de la mer décroît ce qui fait monter le niveau de l'eau). Une diminution de la pression atmosphérique d'un hectopascal (hPa) équivaut approximativement à une élévation d'un centimètre du niveau de la mer; par exemple, une dépression de 980 hPa (soit une différence de 33 hPa par rapport à la pression atmosphérique moyenne de 1 013 hPa) génère une surélévation d'environ 33 cm ;
- la forte houle ou les vagues déferlant à la côte contribuent à augmenter la hauteur d'eau ;
- le vent dirigé vers la côte accumule des quantités d'eau sur le littoral. Cet effet est considérablement amplifié dans les zones de faibles profondeurs (plateaux continentaux, aires maritimes peu profondes) ou de côtes en forme d'entonnoir (estuaires, baies).



Figure C1 – Représentation schématique des différents processus engendrant le phénomène de submersion marine au passage d'une tempête

La simultanéité de ces facteurs – en particulier la concomitance de la pleine mer avec le pic de surcote – augmente l'intensité de la submersion, accroît les débordements et permet à la mer d'atteindre des zones habituellement abritées. L'intensité de la submersion marine dépend également de la pente des fonds

marins et de leur nature (sable, vase, galets, etc.) qui accélère ou freine la propagation de la vague sur la côte, ainsi que des caractéristiques du rivage telles que l'orientation de la côte par rapport à la direction dans laquelle se propagent les vagues. Ainsi, le déferlement de fortes vagues sur le rivage peut franchir, fragiliser ou endommager les jetées, digues et autres infrastructures. Un autre phénomène de surcote peut s'ajouter dans les estuaires lorsque l'écoulement des eaux fluviales est contrarié par des vents contraires. Les conséquences peuvent devenir dramatiques lorsque le débit du fleuve est accru par de fortes précipitations.

Les submersions marines peuvent affecter une grande partie de nos côtes de métropole, y compris en Méditerranée où la marée est de faible amplitude.

Quelques situations remarquables

Parmi les situations qui ont causé des dégâts importants, la tempête Xynthia reste dans toutes les mémoires par les inondations catastrophiques survenues sur le littoral vendéen. La tempête a été particulièrement meurtrière, faisant 53 victimes, plus de 500 000 sinistrés. Les dégâts matériels se sont élevés à plus de 2,5 milliards d'euros, 6 000 maisons ont été inondées en Vendée et Charente-Maritime.

Plus récemment, l'hiver 2013-2014 a été particulièrement perturbé et a généré de nombreuses situations à risque de submersions marines en Manche et sur les côtes atlantiques. Ces événements, bien que moins exceptionnels, sont de nature à constituer une menace pour les personnes et les biens. Les franchissements par paquets de mer qui ont été particulièrement observés durant cette période ont engendré des ruptures de mur de soutènement, de cales et des inondations localisées.

1^{er} janvier 2010

Des vagues, en provenance des Baléares, associées parfois à une surcote de plus de 50 cm, ont provoqué des déferlements très importants sur la côte méditerranéenne, des îles d'Hyères à Monaco et sur la partie occidentale de la Corse. La Côte d'Azur et la Corse ont été touchées par des trains de vagues exceptionnels pour la région.

27-28 février 2010

La nuit du 27 au 28 février 2010, lors du passage de la tempête Xynthia sur le golfe de Gascogne, la forte baisse de la pression atmosphérique et les vents violents ont provoqué une forte surcote alors que le niveau de la mer était déjà au plus haut en raison d'une marée de coefficient 102 et de fortes vagues. La mer a alors dépassé de plus de 1 m le niveau des plus grandes marées déjà observées : 1,53 m au-dessus des plus hauts niveaux correspondants aux plus fortes marées astronomiques a été relevé au marégraphe de La Rochelle. L'eau est montée à plus de 2 m dans certaines habitations du littoral charentais et vendéen.

5 février 2014

Le 5 février 2014 une dépression très creuse (en dessous de 950 hPa) a circulé sur les îles Britanniques générant de très forts vents de sud-ouest sur les côtes bretonnes. Ces vents ont levé des vagues de 6 à 8 m près des côtes et provoqué un afflux d'eau sur les littoraux exposés au vent d'ouest-sud-ouest. Dans un contexte de coefficient de marée de 99, une surcote fut prévue le matin (de 65 à 80 cm) au moment de la pleine mer vers 7h30 locales. La figure C2 donne les prévisions pour Le Conquet des différents modèles numériques utilisés à Météo-France pour prévoir la surcote et le niveau d'eau. Les observations des marégraphes indiquées en rouge montrent le bon comportement de la prévision numérique, assez proche de la réalité observée.

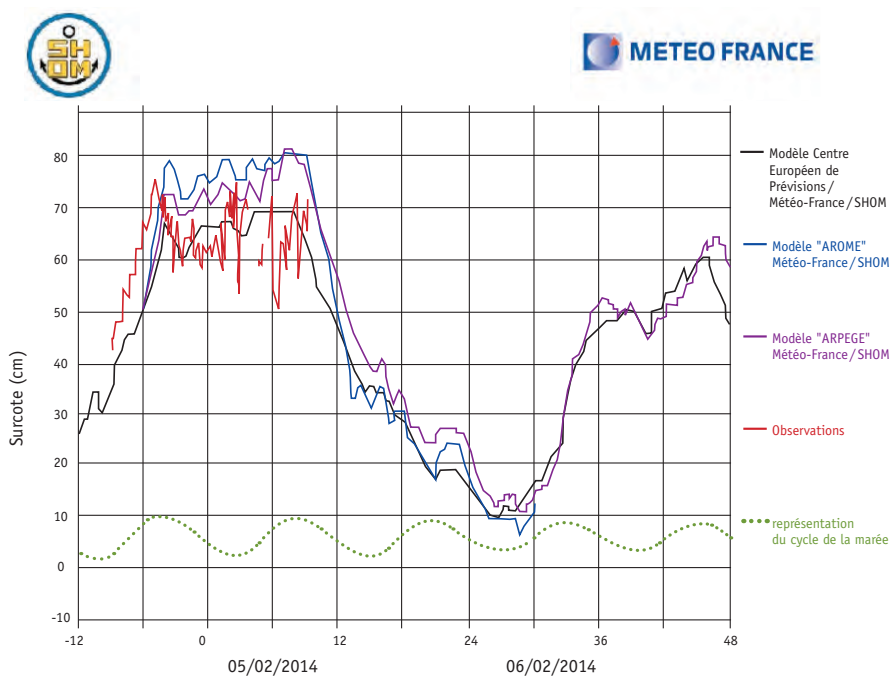


Figure C2 – Prédiction pour Le Conquet de la surcote météorologique prévue pour le 5 février 2014 par les différentes simulations numériques utilisées opérationnellement à Météo-France

La vigilance « vagues-submersion »

L'analyse de la situation de la tempête Xynthia a montré que Météo-France disposait d'informations permettant d'alerter de l'occurrence de ces phénomènes, mais devait améliorer la diffusion de l'information vers le public, en plus des avertissements déjà transmis aux responsables de la Sécurité civile. Conçu à l'origine pour fournir des informations sur les risques associés à cinq types de phénomènes,

purement atmosphériques (vent violent, fortes précipitations, orages, neige-verglas, avalanches) puis étendu ensuite aux températures extrêmes (canicule, grand froid) puis aux phénomènes hydrologiques (inondation et pluie-inondation en remplacement de fortes précipitations), le dispositif vigilance a été enrichi en octobre 2011 du risque « vagues-submersion² ». Depuis cette date, la carte de vigilance météorologique de Météo-France intègre le risque de submersion marine sur le littoral, comme l'illustre la figure C3 ; en cas de vigilance « vagues-submersion » orange ou rouge, le pictogramme vagues-submersion apparaît sur la carte de vigilance, sur une bande de couleur longeant le littoral du département concerné.

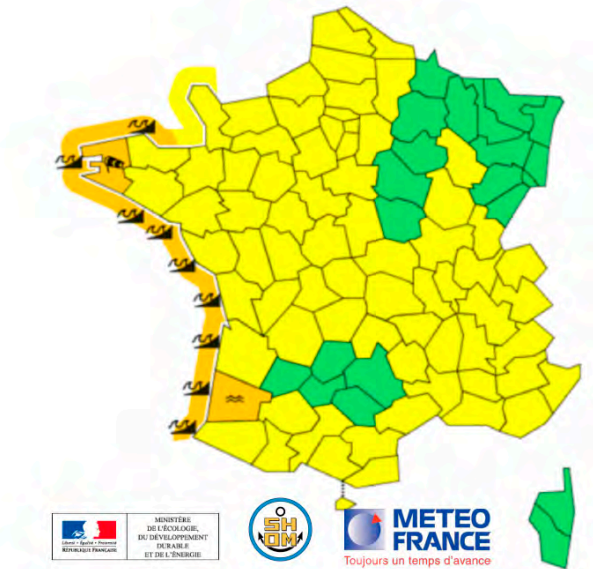


Figure C3 – Carte de vigilance émise le 4 février 2014 à 16h00 locale. Le littoral des Côtes-d'Armor et du Finistère aux Pyrénées-Atlantiques a été placé en vigilance orange « vagues-submersion ».

Le dispositif de vigilance météorologique vagues-submersion a été développé par Météo-France en collaboration avec le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM) et avec le soutien de la Direction générale de la prévention des risques du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. Son objectif est d'informer le public et les acteurs de la gestion de crise en cas de risque de submersion marine. La vigilance météorologique est souvent assimilée à une alerte. Elle est plus exactement un avertissement, le premier maillon de la chaîne reliant la prévention à la gestion des risques météorologiques. Elle constitue une première information, qui dans de rares cas peut conduire à l'activation d'une procédure d'alerte des populations accompagnée de mobilisations de moyens de secours, de consignes comme l'ordre de mise à l'abri ou d'évacuation. Le lancement de cette alerte est du ressort des autorités en charge de la sécurité des populations (préfectures, mairies, etc.).

2. Il s'agit d'une des mesures de la fiche « Risques naturels » du PNACC 2011-2015.

Le phénomène de vagues-submersion est un aléa complexe relevant de plusieurs facteurs géographiques, météorologiques et conjoncturels. La prévision de cet aléa est donc fortement dépendante des scénarios de prévision météorologique et intègre une part d'incertitude. Les prévisionnistes du service de prévision marine et océanographique de Météo-France s'appuient sur une production opérationnelle de prévisions de l'état de mer et du niveau marin et sur leur expertise en météorologie marine (choix entre différents résultats de prévision numérique en fonction des dernières observations disponibles, modulation de leurs résultats, etc.), pour évaluer la dangerosité de la situation et le niveau de vigilance pertinent. Le déclenchement de la vigilance se fait à l'échelle du département et dépend de critères qui ont été définis selon des aléas de référence renvoyant à des submersions remarquables. Ces critères portent sur la hauteur totale du niveau marin (due à la marée et à la surcote) et sur l'état de la mer (hauteur des vagues, direction, période).

Sur la période d'octobre 2011 à décembre 2014, Météo-France a déclenché 24 épisodes de vigilance vagues-submersion de niveau orange, dont 18 épisodes en Manche-mer du Nord-Atlantique et 6 en Méditerranée. À ce jour, aucun épisode de niveau rouge n'a encore été rencontré. En Manche et Atlantique, 10 épisodes sur 18 sont liés à des grandes marées, avec un coefficient de marée supérieur ou égal à 100, 15 épisodes sur 18 avec un coefficient de marée supérieur ou égal à 80. Concernant la pertinence du déclenchement de la vigilance orange vagues-submersion, 5 % de fausses alarmes ont été relevés sur la période d'octobre 2011 à décembre 2014. L'anticipation de plus de 7 heures des événements de niveau orange est de 90 %.

Le service de prévision marine et océanographique de Météo-France, le SHOM et les services de l'État travaillent de concert à l'amélioration continue du dispositif de vigilance vagues-submersion, par une meilleure observation et compréhension du phénomène à l'échelle locale, par l'amélioration de la modélisation numérique et des outils à disposition des prévisionnistes et par la formation des prévisionnistes.

Coûts des événements naturels sur le littoral et dispositif assurantiel



Thierry Hubert, MEDDE/DGPR
Roseline Laroche, MEDDE/DGPR

En France, depuis la création en 1982 du régime d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles, le coût qu'elles représentent est un indicateur de la gravité de l'événement. Il exprime notamment le montant des dommages subis par les entreprises et les particuliers sinistrés lorsque le phénomène naturel à l'origine de la catastrophe a été constaté par arrêté ministériel. Ces dommages sont considérés comme les effets des catastrophes naturelles lorsqu'ils sont matériels, directs, non assurables ayant pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel et lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises.

En effet, après chaque événement naturel qui crée des dommages à des biens, l'arrêté fixe les communes et les périodes concernées par la catastrophe ainsi que la nature des dommages couverts par la garantie. Une commission interministérielle, présidée par le ministre de l'Intérieur, est réunie pour reconnaître la nature catastrophique du phénomène ainsi que son étendue et examiner les dossiers transmis par les préfetures à la demande des collectivités territoriales. Les biens indemnisés sont les biens couverts par un contrat d'assurance « dommages incendie des biens » tel que l'assurance « dommage multirisques habitation » et l'assurance « dommages aux véhicules ».

Le montant des coûts des catastrophes naturelles (hors dommages aux automobiles) sur la période de 1990 à 2012 est estimé à partir de ces données à près de 21,7 milliards d'euros dont 12,5 milliards pour les inondations, 8,3 milliards pour la sécheresse et 0,9 milliard pour les autres périls. Ces chiffres varient beaucoup d'une année sur l'autre comme le montre la figure C4.

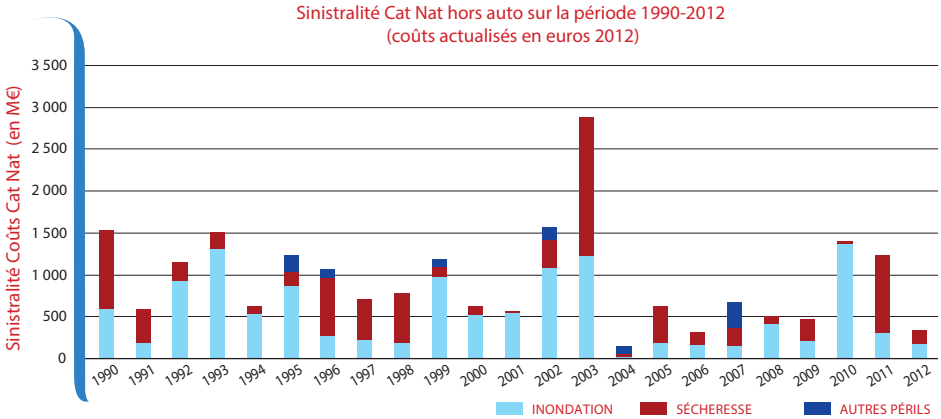


Figure C4 – Évolution du coût des catastrophes naturelles hors véhicules en France entre 1990 et 2012 (coût actualisé en euros)

Source : CCR - Caisse centrale de réassurance.

Ainsi, en France, la forte pénétration de l'assurance des dommages aux biens causés par les aléas naturels permet de considérer le coût cumulé des sinistres indemnisés par événement comme un assez bon indicateur de la gravité de celui-ci.

Toutefois, il n'exprime que partiellement le montant des dommages subis par des aléas naturels. En effet, les dommages subis par les effets d'un vent de tempête relèvent de la garantie « tempête, grêle, poids de la neige sur les toitures » (TGN) distincte de la garantie « catastrophes naturelles ». Pour mieux mesurer les effets des événements naturels, il convient d'ajouter les coûts des indemnisations liées à ces deux garanties (CatNat et TGN).

Selon la Mission risques naturels (MRN) sur les trente dernières années, les indemnisations totales dues aux conséquences dommageables des événements naturels s'élèvent, en moyenne annuelle, à 1 milliard d'euros pour les tempêtes, 500 millions d'euros pour les inondations (dont 10 % au titre de la submersion marine), 320 millions pour la sécheresse géotechnique et moins de 50 pour les autres catégories d'événements naturels. Cette période n'a pas connu d'inondations aux conséquences aussi exceptionnelles que les tempêtes de 1999.

La figure C5 décrit l'évolution annuelle de 1982 à 2011 de cette sinistralité cumulée à l'échelle de la France. Elle montre la grande volatilité des montants cumulés enregistrés au fil de cette séquence d'une trentaine d'années, en lien avec les quelques événements majeurs survenus dans la période, qui s'avèrent être davantage dus aux effets des vents de tempêtes qu'aux différentes formes d'inondations.

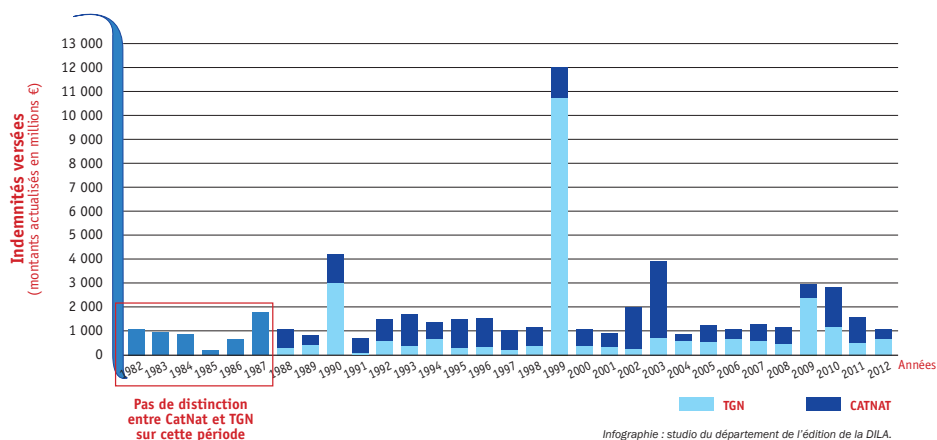


Figure C5 – Évolution annuelle de 1982 à 2012 des indemnités versées au titre des garanties catastrophes naturelles et tempête-grêle-neige (ou de la sinistralité CatNat et TGN) en France

Source : FFSA-GEMA – Fédération française des sociétés d'assurances - Groupement des entreprises mutuelles d'assurance.

Si ces données intègrent les dommages assurés causés aux biens des collectivités, ainsi que les pertes d'exploitation et pertes indirectes, elles n'incluent pas celles causées aux récoltes, aux infrastructures non assurées et aux biens de l'État.

Toutefois, la forte présence de l'assurance permet d'estimer le montant des dommages économiques de manière assez fiable en appliquant à celui des dommages assurés un coefficient allant de 1,5 à 2 selon les aléas et les territoires.

Les travaux de l'Observatoire national des risques naturels (cf. encadré ONRN ci-après) ont permis de produire des indicateurs de sinistralité selon différents niveaux de granularité géographique : départemental pour les vents de tempête, communal pour les inondations entre autres.

La carte de la figure C6 est une des cartes interactives téléchargeables sur le portail www.onrn.fr pour l'indicateur exprimant, par tranches, le coût cumulé des inondations par commune de 1995 à 2011 (source : ONRN/CCR). Elle illustre l'inégale répartition des sinistres, résultant de la grande concentration géographique des enjeux exposés aux inondations d'une part et de la non-survenance récente d'événements majeurs sur certaines zones pourtant très exposées d'autre part. Cette entrée par les territoires pour l'accès à l'information sur la sinistralité constitue un progrès sensible en matière de partage et de diffusion de l'information sur les risques.

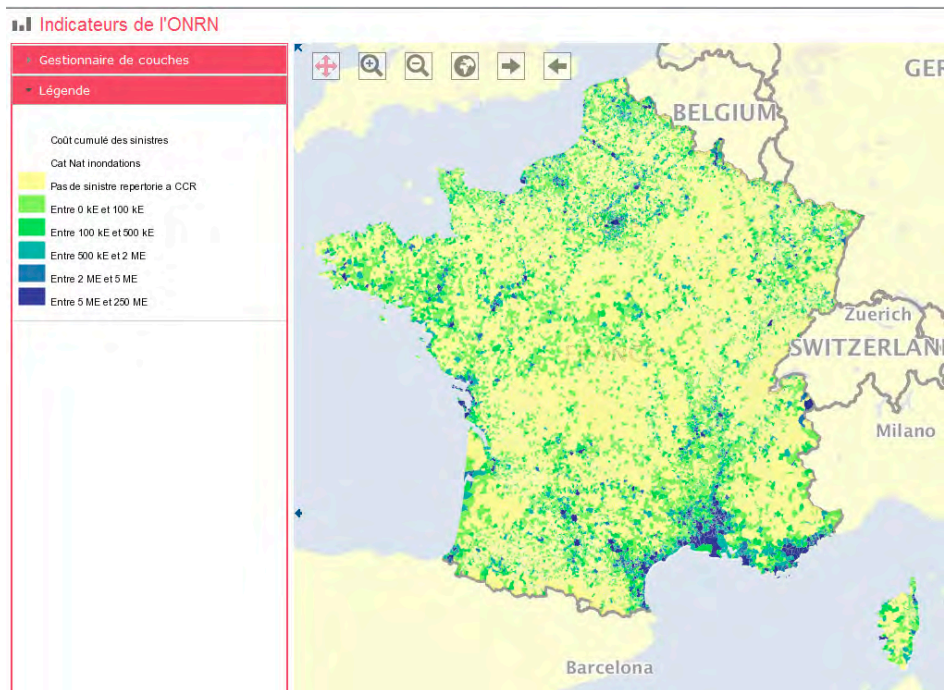


Figure C6 – Exemple de carte interactive téléchargeable sur le portail www.onrn.fr exprimant par tranches les coûts cumulés des inondations par commune de 1995 à 2011

Source : ONRN /CCR.

La connaissance de la sinistralité sur le littoral

Comme chaque événement majeur, Xynthia a donné lieu à des analyses plus fines par les partenaires assureurs de l'ONRN, des conséquences dommageables, par territoires affectés, tant pour les effets des vents de tempête que des submersions marines. Si le montant total indemnisé (1,5 milliard d'euros) se répartit à parts égales entre effets des vents et des submersions, les volumes et coûts moyens des sinistres sont très différents : respectivement 435 000 sinistres pour 1 700 euros de coût moyen par sinistre tempête, contre 35 000 sinistres pour 21 euros de coût moyen par sinistre submersion (source FFSA-GEMA).

Pour cet événement, une cartographie à la maille communale de la répartition des montants cumulés indemnisés au titre des inondations liées à l'événement Xynthia (submersion marine et débordements de cours d'eau) est présentée sur la carte de la figure C7.

Inondations consécutives à la tempête Xynthia de février 2010

Coût par commune pour l'ensemble du marché

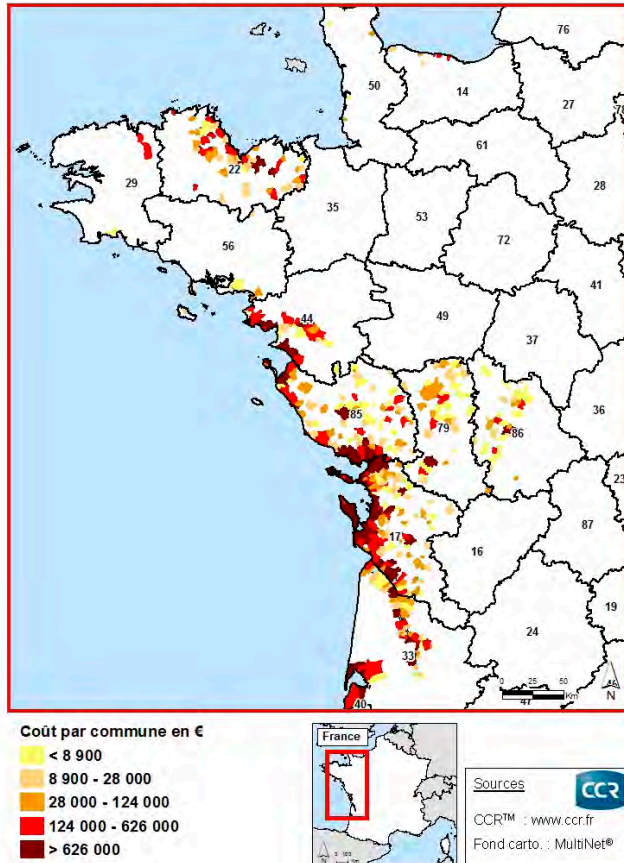
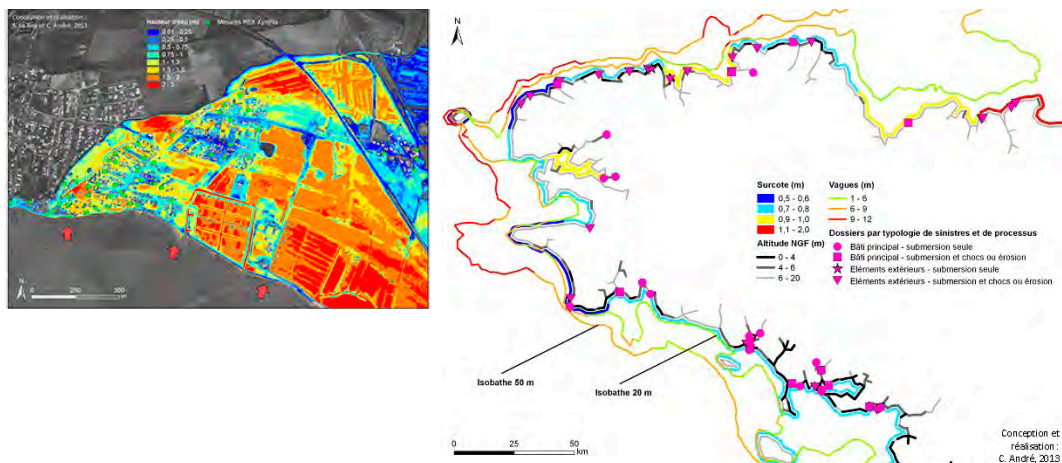


Figure C7 – Répartition des montants cumulés indemnisés au titre des inondations liées à l'événement Xynthia (submersion marine et débordements de cours d'eau)

Source : CCR.

À l'échelle encore plus fine de l'habitat affecté par la submersion ou les vagues de tempête, une récente recherche¹ codirigée par l'université de Bretagne-Ouest et le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), financée par la Fondation MAIF pour la prévention, a permis d'exploiter des dossiers d'expertise sinistre de sociétés d'assurances volontaires, pour analyser les facteurs d'endommagement et tester des méthodes statistiques permettant de prédire les coûts de tempêtes futures, démontrant l'intérêt des données d'assurance, sous réserve d'améliorer les données mobilisables, tant en qualité qu'en quantité (Figure C8, André, 2013).

1. Projet Johanna.



Figures C8 – À gauche carte du résultat de la modélisation hydraulique des hauteurs d'eau maximales aux Bouchôleurs lors de Xynthia avec la localisation des sinistres d'assurance – Modélisation BRGM ; fond orthophoto BD ORTHO® IGN) ; à droite carte des indicateurs de l'aléa et de la répartition des sinistres de la tempête Johanna en Bretagne

Sources : André (2013).

Conclusion

Le littoral français est menacé par un ensemble de phénomènes naturels et concentre de forts enjeux de développement urbain et touristique, ce qui le rend particulièrement sensible aux risques qui devraient augmenter avec les effets du changement climatique, notamment l'élévation du niveau des mers.

Les coûts des indemnités d'assurances au fil des trente dernières années montrent déjà la vulnérabilité des habitations et des activités. La réduction de la vulnérabilité ou tout au moins la maîtrise de l'augmentation passe par des mesures de prévention et d'adaptation pour éviter que l'accroissement des coûts des catastrophes soit inéluctable.

Le travail engagé par l'ONRN sur les risques et la sinistralité pourra démontrer la complexité des situations et la nécessité de travailler « sans regret ».

Une collaboration entre l'ONERC et l'ONRN permettrait de contribuer à un meilleur suivi des phénomènes naturels, de leurs conséquences et des coûts des indemnités qu'ils induisent de façon à préciser les mesures de réduction de vulnérabilité à mettre en place afin de prévenir les risques et de s'adapter au changement climatique notamment sur le littoral.

L'Observatoire national des risques naturels

L'ONRN a été créé en mai 2012, à la suite des conséquences catastrophiques de la tempête Xynthia, par la signature d'une convention de partenariat entre l'État représenté par le ministère du Développement durable (MEDDE), la Caisse centrale de réassurance (CCR) et la Mission des sociétés d'assurances pour la connaissance et la prévention des risques naturels (MRN, association créée par la FFSA et le GEMA). Cette convention a été reconduite le 1^{er} juillet 2014 pour une période de trois ans.

Ses principaux objectifs sont :

- d'améliorer et de capitaliser la connaissance sur les aléas et les enjeux ;
- de contribuer au pilotage et à la gouvernance de la prévention des risques ;
- de servir l'analyse économique de la prévention et de la gestion de crise ;
- de contribuer à l'amélioration de la culture du risque.

À ce stade, 36 indicateurs couvrant 3 aléas (inondation, sécheresse, Tempête-Grêle-Neige) ont été produits. Ils peuvent être visualisés et téléchargés sur le portail de l'ONRN. Deux partenariats de projets ont été conclus en 2014. En 2015, l'ONRN poursuit ses objectifs de partage des données et des connaissances, de production d'indicateurs et de promotion des observatoires régionaux.

Plus d'informations sur le portail de l'ONRN www.onrn.fr/

Section 3

Réglementation des territoires exposés aux risques de submersion marine



Thierry Hubert, MEDDE/DGPR
Boris Leclerc, MEDDE/DGPR

Comme cela a été souligné dans l'introduction du présent rapport, le littoral français est un espace soumis à des pressions démographiques et économiques très importantes, mais c'est avant tout un ensemble de milieux, contrastés, vivants et mobiles qu'il s'agit de bien appréhender. Ces territoires littoraux sont confrontés à deux principaux aléas que sont la submersion marine et l'érosion. Ces aléas génèrent des risques lorsqu'ils touchent des secteurs plus ou moins anthropisés avec des constructions, habitations, activités permanentes ou saisonnières.

Un risque est la combinaison d'enjeux soumis à un aléa :
aléa x enjeux = risque

On appelle « aléa » la possibilité de l'apparition d'un phénomène ou d'un événement résultant de facteurs ou de processus qui échappent au moins en partie à l'homme.

On appelle « enjeux » les personnes, biens, équipements, et/ou environnement susceptibles de subir les conséquences de l'événement ou du phénomène.

Cette anthropisation du littoral est le fait d'une forte attractivité estivale, d'une certaine confiance dans les protections et d'un oubli des risques résiduels et passés. La tempête Xynthia de 2010 ainsi que les préoccupations quant aux conséquences du changement climatique ont montré la fragilité du littoral. Les constats sont flagrants sur les côtes aquitaine, languedociennes et normandes. La succession des tempêtes a causé beaucoup de dégâts sur les habitations, les infrastructures et les activités, mais aussi sur le milieu naturel : aujourd'hui le recul du trait de côte est une impressionnante réalité développée plus loin dans ce rapport.

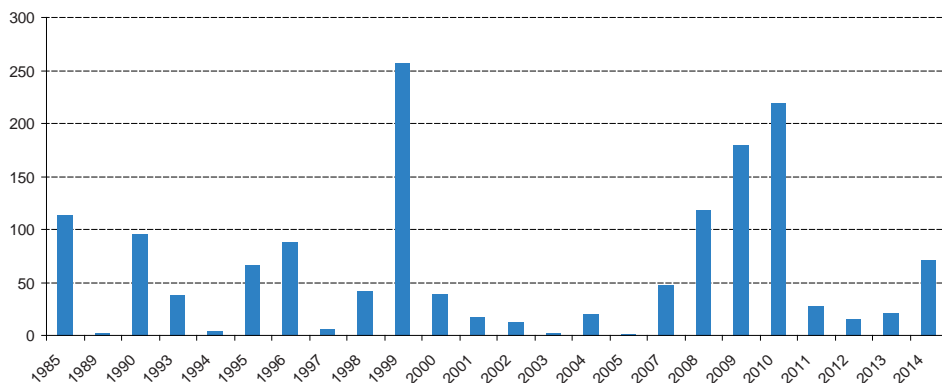


Figure C9 – Nombre de communes du bord de mer ayant été concernées par un arrêté de catastrophe naturelle pour un aléa littoral entre 1985 et 2014

Source : DGPR-Base de données Gaspar (extraction 03/2015).

En complément du coût des catastrophes naturelles affectant le littoral présenté précédemment, la figure C9 montre que le nombre de communes faisant l'objet d'indemnisation au titre du régime de catastrophes naturelles pour des aléas littoraux est très important pour les trois principales tempêtes qui se sont produites en 1999, 2009 et 2010. Ce sont les tempêtes Lothar et Martin en 1999, Klaus en 2009 et Xynthia en 2010 qui ont occasionné des dégâts importants sans commune mesure avec les événements qui ont pu se dérouler les autres années.

La série ne permet pas de remonter au-delà de vingt ans. Ces tempêtes ont touché le littoral par des effets de submersion et produit des dégâts liés aux précipitations. Ces phénomènes ne sont pas nouveaux et si la succession des tempêtes semble montrer une augmentation, elles n'en sont pas pour autant des indices d'évolution du changement climatique. De telles tempêtes se sont déjà produites en des périodes antérieures et il a été montré précédemment que le nombre de tempêtes ayant frappé la France durant les soixante dernières années n'a pas augmenté du point de vue statistique.

Ces événements ont incité l'État à mettre en place une série de mesures afin de réglementer l'urbanisation sur les territoires exposés au phénomène d'érosion ou aux risques de submersion marine.

Ainsi, à la suite des événements dramatiques de 2010 sur le littoral de Vendée et de Charente, mais aussi du Var, l'État a mis en place, dès février 2011, un plan global : le plan « submersions rapides » (PSR). S'achevant en 2016, le PSR vise à apporter des réponses opérationnelles aux besoins de prévention et de protection des territoires face au risque inondation. Il a notamment pour objectif le renforcement de 1 200 km de digues de protection du littoral dont l'État a prévu le cofinancement dans une enveloppe de 500 millions d'euros sur cinq ans.

Ce plan a été lancé au moment où le législateur a acté, dans le cadre de la transposition de la directive européenne sur l'évaluation et la gestion des inondations, l'élaboration d'une Stratégie nationale de gestion des risques d'inondations (SNGRI).

Élaborée par l'État en association avec les parties prenantes, la SNGRI fixe le cap de prévention des risques d'inondation à court, moyen et long terme. Ces priorités nationales seront déclinées localement via des plans de gestion des risques d'inondation (PGRI) qui vont permettre de planifier, coordonner et mettre en œuvre les actions prioritaires sur les territoires les plus exposés, notamment les 122 territoires à risque important d'inondation, dont 34 intégrant des problématiques de submersion marine, identifiés fin 2012, pour lesquels des stratégies locales seront élaborées.

L'élaboration de cette stratégie nationale a été conduite de manière collective et largement concertée sous l'égide de la commission mixte inondation, instance de gouvernance nationale de gestion des inondations. Depuis le lancement de la réflexion en 2009 jusqu'à l'approbation du projet lors de la commission mixte inondation du 19 décembre 2013, les étapes nécessaires pour aboutir à un texte partagé par l'ensemble des parties prenantes ont été la consultation du public à l'automne 2013, puis la consultation récente début 2014 du Conseil national de l'eau, du Conseil d'orientation pour la prévention des risques naturels majeurs et du Conseil national de la mer et des littoraux. La SNGRI sera ensuite déclinée de façon opérationnelle par un plan d'action national, selon l'articulation montrée sur la figure C10.

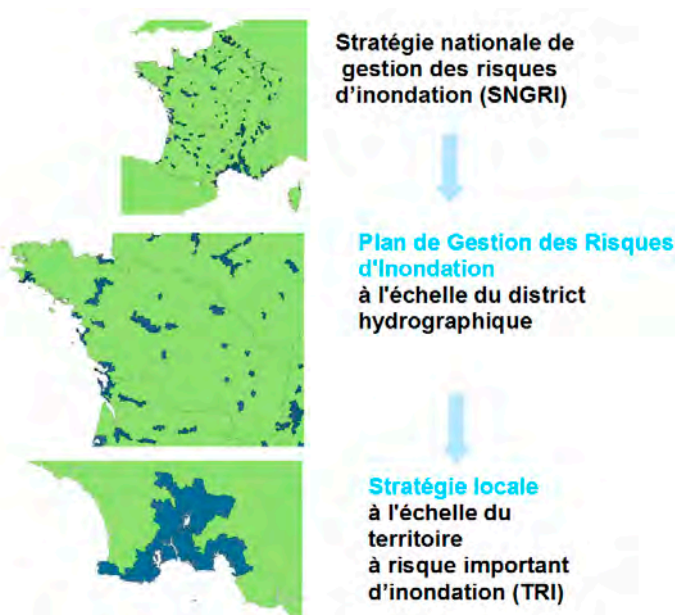


Figure C10 – Déclinaison à l'échelle des territoires de la stratégie nationale de gestion des risques d'inondation

Source : MEDDE / DGPR.

Sur ces questions de risques littoraux, le plan de prévention des risques littoraux (PPRL) reste le principal outil de prévention pour les communes à risque. Sur le champ spécifique des PPR, 303 PPR littoraux prioritaires ont été identifiés par la circulaire du 2 août 2011. À la fin du premier trimestre 2015, 273 d'entre eux étaient prescrits et 68 approuvés ou appliqués par anticipation.

Afin d'accompagner leur réalisation, le MEDDE a élaboré un nouveau guide méthodologique¹. Il vient compléter la circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les PPRL. Celle-ci intègre dans l'aléa « submersion marine », l'élévation du niveau des mers du fait du changement climatique en précisant les modalités de prise en compte dans les PPRL. Le guide méthodologique expose la démarche générale de réalisation d'un PPRL pour délimiter les aléas considérés (submersion marine, érosion, migration dunaire), leur qualification, l'étude des enjeux sur le territoire concerné et l'élaboration du règlement en tenant compte du niveau des mers prévisible à l'échéance 2100 compte tenu du changement climatique.

L'aléa érosion est aussi quantifié en fonction de l'impact des événements majeurs. L'aléa de référence érosion est défini par une méthode de type « Federal Emergency Management Agency » (FEMA), « Dune Erosion » (DUROS), Kriebel (1985) et Dean (1991) à un horizon de cent ans².

Plus particulièrement concernée par le changement climatique, la qualification de l'aléa submersion marine se fait sur la base d'un niveau marin de référence, d'occurrence centennale, ou, de l'événement historique si son occurrence est encore plus rare. Afin de prendre en compte les évolutions du climat, le niveau marin de référence intègre 20 cm d'augmentation du niveau d'eau et 60 cm à horizon 2100 (figure C11). Ces valeurs proviennent du scénario tendanciel le plus probable établi par le GIEC et repris par l'ONERC.

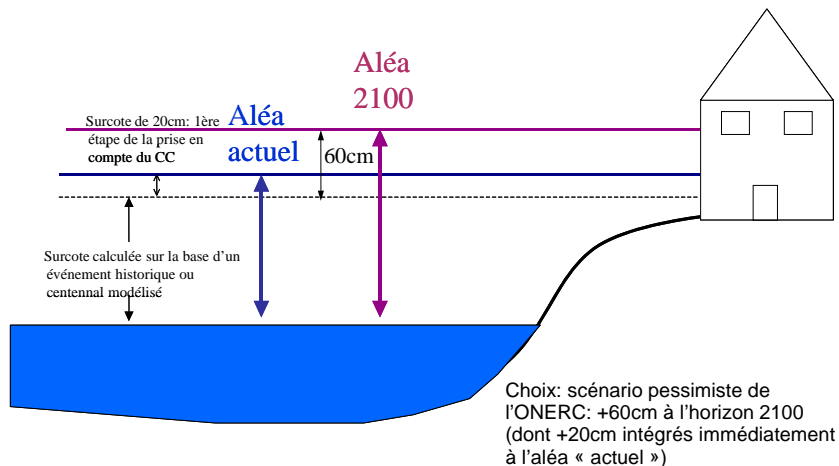


Figure C11 – Illustration de la prise en compte de la hausse du niveau des mers pour la qualification de l'aléa de submersion marine

Source : circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les PPRL.

1. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Guide-methodologique-Plan-de.html>

2. Ces méthodes sont fondées sur des approches variées majoritairement empiriques. Elles décrivent le profil perpendiculaire de la plage après un épisode de tempête.

L'impact de l'aléa 2100 porte sur :

- les prescriptions pour les nouvelles constructions ;
- le caractère inconstructible d'une zone non urbanisée en aléa 2100 fort pour un aléa nul actuellement.

En revanche, les zones urbaines ne sont pas rendues inconstructibles sur la base de cet aléa (lesquelles sont déterminées sur la base de l'aléa actuel). Trois niveaux de zonage découlent du niveau de l'aléa (faible, modéré, fort/très fort). Ils déterminent la portée des mesures que le règlement doit prendre en matière de maîtrise de l'urbanisation. Cela peut conduire à l'inconstructibilité sur certains secteurs soumis à des niveaux d'aléas élevés. Lorsqu'ils sont plus faibles, le règlement porte davantage sur des mesures de réduction de vulnérabilité par adaptation du bâti (zone refuge, surélévation des compteurs, etc.).

À toutes les étapes de l'élaboration des PPRL, dont l'avancement pour les risques littoraux est présenté en figure C12, la concertation et l'association des parties prenantes sont recherchées afin d'adapter cette démarche générale aux réalités du terrain et aux données disponibles. Ces outils de prévention qui ont vocation à être révisés régulièrement vont pouvoir, progressivement, à mesure de leur publication, intégrer de nouveaux éléments de connaissance du territoire.

De même, le maire, responsable de l'urbanisme de sa commune, est invité, au titre de l'élévation du niveau des mers et des phénomènes d'érosion, à prendre des mesures de précautions et de réduction de la vulnérabilité à travers les documents d'urbanisme (schéma de mise en valeur de la mer, plan local d'urbanisme [PLU], carte communale, schéma de cohérence territoriale [ScoT]). Il peut le faire en définissant un périmètre de risques. L'application de la loi « Littoral » permet aussi de maîtriser l'urbanisation des zones les plus vulnérables à court terme et d'éviter pour les nouvelles constructions d'exposer les personnes et les biens. La bande des 100 m peut même être étendue par le PLU « lorsque l'érosion des côtes le justifie » (art. R146.4 CU).

Dans cette approche des risques littoraux aggravés par le changement climatique, il importe de bien réfléchir aux modalités de mise en œuvre d'une logique de protection. Celle-ci ne peut s'aborder sans considérer la place des enjeux au sein du système concerné. En ce sens, l'anticipation doit guider toute stratégie d'urbanisation dans un dialogue et une démarche de projet à court et long terme associant les collectivités à la gouvernance.

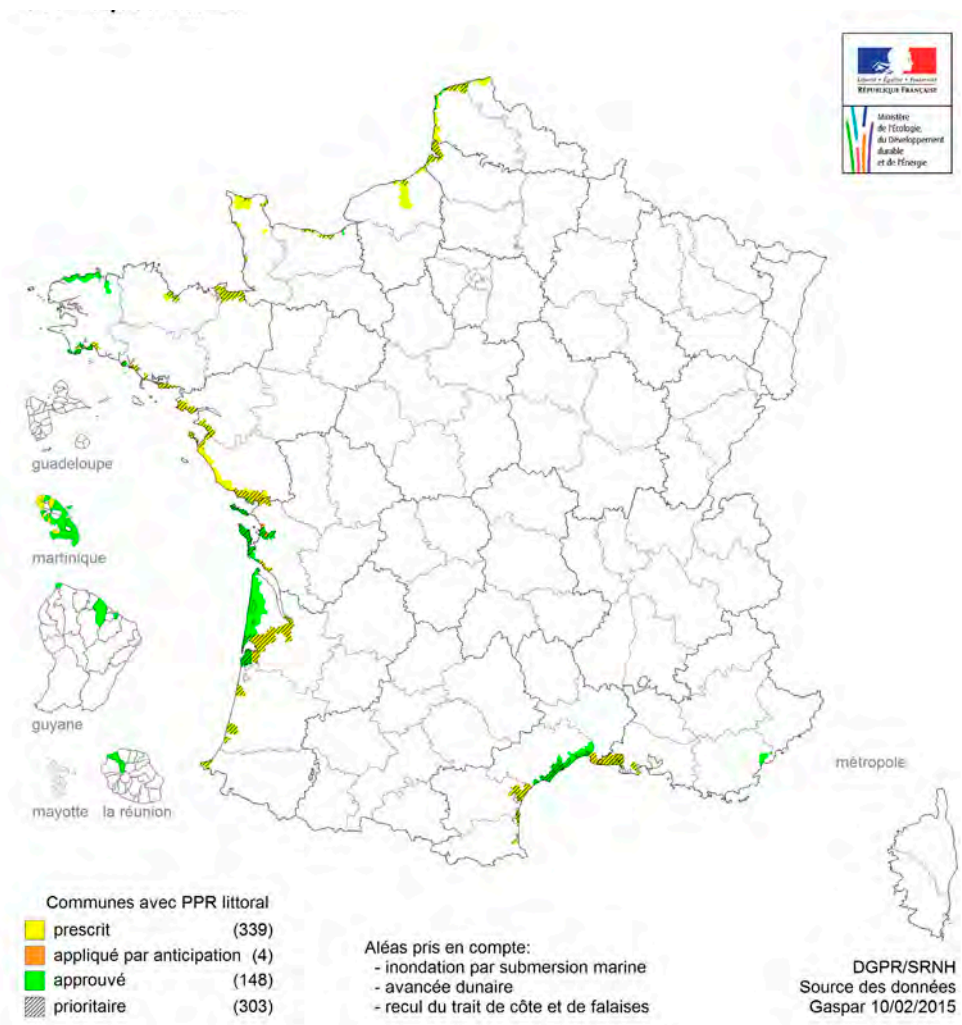


Figure C12 – Carte d'avancement des PPR littoraux

Source : DGPR/SRNH Gaspar au 10/02/2015.

Une stratégie nationale pour anticiper l'érosion littorale



Mireille Guignard, *MEDDE/DGALN*

Un constat partagé : le littoral est une interface terre-mer riche, mais fragile

En France, près d'un quart du littoral recule du fait de l'érosion littorale. Ce phénomène naturel, aggravé souvent par les actions de l'homme (ouvrages, aménagement, pollution tellurique, extraction, etc.) et les effets du changement climatique, peut avoir un impact important sur de nombreux domaines, dont l'occupation du sol, les activités humaines, les usages liés à la mer, l'urbanisation, le tourisme et l'agriculture.

Comme cela a déjà été mentionné dans l'introduction de ce rapport, le littoral est un des territoires français qui connaît la plus forte augmentation démographique et touristique, conduisant à un haut niveau d'artificialisation des communes : 2,5 à 3 fois la moyenne métropolitaine. Plus on se rapproche de la côte, plus cette artificialisation est forte.

La population des départements littoraux pourrait croître de près de 20 % entre 2007 et 2040 (4,5 millions d'habitants en plus), surtout sur la façade atlantique, dans le Languedoc-Roussillon et les départements d'outre-mer. Avec une telle croissance, la population des communes littorales pourrait augmenter de 1,4 million d'habitants et atteindre plus de 9 millions d'habitants en 2040.

Ainsi, plus de 140 000 personnes résident à moins de 250 m des côtes en érosion et plus de 800 000 personnes résident dans des zones basses.

La naissance d'une stratégie nationale issue d'une concertation raisonnée

Face à la pression anthropique exercée sur ce territoire exceptionnel, convoité, source et ressource indispensable de nos écosystèmes, le gouvernement a adopté, en mars 2012, une démarche stratégique intitulée « Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte ; vers la relocalisation des activités et des biens ». Celle-ci est directement issue du rapport émis en novembre 2011 par le député Alain Cousin, inspiré des débats du 6^e comité opérationnel du Grenelle de la mer (« Aménagement, protection et gestion des espaces littoraux »). Au cours de ces débats, différents collègues d'experts, de politiques, des services de l'État, d'associations et d'acteurs socio-économiques avaient pu exprimer leur avis et propositions.

L'engagement 74.f du Grenelle de la mer inscrivait l'objectif « Développer une méthodologie et une stratégie nationale (collectivités et État) pour la gestion du trait de côte, pour le recul stratégique et la défense contre la mer ». L'engagement 68.b ajoutait « passer de la gestion intégrée de la zone côtière à la gestion intégrée de la mer et du littoral ».

Rappel des objectifs principaux

Tout l'enjeu pour les collectivités locales et l'État consiste à anticiper l'évolution du trait de côte et à mieux adapter les territoires concernés aux multiples aléas des phénomènes naturels littoraux. Il s'agit donc de mieux prendre en compte ces phénomènes naturels dans les politiques publiques, de faire des choix d'urbanisme et d'aménagement adaptés et cohérents, et de prévoir sur le long terme les conséquences de ces choix relatifs à la protection du littoral et de ses usages.

Dans ce sens, il s'agira d'initier des stratégies locales adaptées sur les territoires qui prennent en compte les phénomènes naturels et anticipent au mieux leurs impacts. Ces stratégies intégreront l'ensemble des projets de développement, d'aménagement et de gestion de l'espace littoral, stratégies partagées par l'ensemble des acteurs concernés, dans le respect des trois piliers du développement durable que sont les enjeux sociaux, économiques, et environnementaux.

Le plan d'action de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte

La Stratégie nationale se décline en un premier programme de 22 actions à l'horizon 2015, réparti sur quatre axes et fondé sur des principes et recommandations fortes, générales et transversales¹.

La Stratégie nationale se fonde sur l'idée principale qui est de considérer la mobilité du trait de côte et la dynamique hydrosédimentaire comme parties intégrantes du littoral et des échanges terre-mer.

Le premier axe de la stratégie (A) a pour objectif de « Développer l'observation du trait de côte et identifier les territoires à risque érosion pour hiérarchiser l'action publique » :

Trois actions visent une meilleure connaissance de l'aléa :

- une des actions les plus avancées est la définition d'un indicateur national de l'érosion côtière, qui permet la réalisation d'une cartographie historique de l'évolution du trait de côte. Cette action pilotée par le CEREMA doit aboutir ensuite à l'identification par les collectivités territoriales des secteurs littoraux vulnérables à l'érosion et à leur hiérarchisation ;
- une action importante et de longue haleine est l'actualisation des catalogues sédimentologiques édités dans les années 1980 en élargissant cette cartographie raisonnée sur la dynamique littorale sur les territoires outre-mer et en enrichissant les indicateurs aux nouvelles données disponibles pour caractériser l'évolution du trait de côte. Cette action, qui est également menée par le CEREMA à l'horizon fin 2015, fait appel aux contributions d'experts multiples, en particulier du BRGM et des universités ;
- enfin, il s'agit de créer à l'échelle nationale un réseau des observatoires actifs sur le littoral, pour le suivi de l'évolution du trait de côte et l'actualisation éventuelle des données nationales comme la cartographie citée ci-dessus, en s'appuyant sur les acteurs locaux. Le BRGM, missionné sur cette action, a pu mettre en exergue les différentes modalités de création de ce réseau et ses difficultés.

Le deuxième axe (B) s'attache à l'élaboration de stratégies locales de gestion intégrée du trait de côte partagées entre l'État, les collectivités territoriales et les acteurs privés, avec, entre autres, les orientations suivantes :

- dans les territoires sensibles à l'érosion littorale, il s'agit de favoriser la mise en place de stratégies ou projets de gestion et d'aménagement, avec l'adoption de mesures cohérentes d'urbanisme, de préservation du fonctionnement écosystémique et de prévention des risques ;
- dans l'ensemble des territoires littoraux, il s'agit d'appuyer une meilleure utilisation des outils d'urbanisme et de prévention des risques : prise en compte

1. Accès en ligne au livret de la Stratégie datée de mars 2012 http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/12004_Strategie-gestion-trait-de-cote-2012_DEF_18-06-12_light.pdf

explicite dans les plans locaux d'urbanisme (PLU) et les schémas de cohérence territoriale (Scot) du phénomène d'érosion littorale.

Le troisième axe (C) souhaite favoriser la relocalisation des activités et des biens, et des usages situés dans des territoires soumis à de forts aléas naturels, tout en maintenant le dynamisme des territoires. L'action 7 de cet axe vise à préparer la mise en œuvre de cette option de relocalisation dans une dynamique de recomposition spatiale territoriale. La relocalisation est avant tout une action d'anticipation (anciennement dénommée « repli » ou « recul stratégique »). Il est à noter que ce principe, qui souhaite un changement de paradigme du rapport de l'homme avec la nature, forme le sous-titre de la Stratégie nationale de la gestion intégrée du trait de côte qui s'intitule « Vers une relocalisation ».

Le quatrième axe (D) a pour objectif de préciser les principes de financement pour la gestion du trait de côte, en identifiant ce qui est du ressort de l'État et des collectivités locales.

Vers une relocalisation

L'axe C, action 7, concerne le lancement d'un appel à projets pour expérimenter la relocalisation sur les territoires.

L'objectif pour l'État est d'encourager la mise en œuvre de démarches pilotes, expérimentales et innovantes, concertées et partagées, dans une approche globale de recomposition territoriale, en accompagnant les acteurs locaux.

La relocalisation doit être vue comme une solution alternative aux options traditionnelles de fixation du trait de côte et de « défense côtière et de lutte contre la mer », impliquant nécessairement l'artificialisation du trait de côte, la coupure des échanges terre-mer et de fortes dépenses sur des opérations parfois peu pérennes.

Il s'agit d'inciter les collectivités à anticiper le recul du trait de côte en fonction des enjeux territoriaux présents et à préparer, en amont de toute opération de gestion, un projet global d'aménagement du territoire intégrant l'évolution du littoral à long terme. Il importe de limiter au mieux la vulnérabilité aux risques littoraux, l'érosion littorale étant souvent conjointe aux autres risques inondations, comme la submersion, mais aussi le risque cyclonique et les tsunamis.

L'enjeu au niveau national est de capitaliser les expériences par la rédaction d'un cahier des enseignements qui fera état du bilan des démarches, de leurs difficultés, de leurs atouts et mettra en exergue diverses méthodes à valoriser en lien avec les porteurs de projets qui sont au nombre de cinq.

Il faudra ensuite promouvoir au niveau national les pratiques exemplaires issues des démarches expérimentales, de proposer des recommandations et des méthodologies de projets pour les collectivités devant s'engager dans une démarche de

relocalisation, et d'améliorer les méthodes et les pratiques, voire de faire évoluer si nécessaire les doctrines.

L'objectif est de nourrir véritablement la feuille de route qui engage l'État, les collectivités territoriales et l'ensemble des parties prenantes à mieux prendre en compte l'érosion littorale dans les politiques publiques d'aménagement durable en métropole comme en outre-mer.

Les expérimentations de « relocalisation » font aussi l'objet d'un suivi par le comité national de suivi de la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, coprésidé par deux députées, Chantal Berthelot, députée de la deuxième circonscription de la Guyane, et Pascale Got, députée de la cinquième circonscription de la Gironde.

Section 5

Expérimentations de la relocalisation des activités et des biens, vers une recomposition spatiale des territoires menacés par les risques littoraux

Mireille Guignard, MEDDE/DGALN

Dans le cadre de l'appel à projet programmé par la Stratégie nationale décrite précédemment, cinq expérimentations ont été retenues par le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie sur l'avis d'un jury pluridisciplinaire qui s'est réuni fin novembre 2012. Celles-ci sont réparties sur l'ensemble des façades maritimes de métropole et d'outre-mer, représentatifs de différentes morphologies de littoral (dunaire, sableuse, rocheuse, à falaise) et de typologies d'enjeux variées. Ces démarches pilotes se font à droit constant avec le soutien des services locaux de l'État, du ministère accompagné d'experts et de conseils nationaux, pour une durée de deux années.

Le séminaire national de lancement des cinq expérimentations a eu lieu le 14 février 2013; dans le cadre d'ateliers qui se sont tenus le 19 mai 2014, le séminaire national à mi-parcours a pu faire le bilan des avancées des porteurs de projet et permis d'exposer leurs atouts et leurs difficultés. La plupart des expérimentations ont encore du chemin à parcourir et auront à poursuivre les études, à construire des faisabilités concertées et à mettre en œuvre opérationnellement un scénario stratégique qui reste encore à choisir et à évaluer.

Sur la base des enseignements de ces projets, un guide national sera élaboré proposant des éléments méthodologiques et de doctrine concernant la mise en œuvre de la relocalisation des activités et des biens.

Si l'expérimentation se fait à droit constant, les pistes de recherche et l'analyse des difficultés sont là pour favoriser et inciter à la mise en œuvre de stratégies locales fondées sur l'anticipation de l'évolution future du trait de côte. Les

enseignements de l'appel à projets, qui est en cours d'analyse, sont pluriels. Ils suscitent dès aujourd'hui des réflexions tant sur le contenu et la méthodologie des projets que sur leur pilotage et la coconstruction de la démarche avec l'ensemble des acteurs concernés par la relation terre-mer et l'aménagement du littoral. Ils se précisent sur diverses thématiques comme l'amélioration de la vision de projet à partager avec l'ensemble des acteurs locaux, les opportunités pour réinventer un modèle économique et spatial littoral, mais aussi les réflexions sur l'amélioration ou l'évolution des outils réglementaires, concernant la valeur des biens impactés par l'érosion, la propriété et la maîtrise de l'occupation du sol par la collectivité, l'instauration possible d'un système d'autorisation d'occupation temporaire, la notion de phasage temporel lié au recul de la côte, les pistes de financement de ces opérations ou études.

Bien qu'il s'agisse de sites tests, les caractéristiques originales géographiques et structurelles des territoires engagés n'entravent en rien la généralité des problématiques qui ont émergé et auxquelles se confrontent de manière inégale, mais sûrement, les cinq expérimentations.

L'acceptabilité du phénomène constitue tout d'abord une première étape difficile à franchir, tant sur la représentation spatiale du risque sur le terrain que sur le partage du diagnostic entre acteurs, en particulier les habitants. La transformation de la propriété privée, sa probable acquisition par la collectivité et sa valeur vénale sont sans doute les principaux obstacles à cette recomposition territoriale souhaitée qui demande une grande volonté politique. Comment mesurer spatialement et temporellement le phénomène d'érosion littorale ? Comment anticiper le recul et projeter la vision des territoires dans le lointain pour mieux agir aujourd'hui et ainsi mieux anticiper le futur ? En élaborant cette vision globale du territoire littoral impacté et de celui impliqué dans les décisions, le déroulement des démarches montre à quel point il est difficile de travailler en synergie et en transversalité disciplinaire. Il est nécessaire d'intégrer tous les enjeux, qu'ils soient économiques, sociologiques, urbains, naturels ou culturels, autant qu'il est nécessaire de prendre les bonnes échelles de projet, d'étude et de gouvernance. Cependant, la synergie est sûrement à trouver localement. Les recettes toutes faites ne pourront pas grand-chose à la mise en composition des énergies locales à fédérer.

Dans cette logique, il s'agit d'assurer l'interface et la cohérence avec l'ensemble des projets en cours ou à venir, sur le site de projet et sur les territoires limitrophes, de pérenniser la démarche et de trouver les moyens opérationnels de sa mise en œuvre. Enfin, sur l'ensemble de ces axes, pour une meilleure gouvernance du projet et un meilleur portage politique, la question cruciale est de savoir comment associer l'ensemble des acteurs et des partenaires concernés ? Quelles méthodes pour instituer une démocratie participative, une bonne concertation et sensibilisation ?

À cette heure, les expérimentations sont encore en cours, et les enseignements qui émergent ou les principes de méthodes qu'élaborent les porteurs alimentent pleinement les débats au sein des ateliers de travail du comité national de suivi

de la stratégie nationale, installé depuis janvier 2015. Celui-ci considère que cet appel à projets est très révélateur et qu'il fait partie intégrante des axes prioritaires à mettre en œuvre pour la fin 2015.

Présentation des sites en expérimentation

Le site de la plaine du Ceinturon porté par la ville de Hyères dans le département du Var

Le site de Hyères comprend la plaine côtière du Ceinturon entre la ville ancienne perchée sur le coteau et le littoral Est de la rade d'Hyères, vis-à-vis de la presqu'île de Giens. La plaine du Ceinturon au milieu de ce site emblématique comporte différentes entités à enjeux de développement durable importants et un littoral riche et diversifié aux potentialités exceptionnelles : marais salants, espaces protégés du Conservatoire du littoral, parc national marin, et opérations « Grands Sites¹ » en cours, avec la présence de l'aéroport civil et militaire, de lotissements et de stations balnéaires, de zones d'activités, de cultures agricoles et d'un port de plaisance, etc. La route en front de mer est aujourd'hui enrochée en raison de l'érosion littorale forte dans le secteur. La plaine maritime est aussi soumise à la submersion, avec une concomitance inondation par la présence de nombreux fleuves côtiers, ce qui a amené la ville de Hyères à mener une réflexion pour le recul éventuel de cette route et de s'inscrire dans la démarche de relocalisation. Il s'agit d'envisager la stratégie à l'échelle de la plaine du Ceinturon et de son contexte paysager et urbain dans son entier avec l'immense opportunité de sa requalification spatiale et d'améliorer les liens entre la ville et la mer.

Le site de Vias porté par les communes de Vias, Portiragnes, et la communauté d'agglomération Hérault-Méditerranée

Le site de Vias à l'ouest du Cap d'Agde se situe entre deux stations balnéaires littorales de l'Hérault (Vias et Portiragnes). Le site est occupé par de l'habitat en majorité précaire issu du « durcissement de la cabanisation » phénomène récurrent du littoral languedocien (environ 3 000 parcelles dont 100 à 150 familles de façon permanente), et 14 campings (3 350 places, représentant 50 emplois avec 196 emplois saisonniers). Le site est soumis à des aléas importants d'érosion (de 1 à 3 m/an), de submersion et d'inondation (territoire à risque inondation [TRI] Béziers-Agde). La démarche s'inscrit dans un important programme de gestion raisonnée du littoral engagé depuis 2005 dans un contrat plan État-Région, qui a inscrit pour ce site l'objectif de la reconstitution du cordon dunaire et la valorisation du littoral. Le projet de co-construction de relocalisation des biens et des personnes mené par les porteurs avec leur bureau d'étude est souhaité participatif et itératif. Il engage également un soutien actif des services de l'État.

1. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-Operations-Grands-Sites.html>

Trois « sites-ateliers » portés par le GIP Aquitaine avec les communes de Lacanau, la Teste-de-Buch et Labenne

Le GIP Aquitaine avec les communes correspondantes présente trois sites-ateliers, qui font chacun partie intégrante de la stratégie régionale de gestion de la bande côtière actuellement mise en œuvre sur l'ensemble du littoral sableux aquitain. Ce littoral caractéristique, constitué de dunes et planté de forêts protégées de pins destinées à fixer le trait de côte, a fait l'objet d'un aménagement spécifique de la MIACA (Mission d'aménagement de la côte aquitaine) dans les années 1970-1980. Par cette politique pilotée par l'État, le littoral s'est équipé de façon à accueillir le tourisme de masse estival : « plans plage », stations balnéaires et autres infrastructures raisonnées ponctuant le trait de côte. Aujourd'hui, le littoral sableux connaît un fort aléa d'érosion marine, impliquant un recul moyen de 20 à 70 cm par an.

La station balnéaire de Lacanau est le site le plus important. La station balnéaire « Lacanau-Océan » naît à la fin du XIX^e siècle. Elle s'est développée considérablement dans les années 1960-1970 par un front de mer d'immeubles collectifs, lotissements, golf et parking en front de mer. Le porteur du projet souhaite proposer une stratégie locale adaptée afin d'anticiper le recul de la côte dont la vitesse mesurée est en moyenne de 1 à 3 m par an.

Le deuxième site se préoccupe des campings situés au pied de la dune du Pyla, site classé, sur la commune de la Teste-de-Buch. Huit campings sont concernés par l'ensablement dû au recul de la dune. Le troisième à Labenne fait état des difficultés de l'érosion des « plans plage » qui forment les points d'accès au littoral et à la plage pour les territoires situés en limite ou à l'arrière.

Les sites de Bovis et de Pointe-à-Bacchus portés par la communauté d'agglomération Nord Basse Terre et la ville de Petit-Bourg en Guadeloupe, assistés par l'agence des 50 pas géométriques

Le littoral de cette commune, située sur la côte Est de la Guadeloupe, est constitué de petites falaises instables soumises à une érosion littorale et à des risques de mouvements de terrain. Intégrant la bande des 50 pas, le territoire en question est occupé par de nombreuses habitations individuelles souvent précaires et sans titre. Il est à remettre dans le contexte difficile de la gestion de cette frange littorale et dans celui – plus global – socio-économique du littoral guadeloupéen. Il s'agit d'évaluer les solutions pour ces habitants dont certains sont dans une situation d'urgence. Envisageant le relogement et le développement, un projet d'éco-quartier devrait amorcer la dynamique de projet. Cette synergie territoriale pourra également s'appuyer sur les diverses démarches en cours ou à venir : investissements économiques, projets de valorisation du front de mer, de renouvellement du tissu urbain du centre-ville soumis à la submersion cyclonique, de la construction d'un port de plaisance et d'échange, de la qualification d'une promenade littorale avec la renaturation des espaces libérés. La cohérence de cet ensemble de démarches sera confortée par l'élaboration des documents d'urbanisme et

de planification, PLU et PRU (projet de renouvellement urbain), qui pourront donc appuyer la démarche expérimentale.

Le site d'Ault porté par la commune et le syndicat mixte baie de Somme-Grand littoral picard

La commune d'Ault, d'environ 1 700 habitants, se situe sur le littoral de la Manche, en Région Picardie, entre Mers-les-Bains/Le Tréport au sud et Cayeux au nord, à 30 km d'Abbeville. Le bourg s'est développé dans une vailleuse² des hautes falaises crayeuses en continuité du pays de Caux normand, plateau à dominante agricole qui reste peu habité et d'une grande diversité paysagère. Le bourg est le dernier sur ces hautes falaises à l'intersection de la baie de Somme, polder qui bénéficie d'une opération « Grand Site », constitué d'emprises humides emblématiques comme le secteur des *bas champs* protégé des assauts de la mer par un cordon de galets. Bourg ancien, attesté au Moyen Âge, plusieurs fois englouti par la mer, il connaît un développement important avec le tourisme balnéaire au XIX^e siècle. Le patrimoine architectural en atteste aujourd'hui l'importance. La falaise subit une érosion forte (un recul de 30 à 70 cm en moyenne par an) aggravée par la disparition progressive du cordon de galet qui en protégeait le pied et par les dysfonctionnements des réseaux d'assainissement urbains qui aggravent considérablement le phénomène. Depuis plusieurs décennies, épis, contreforts, casquette en béton et multiples ouvrages ont tenté de protéger Ault et de minimiser les risques d'éboulements. Des terrains libres (ZAC du Moulinet) en centre bourg pourront amorcer la démarche en synergie avec l'ensemble des autres projets en cours, plan d'action de prévention des inondations (PAPI) littoral, schéma de cohérence territoriale (Scot), plan local d'urbanisme (PLU), opérations « Grand Site », etc. Le syndicat mixte, qui couvre 18 communes du littoral, appuie la commune et assure les compétences pluridisciplinaires et le portage de ces multiples projets aux côtés des collectivités.

2. Dénomination normande et picarde de l'affaissement de falaises de craie ouvert vers la mer.

Les connaissances scientifiques, aujourd'hui et demain



Amélie Roche, CEREMA
Stéphane Costa, université de Caen Basse-Normandie

Les verrous de la compréhension actuelle des phénomènes passés

Évaluer l'impact du changement climatique sur l'évolution future du littoral nécessite d'abord de bien comprendre et d'analyser les évolutions passées, en identifiant notamment la part respective des évolutions naturelles et celle des effets anthropiques. Quelques-unes des questions scientifiques les plus ouvertes sur ce sujet sont présentées ci-dessous.

Comprendre l'évolution passée du trait de côte

L'évolution du trait de côte est aujourd'hui suivie précisément et fréquemment en France sur de nombreux secteurs, de métropole ou ultramarins, notamment depuis l'avènement de techniques utilisant le positionnement par satellites. Ces suivis permettent aux scientifiques de mesurer des évolutions métriques à centimétriques sur une période très récente débutant dans les années 1980. Malheureusement, ces mesures ne bénéficient pas toujours de standards d'acquisition et de protocoles communs permettant de comparer les évolutions d'un secteur à un autre. Par ailleurs, elles sont trop récentes pour pouvoir identifier des tendances évolutives fortes et à long terme du littoral.

Pour retracer des évolutions sur de plus longues périodes, il est nécessaire de recourir à des méthodes d'observation indirectes, telles que la photo-interprétation, ou l'analyse de cartes anciennes (exemples : cartes d'état-major ou de Cassini), permettant respectivement de quantifier des évolutions couvrant le dernier siècle ou d'obtenir des analyses qualitatives de l'évolution morphologique depuis le ^{xix}^e voire le ^{xviii}^e siècle. Ces informations sont nécessaires pour établir un lien entre la

modification de la ligne de rivage et le changement climatique. Malheureusement, elles affichent des marges d'erreur importantes, de plusieurs mètres parfois, les rendant peu exploitables lorsque l'évolution est faible.

Appréhender les rythmes d'évolution du littoral

Pour évaluer une éventuelle accélération des dynamiques côtières, il est nécessaire de préciser les facteurs et les temporalités d'évolution du littoral. En effet, le fonctionnement des côtes est fondamentalement non linéaire dans le temps et l'espace, principalement pour les deux raisons suivantes :

- la variabilité de l'efficacité des phénomènes atmosphériques et océaniques responsables de l'évolution du trait de côte (fréquence et intensité des forçages météo-marins, tels que les tempêtes et les vagues, eux-mêmes variables dans le temps et l'espace);
- la vitesse et le rythme des ajustements, d'une part entre les formes littorales (barres de déferlement, platiers, dunes, etc.) et les processus météo-marins et, d'autre part, entre les formes elles-mêmes, le tout étant différent pour chaque type de côte.

Très peu d'études disposent d'un échantillon suffisant de données fiables et homogènes et sur une période assez longue, typiquement sur plusieurs décennies, sur les relations entre les formes et les processus, ce qui ne permet pas de conclure sur une éventuelle accélération des phénomènes à l'échelle du siècle passé. De même, il est encore difficile de modéliser fidèlement ces vitesses et rythmes d'évolution. La capacité de résilience de certaines de ces formes est un domaine méconnu.

Les modèles hydrosédimentaires actuels représentent relativement bien les phénomènes érosifs tels que les effets cumulatifs des tempêtes (plusieurs coups de vent successifs peuvent être plus durablement dommageables qu'une tempête majeure isolée), mais restituent encore mal les processus de reconstruction, les transferts d'échelles ou l'ensemble des combinaisons et des relais de processus responsables du fonctionnement saccadé des littoraux (système complexe).

Restituer toute la complexité du système littoral

Les analyses actuelles résument souvent le littoral à une évolution planimétrique du trait de côte. Cette notion, souvent décriée, ne renseigne pas sur l'évolution des plages et des petits fonds qui peuvent connaître des changements momentanément déconnectés de la position du rivage. Pourtant, c'est bien l'évolution du prisme sédimentaire (volumes sédimentaires aériens et sous-marins) en relation avec les forçages atmosphériques et hydrodynamiques qui doit être analysée. Au regard du manque de connaissances fiables sur les processus et leurs interactions, les impacts d'un changement climatique et d'une élévation du niveau moyen des mers sur ces phénomènes sont encore du domaine de la recherche et demeurent source de nombreuses interrogations.

Par ailleurs, la contribution des habitats naturels à la résilience des systèmes côtiers est aujourd'hui reconnue tout en étant, elle aussi, difficilement quantifiable. Il existe notamment une certaine méconnaissance des éléments suivants :

- la contribution de la production biodétritique (sédiments produits par les organismes vivants) dans le volume sédimentaire des plages ;
- les services rendus par les cordons littoraux, les mangroves et autres récifs coralliens sur la protection contre l'érosion côtière ;
- les impacts de l'acidification des océans sur ces coraux et autres sédiments calcaires ;
- l'influence de la modification des conditions de salinité, de pH et de température sur les écosystèmes tels que les herbiers de posidonie en Méditerranée, dont l'action préventive contre l'érosion des petits fonds est connue.

Distinguer la part d'impact anthropique des évolutions naturelles

Au niveau de chaque cellule hydrosédimentaire¹, un budget sédimentaire peut être établi en tenant compte des apports de sédiments (par érosion littorale ou des bassins versants ou production marine) et des pertes momentanées ou définitives (au large, dans les estuaires ou par extractions). Alors que quelques programmes de recherche existent, la quantification des entrées et sorties sédimentaires des systèmes littoraux reste largement méconnue du fait de la quasi-absence de mesure de ces paramètres aussi bien à la côte que dans les bassins versants. De même que les interrelations entre les formes et processus, et entre les divers segments de plages, le sens, l'intensité et les volumes des transferts sédimentaires sont mal connus. Les stocks sédimentaires actuels proviennent majoritairement de l'héritage de la dernière grande remontée du niveau marin (transgression marine de plus de 100 m) au cours des dix derniers milliers d'années (Holocène). Lors de la transgression, la mer a poussé devant elle un grand volume de sédiments qui se trouvait sur les espaces aujourd'hui submergés. Ces matériaux, issus de l'érosion continentale sous l'influence d'un climat froid, ont été déposés au niveau du littoral actuel il y a 5 000 à 6 000 ans.

Cependant, les fortes influences de l'anthropisation (extractions, ruptures des échanges sédimentaires) sur ces stocks modifient à la fois les volumes en transit et les évolutions résultantes sur le prisme sédimentaire, ce qui limite sérieusement la capacité des chercheurs à faire la part entre évolutions naturelles et impacts anthropiques pour les évolutions récentes. L'intégration de l'historique des stratégies d'aménagement passées est donc nécessaire pour comprendre l'évolution actuelle du littoral.

1. Une cellule hydrosédimentaire est une section du littoral où le mouvement des sédiments (sable et galets) s'effectue principalement au sein de cette section.

Les difficultés à comprendre et à projeter les évolutions futures

L'érosion côtière n'est pas un phénomène généralisable. Elle dépend des capacités intrinsèques d'adaptation de chaque milieu. Or au-delà d'un certain seuil, bientôt ou déjà atteint, les évolutions et adaptations passées du milieu ne seront plus représentatives des évolutions futures. L'érosion côtière ne se traduira donc pas par la simple transposition linéaire des tendances d'évolution passées, mais sera la résultante d'un nouveau rapport de force entre des flux d'énergie et de sédiments, dans une période dite de pénurie sédimentaire.

Envisager des changements de tendance

Par un simple effet mécanique d'augmentation du niveau marin moyen, sans tenir compte d'une éventuelle augmentation de l'intensité ou de la fréquence des tempêtes, les sollicitations hydrauliques à la côte par les vagues pourront être amplifiées. Par ailleurs, les évolutions possibles du régime de tempêtes et des hausses de pression atmosphérique (présentées au chapitre 1) entraîneront probablement une modification sensible des surcotes et de l'orientation des vagues à la côte qui pourraient atteindre des secteurs jusque-là abrités. Les échanges sédimentaires résultants pourraient en être modifiés tant en intensité qu'en direction.

Il est très difficile de prévoir la réponse des systèmes littoraux actuels aux changements globaux, particulièrement si ces modifications sont fortes et rapides par rapport à leur capacité d'adaptation. En raison des redistributions des stocks sédimentaires actuellement actifs ou qui le deviendraient, il est impossible de garantir que les zones actuellement en érosion ou en sédimentation naturelle (les baies et estuariens) le seront toujours dans un siècle. Dans les zones estuariennes, l'évolution des débits liquides et solides des fleuves sera tout aussi importante.

Réfléchir à de nouveaux modes d'adaptation

Au-delà de l'adaptation des écosystèmes dont la réponse aux changements globaux n'est pas connue, les possibilités d'adaptation des ouvrages de protection existants semblent réduites, en supposant le souhait d'un coût soutenable pour les sociétés et d'un niveau de sécurité garanti et durable (projet « Sao Polo² »).

En effet, l'augmentation probable des sollicitations aux ouvrages par augmentation du niveau marin entraînera :

- si rien n'est réalisé, *a minima*, un surcoût aux travaux d'entretien en même temps qu'une perte de niveau de protection ;

2. « Sao Polo » : Stratégies d'adaptation des ouvrages de protection marine ou des modes d'occupation du littoral vis-à-vis de la montée du niveau des mers et des océans (Programme GICC 2008).

- si la société souhaite assurer la sécurité des populations à un niveau de protection équivalent à l'actuel, un redimensionnement des ouvrages, plus hauts et plus larges (emprise au sol), qui représente un coût d'investissement important, mais aussi un coût d'entretien plus important, en relation avec la taille des ouvrages ;
- dans une perspective temporelle au-delà du siècle à venir, une impossibilité de garantir que ces ouvrages assureront une protection pérenne et fiable.

Nos moyens d'action et nos modes de penser l'aménagement du territoire sont donc largement questionnés : il est absolument nécessaire de prendre en compte dès à présent l'ensemble des options d'aménagement disponibles. Des attentes fortes sont exprimées par la population et les décideurs pour obtenir un meilleur accès vulgarisé aux connaissances scientifiques et une sensibilisation accrue aux changements à venir, comme cela sera développé plus tard dans la présentation du projet européen « Littoraux et Changements côtiers – *Living with a Changing Coast* » (LiCCo).

Exemples d'évolution des côtes françaises métropolitaines

La diversité géomorphologique des côtes françaises et leur exposition différente aux facteurs atmosphériques et hydrodynamiques, par façade, mais aussi localement, illustrent la difficulté à laquelle sont confrontés les scientifiques pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'évolution des littoraux.

Les plages de poche de Méditerranée (Brunel et Sabatier, 2009)

Entre la Camargue et la Provence, de nombreuses plages connaissent actuellement une période d'érosion, allant de 10 à 30 cm/an pour certaines plages de poche à près de 10 m/an pour les plages du delta du Rhône (avant la construction d'ouvrages côtiers). Des calculs théoriques indiqueraient que le recul du rivage lié à la seule remontée du niveau marin (enregistrée par les marégraphes d'Endoume-Marseille et du Grau de la Dent – Camargue) n'expliquerait que 8 % du recul des plages de Camargue (côtes ouvertes à la houle), mais près de 60 % de celle des plages de poche, au caractère abrité (Brunel et Sabatier, 2009).

Ces résultats soulignent le rôle prépondérant des courants de houle sur celui du niveau de la mer dans le façonnement du rivage de Camargue, contrairement aux plages de poche, dont un exemple est illustré par la figure C13. Sur la base des vitesses passées du recul du rivage et des prévisions de l'élévation du niveau de la mer, 90 % des 23 plages de poche de Provence étudiées devraient perdre 75 % de leur surface actuelle d'ici à 2100, alors que les plages de Camargue disposeraient d'un espace de recul important grâce aux lagunes en arrière des cordons dunaires, ce qui leur permettrait de s'adapter et de mieux résister à la remontée du niveau de la mer.



Figure C13 – La plage de l’Estagnol (83), un exemple de plage de poche

Source : François Sabatier.

Les falaises crayeuses haut-normandes (Costa, 2004 et Letortu, 2013)

Une grande majorité de travaux indique que les vitesses de recul des falaises devraient s'accroître avec une élévation du niveau de la mer. Toutefois, la difficulté de déterminer – encore aujourd'hui – l'efficacité respective des divers processus marins et continentaux qui se combinent et se relaient pour aboutir au recul des falaises conduit à manier les résultats proposés avec beaucoup de prudence. À titre d'exemple, et pour montrer la difficulté des quantifications prospectives, dans le nord-ouest de la France, le réchauffement climatique devrait s'accompagner d'une réduction du nombre de jours de gel, limitant les effets de ce paramètre important dans l'érosion des falaises calcaires et crayeuses. En revanche, les pluies, probablement plus abondantes, pourraient favoriser le déclenchement d'effondrements ou de glissements sur les falaises constituées de matériaux peu résistants ou meubles. Or, le retrait accéléré des falaises peut produire plus de débris susceptibles de protéger le pied des abrupts des actions marines. Sur les côtes crayeuses haut-normandes, des mesures précises de recul ont été réalisées sur des sites dont le stock sédimentaire en pied était perturbé par un ouvrage perpendiculaire (épave, jetée) ou un effondrement majeur de falaise. Ainsi, à quelques centaines de mètres de distance, et pour des caractéristiques géologiques et climatiques équivalentes, ont été quantifiées les vitesses de recul des falaises dont la base était soit partiellement protégée par un cordon de galets (en amont de l'ouvrage ou de l'effondrement, situation dite actuelle), soit en était dénuée (en aval de l'ouvrage), comme à Criel-sur-Mer dont la falaise est présentée sur la figure C14. Dans cette seconde configuration, considérée comme étant la situation future lors d'une hausse du niveau marin, la falaise est plus fortement battue par la mer. Les vitesses de recul de ces falaises exposées sont 2 à 3 fois supérieures à celles des abrupts plus faiblement battus.



Figure C14 – Impact d’un épi entraînant d’un côté une accumulation limitant l’action marine au pied des falaises et de l’autre l’accentuant

Source : Stéphane Costa.

Programme de recherche Liteau

La complexité des phénomènes qui régissent l’évolution des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du littoral suscite de nombreuses questions scientifiques dont la réponse nécessite la mise en œuvre de programmes de recherche. Ainsi, le programme français Liteau, piloté par le service de la recherche du ministère chargé du Développement durable, a pour ambition de produire des connaissances, des démarches et des outils utiles à la conception et à la mise en œuvre d’une gestion durable et intégrée des littoraux et des espaces marins. Il a, depuis 1998, permis de soutenir près de 80 projets de recherche, qui associent étroitement chercheurs et acteurs de la mer et du littoral.

Dans une publication récente³, le CGDD met l’accent sur 18 projets du programme Liteau conduits entre 2004 et 2012, en présentant les principaux résultats, articulés autour de trois thématiques : l’évaluation de l’état des écosystèmes aquatiques littoraux et leur restauration, la caractérisation et la gestion des risques côtiers, et la gestion intégrée de la mer et du littoral. La publication illustre la diversité des thématiques traitées et des approches mobilisées par le programme Liteau, et elle identifie, avec quelques années de recul, les trajectoires de progrès qui se dessinent au travers des différents projets. Les lecteurs pourront ainsi apprécier, au

3. <http://www1.liteau.net/index.php/publications/apports-du-programme-liteau-a-la-gestion-durable-de-la-mer-et-du-littoral-projets-de-recherche-20042012>

travers d'exemples concrets, les apports possibles pour l'action publique des recherches financées dans le cadre de ce programme.

Deux autres projets du programme Liteau se terminent. Ils traitent de nombreux aspects développés dans le présent rapport : le projet Solter sur les solidarités territoriales et les stratégies pour la résilience du littoral à la submersion marine ; le projet Blinis sur l'enregistrement sédimentaire par les barrières littorales des niveaux marins extrêmes du Petit Âge glaciaire à nos jours, en tant qu'aide à l'évaluation de la vulnérabilité des zones côtières.

Dispositif instrumental embarqué mis en œuvre pour dresser la bathymétrie et la topographie le long du littoral national

Alexandre Pauthonnier, IGN

Yves-Marie Tanguy, SHOM

Comme cela a été indiqué précédemment, une connaissance précise de l'altitude des sols et de la profondeur de la mer de part et d'autre du trait de côte est essentielle pour comprendre les processus qui gouvernent l'évolution de celui-ci. C'est un des enjeux de la production du référentiel altimétrique terre-mer Litto3D®. Pour cela, l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) et le Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM) utilisent la technologie du lidar aéroporté pour mesurer en trois dimensions (3D) le littoral national.

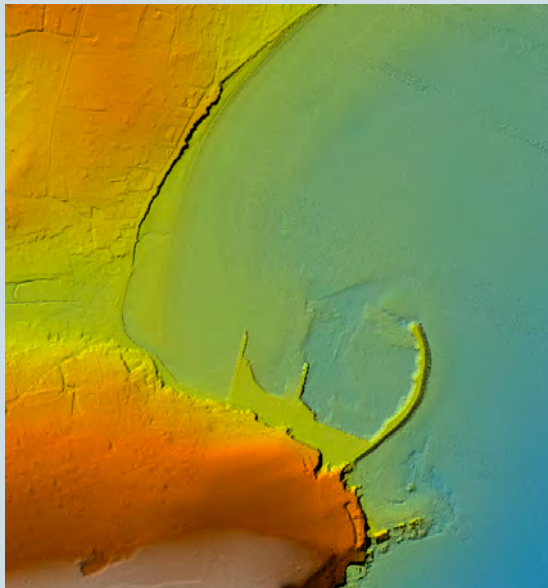


Figure C15 – Extrait du MNT Litto3D – Anse de Morgat (Finistère)

Source : IGN.

Principes généraux d'un levé lidar

Le lidar (*Light Detection and Ranging*) est un système de télédétection utilisant les rayons lumineux produits par un laser. Pour les zones émergées, on utilise un lidar topographique émettant une lumière dans le spectre proche infrarouge pour mesurer l'altitude du sol avec une précision de l'ordre de 20 cm ; pour les zones immergées, on utilise un lidar bathymétrique qui émet une lumière dans le spectre visible pour mesurer la profondeur de l'eau. La précision de la mesure bathymétrique est aujourd'hui meilleure que 50 cm.

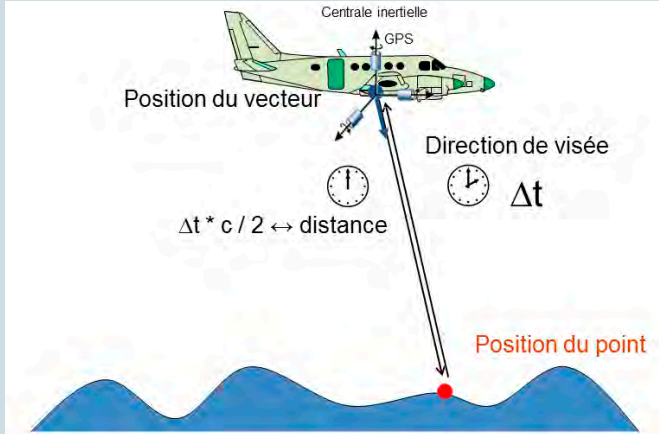


Figure C16 – Principe du levé lidar

Source : IGN.

L'onde émise par le laser peut être réfléchiée par un obstacle avant d'atteindre la surface à mesurer : c'est le cas notamment lorsqu'il y a de la végétation. Selon que cet obstacle fait plus ou moins écran, cette onde est partiellement ou totalement réfléchiée. Dans le cas d'une réflexion partielle, l'onde poursuit son chemin vers le sol. C'est la mesure du temps aller-retour de l'onde qui va permettre d'évaluer la distance séparant l'avion du sol.

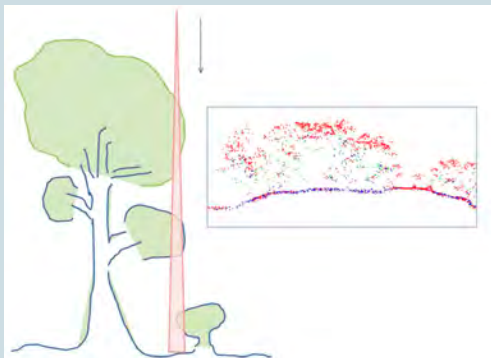


Figure C17 – Principe du levé multi-échos

Source : IGN.

Pour convertir ces mesures de distance en mesures très précises et géoréférencées de l'altitude des zones émergées et de la profondeur du fond marin, il faut connaître à tout moment la position de l'avion ainsi que l'angle de visée sous lequel est vu le sol ; ces informations sont systématiquement post-traitées après chaque campagne de mesures de l'avion instrumenté. Afin de lever des surfaces assez étendues, le lidar est équipé d'un miroir oscillant permettant de dévier le rayon laser de part et d'autre de la trace de l'avion. Pour un axe de vol donné, le lidar peut ainsi acquérir de l'information dans une bande de terrain plus ou moins large selon la hauteur de vol et l'angle d'ouverture.

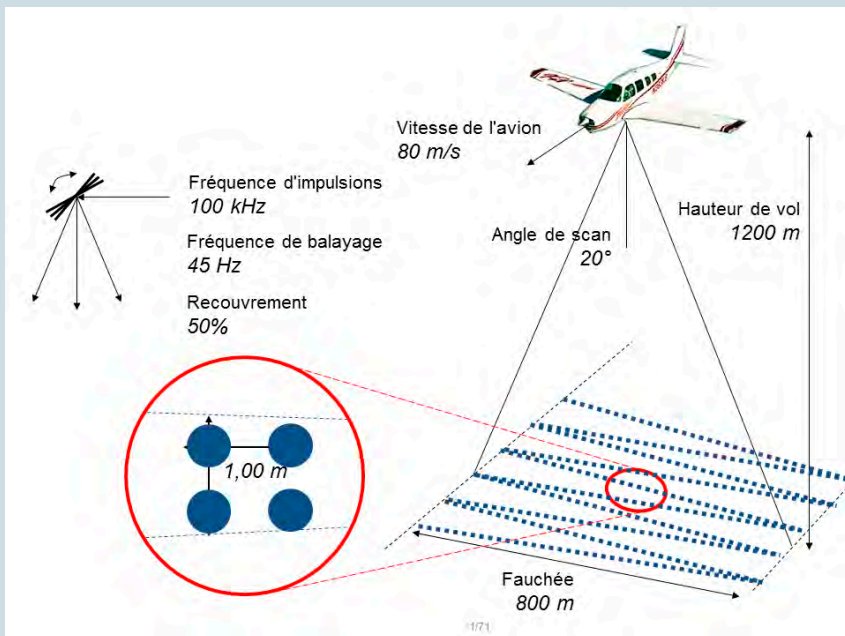


Figure C18 – Configuration type pour une acquisition lidar

Source : IGN.

Si le résultat du levé lidar a la forme d'un nuage de points, chaque mesure se rapporte en fait à une surface. En effet, le faisceau laser impacte non pas un point, mais une tâche au sol ; l'écho détecté par le lidar intègre donc l'ensemble des retours pour cette empreinte surfacique, limitant de fait la précision du levé. Pour une hauteur de vol de 1000 m, la tâche au sol est de 30 à 80 cm selon l'instrument.

La précision altimétrique de la mesure lidar dépend en premier lieu de la précision du système de géoréférencement (GPS et centrale inertielle). Puis elle dépend de l'altitude de vol. Sur sol nu, dur, découvert et plat, la précision altimétrique est maximale, atteignant 15 cm. Sur un terrain

présentant de fortes variations de pente, la précision altimétrique est légèrement dégradée. Sur un terrain naturel, l'irrégularité du sol entraîne également une légère dégradation de la précision (20 cm). C'est également le cas sous couvert végétal, avec notamment la difficulté à différencier le sous-étage bas du sol lorsque la végétation est très dense.

Pour sa campagne d'acquisition sur le littoral, l'IGN a réalisé des acquisitions à raison de deux points de mesure par mètre carré et de précision 15 cm. Le levé topographique a été réalisé à marée basse de façon à lever la plus grande partie de l'estran et en hiver afin de maximiser la pénétration du signal lidar à travers les arbres et arbustes.

Pour le lidar bathymétrique, plusieurs phénomènes optiques complexifient le parcours du rayon laser :

- à l'interface air-mer et en l'absence de vagues déferlantes (eaux blanches qui bloquent le passage de la lumière), le signal lumineux va subir une réflexion et une transmission ;

- la vitesse de la lumière dans l'eau étant inférieure à celle de la vitesse dans l'air, le phénomène de réfraction va redresser verticalement les rayons lumineux. Outre la facilité et la vitesse des levés aéroportés, cet effet rend les lidars bathymétriques particulièrement intéressants face aux systèmes acoustiques classiques tels que les sondeurs sur bateau : la fauchée (dimension transversale couverte) du lidar est quasiment constante. Typiquement lors des acquisitions du SHOM sur le littoral, près de 300 m de fauchée sont atteints pour une altitude de vol de 400 m ;

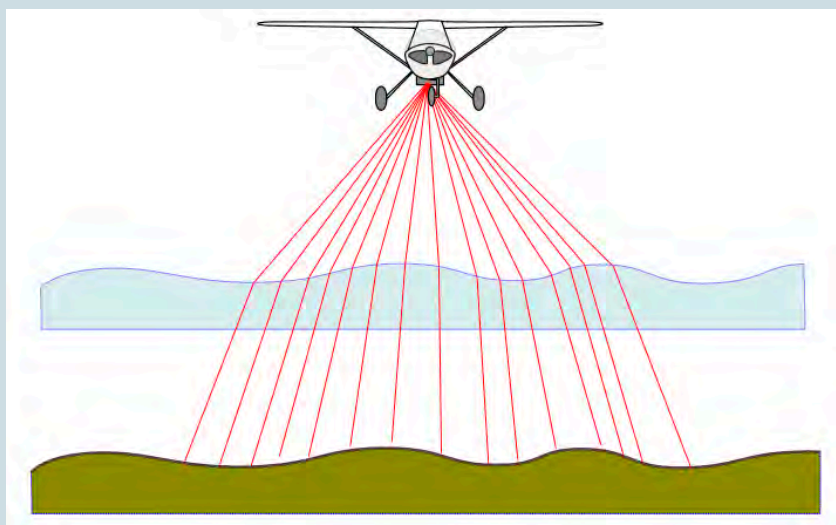


Figure C19 – Réfraction des rayons lumineux à l'interface air-mer

Source : IGN.

– une fois dans la colonne d'eau, le signal va subir les phénomènes d'atténuation et de diffusion : le lidar bathymétrique est donc particulièrement sensible aux conditions environnementales et exige une eau relativement translucide (les particules en suspension, la vase ou toute turbidité lui sont néfastes);

– seuls les rayons lumineux rétrodiffusés sur le fond de l'océan constituent le signal utile. C'est donc seulement une partie extrêmement faible du signal laser de départ qui arrive en retour sur le télescope du lidar, ce qui nécessite d'utiliser des lasers particulièrement puissants.

Pour le produit Litto3D, l'acquisition par lidar bathymétrique est spécifiée jusque 30 m de profondeur dans les zones les plus favorables de métropole, voire 40 m en outre-mer (eaux particulièrement limpides). Au-delà, le SHOM revient aux méthodes classiques de lever bathymétrique par sondeur à base d'ondes sonores.

Le projet LiCCo et le point de vue d'élus des deux côtés de la Manche

Régis Leymarie, Conservatoire du littoral

Le projet Interreg franco-anglais LiCCo¹ (Littoraux et Changements Côtiers – *Living with a Changing Coast*) s'est déroulé de 2011 à 2014. Il était porté du côté anglais par l'Environment Agency (en lien avec le National Trust) et du côté français par le Conservatoire du littoral, délégation Normandie. Les sites concernés étaient au nombre de 7, dont 5 pour la France tous situés en Normandie (figure C20).

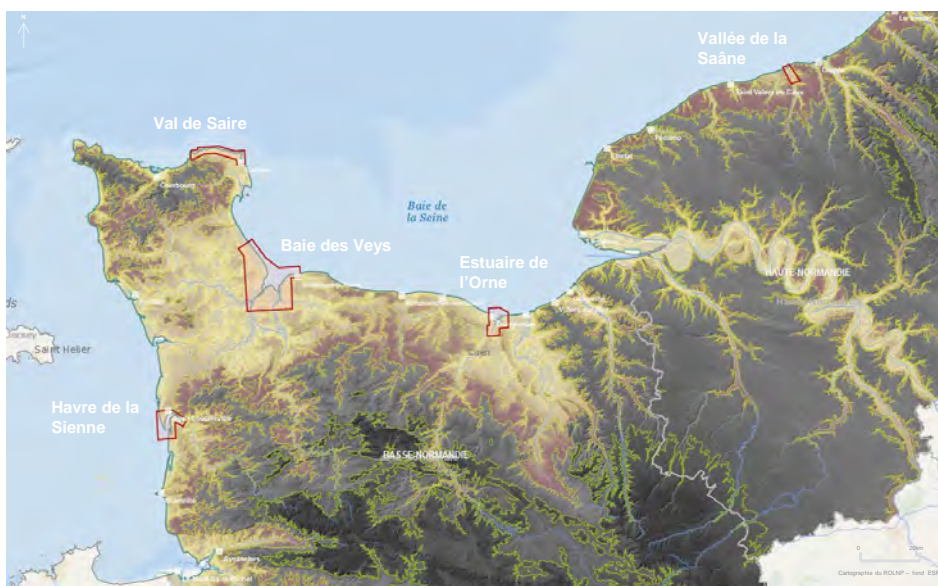


Figure C20 – Localisation des 5 sites normands qui ont participé au projet LiCCo

Source : Conservatoire du littoral.

1. www.licco.eu et licco@conservatoire-du-littoral.fr.

L'objectif était de partir de différents sites, représentatifs de cas très concrets (zone de marais, estuaire, fleuve côtier, secteur de polder, secteurs touristiques, portuaires, etc.) et représentatifs des enjeux du littoral de la Manche, d'aujourd'hui et de demain. Le projet a été conçu du côté français afin d'anticiper les phénomènes d'élévation du niveau des océans et de développer des stratégies d'adaptation à moyen et long terme qui impacteront le littoral.

L'apport anglais a reposé sur le retour d'expérience des stratégies de l'État porté par l'agence gouvernementale (Environment Agency). Depuis près de vingt ans, cette agence définit à travers les *Shoreline Management Plan* (SMP) des stratégies à moyen et long terme (2025, 2050 et 2100) à travers trois postures : maintien du trait de côte actuel, repli stratégique ou pas d'intervention active.

Par ailleurs, les Britanniques ont particulièrement travaillé sur le lien avec les populations côtières à travers l'implication du National Trust dans l'animation locale de mise en œuvre de stratégies de communication sur l'adaptation.

En Normandie, les moyens pour y parvenir ont été multiples : faire appel à l'approche historique (cartes anciennes, série de photos aériennes de l'IGN, etc.) ; réaliser une « photo » actuelle du site décrivant le trait de côte, la biodiversité et les enjeux éco systémiques, les usages ; se projeter à deux échéances à travers un volet prospectif aux horizons 2025 et 2050.

Rien de tel que le témoignage suivant de trois décideurs impliqués dans le projet pour décrire les bienfaits de la collaboration internationale quand il s'agit de faire face à un problème aussi important que l'érosion côtière.

Jean-Karl Deschamps, 1^{er} vice-président de la Région Basse-Normandie

« Le rapport de la mer à la terre est un très vieil enjeu que la région prend en compte depuis longtemps. Dès que nous avons obtenu la majorité, en 2004, nous avons créé le syndicat mixte du littoral normand, une structure qui regroupe des équipes du Conservatoire du littoral et les élus des deux régions normandes. Quelques années plus tard, en 2011, le Réseau du littoral normand et picard (ROLNP) a vu le jour. C'est une structure informelle rassemblant la Picardie, les deux régions normandes et le Conservatoire du littoral, dont la vocation est de regrouper et de compléter les travaux des scientifiques sur le trait de côte. Le projet européen LiCCo (Littoraux et Changements côtiers), qui date de 2011, s'est donc lui aussi inscrit dans cette démarche. Il a permis à nos équipes de mieux appréhender les enjeux internationaux liés au trait de côte.

La gestion du littoral est un sujet de long terme. Il faut accepter de prendre le temps, car, pour être porté par la population, il faut qu'il le soit déjà par les élus eux-mêmes. Pour leur permettre de s'en emparer, nous avons mis en place une session de formation/information de trois jours qui leur est spécifiquement destinée et vise à leur donner les clés de compréhension de ce sujet aux multiples facettes (environnementale, juridique, culturelle, etc.). Une fois que les élus seront convaincus, nous pourrons passer à la deuxième phase, celle de la sensibilisation de la population. Nous effectuons un travail de fourni.

Grâce à LiCCo, nous allons pouvoir gagner du temps en confrontant nos connaissances scientifiques et en agissant de façon pragmatique. Ce programme nous enrichit mutuellement. Il nous a permis de mettre plus facilement des mots sur une situation qui dépasse notre territoire puisqu'elle est universelle : la mer n'a pas de frontière administrative, elle ne parle ni anglais ni français. Mais elle n'est pas pourtant un ennemi de l'Homme. C'est pourquoi nous sommes fiers d'être passés d'une *politique de défense contre la mer* à une *politique de gestion durable du trait de côte*. C'est la marque d'un véritable changement culturel. »

Olivier Paz, maire de Merville depuis vingt-sept ans, président de la communauté de communes Campagne et baie de l'Orne

« Nous, élus des communes littorales avons déjà une approche technique sur le recul du trait de côte. Nous avons pris conscience des enjeux potentiellement dramatiques du changement climatique sur le littoral lors de la tempête Xynthia de 2010. S'en est suivie toute une démarche réglementaire avec l'élaboration de plans de prévention des risques littoraux.

Le Projet LiCCo est venu se greffer à ce qui existait déjà. Au début, pour être honnête, j'avais la crainte que ce ne soit qu'un programme de plus. En fait, l'approche a été très différente, plus scientifique et beaucoup plus fine. Jusque-là, les services de l'État utilisaient des cartes qui ne prenaient en compte ni les marées ni les ouvrages de défense. LiCCo les répertorie de façon très précise puisque le littoral est découpé en bandes de 200 à 300 m, ce qui nous a permis aussi de mieux comprendre les mécanismes hydrosédimentaires. Nous, par exemple, nous nous trouvons dans un estuaire et la mer a plutôt tendance à céder du terrain ! Or, l'État nous impose des cartes indiquant des risques de submersion tous les dix à vingt-cinq ans dans des zones qui n'ont pas été submergées depuis deux cents ans au moins !

Grâce à LiCCo, nous adoptons une réflexion de moyen et long terme autour de riches échanges avec des scientifiques : des climatologues, mais aussi un sociologue. Cette approche nous a permis de définir la vision que nous avons, nous, élus, des territoires du Conservatoire du littoral et celle qu'en avait la population. Nous savons que nous avons vingt-cinq ans pour faire face au problème, c'est la bonne échelle de temps. Les habitants, et on le comprend, ont du mal à admettre que, dans certains lieux exposés, ils pourraient être amenés à quitter leur bien.

En travaillant avec les Britanniques au sein du projet LiCCo, nous nous sommes rendu compte que nous étions en retard et que les Anglais ont un rapport différent à leur espace naturel. En Grande-Bretagne la population accepte plus facilement la réalité des risques. En France, beaucoup pensent encore que si la mer gagne du terrain, on doit bétonner, construire des digues. Nous, élus, avons compris qu'on n'arrête pas la mer. Il va falloir que la population mesure que le risque est réel. Dans trente ans, Merville sera différente de ce qu'elle est aujourd'hui. »



Figure C21 – Estuaire de l’Orne

Source : Conservatoire du littoral.

Nick Hardiman, conseiller au Département des inondations et du risque littoral à l’Agence de l’environnement en Angleterre

« En Angleterre, les autorités locales ont en charge les questions d’érosion littorale, mais c’est l’Agence de l’environnement qui prend en compte les enjeux de submersion marine. Autre acteur incontournable, le National Trust. Cet organisme plus que centenaire, qui compte 3 millions de membres, détient de nombreuses terres le long du littoral.

De notre côté, le projet LiCCo a permis d’accentuer nos actions de communication liées à la gestion durable du littoral. Les plans de gestion du littoral existaient déjà – l’Angleterre et le pays de Galles en comptent 22 depuis 2012 –, donc, pour moi, le but de LiCCo n’a pas été de mener de nouvelles recherches scientifiques, mais de vulgariser le contenu scientifique déjà existant. Le National Trust a organisé des marches, mais aussi des promenades en bateau au cours desquelles les travaux scientifiques étaient expliqués au public. Pour que la population prenne conscience du problème d’érosion des côtes, des peintures, mais aussi d’anciennes cartes géographiques ont été montrées, analysées et comparées à la situation actuelle. Du matériel pédagogique a été aussi distribué aux écoles.

La dimension internationale de LiCCo nous a permis de comprendre comment la France s’adaptait à ce contexte de changement climatique. Nous avons déjà depuis plus longtemps des échanges avec plusieurs pays à travers le North Sea Coastal Managers Group (NSCMG) qui regroupe la Belgique, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, l’Écosse, le Danemark et l’Allemagne. Mais la dimension bilatérale de LiCCo

a été un atout, car nous avons des côtes qui comportent de nombreuses similitudes en termes de géologie, de paysages (ports importants mais petites communes) et d'influence de l'océan Atlantique. Nous savons que si des maisons isolées doivent être déplacées aujourd'hui en raison de l'érosion littorale, dans vingt ans, cela touchera des villages et, dans cinquante ou cent ans, sans doute de plus grandes villes. Même des agglomérations situées à basse altitude, comme Portsmouth ou Hull, vont devoir faire face à la hausse du niveau de la mer. Il faut que nous convainquions les habitants de la nécessité de prendre en compte ce problème et de s'y adapter. L'État ne peut pas s'engager à bâtir et à maintenir partout en état, à grands frais, des ouvrages de défense.»

Le Plan bleu, un observatoire pour l'adaptation des zones côtières méditerranéennes aux impacts du changement climatique

Antoine Lafitte, Plan bleu

- Le Plan bleu, observatoire de l'environnement et du développement pour la convention de Barcelone en Méditerranée

La convention de Barcelone de 1976, amendée en 1995, vise à protéger l'environnement marin et côtier de la Méditerranée tout en encourageant des plans régionaux et nationaux contribuant au développement durable.

La mise en œuvre de la convention de Barcelone est coordonnée par une unité basée à Athènes et dépendante du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Certains pays accueillent des centres d'activités régionales qui concourent chacun dans leur domaine à la mise en œuvre de la convention. Le Plan bleu¹ est un de ces centres dont la mission est définie ainsi.

«L'objectif du Plan bleu est de contribuer à sensibiliser les acteurs concernés et les décideurs méditerranéens aux problématiques liées à l'environnement et au développement durable de la région en leur fournissant des scénarios pour l'avenir de manière à éclairer la prise de décision. À cet égard et au titre de sa double fonction d'observatoire de l'environnement et du développement durable et de centre d'analyse systémique et prospective, le Plan bleu a pour mission de fournir aux parties contractantes des évaluations de l'état de l'environnement et du développement en Méditerranée et un socle solide de données, statistiques, indicateurs et évaluations concernant l'environnement et le développement durable leur permettant d'étayer leurs actions et leur processus décisionnel.»

Le Plan bleu est donc une interface entre les scientifiques et les décideurs en Méditerranée dans le domaine de l'environnement et du développement durable et met tout en œuvre pour que l'ensemble des informations pertinentes soient synthétisées, analysées, commentées et rendues disponibles pour les décideurs.

1. <http://planbleu.org>

Parmi les thèmes d'expertise du Plan bleu figurent le changement climatique et la gestion intégrée des zones côtières.

- L'adaptation des zones côtières méditerranéennes aux impacts du changement climatique à travers les travaux du Plan bleu

Le 5^e rapport d'évaluation du GIEC a identifié la Méditerranée comme une des régions les plus vulnérables au changement climatique, « qui connaîtra de multiples contraintes et défaillances systémiques dues aux changements climatiques dans les prochaines années ». L'adaptation au changement climatique en Méditerranée est donc indispensable.

Dans ce domaine, le rôle du Plan bleu se traduit par des actions concrètes telles que l'organisation d'ateliers et le développement d'outils. Les ateliers participatifs permettent de favoriser les échanges de connaissances entre experts du climat et utilisateurs des informations et d'élaborer des recommandations stratégiques concertées.

Au travers de ses publications, le Plan bleu formule des stratégies et recommandations pour la gestion des risques et des opportunités dans des secteurs socio-économiques et environnementaux clés. Les publications de référence du Plan bleu sur la gestion des risques climatiques concernent principalement le secteur de l'eau, mais aussi les zones humides, l'énergie, le transport, l'agriculture et plus récemment les zones côtières.

Ainsi, entre 2012 et 2015, le Plan bleu est partenaire du projet « Intégration de la variabilité et du changement climatiques dans les stratégies nationales pour la mise en œuvre du protocole Gestion intégrée des zones côtières (GIZC) en Méditerranée », dont le but est de faire face aux impacts du changement climatique dans les zones côtières, en les intégrant dans le processus de planification spatiale.

Le Plan bleu et la Banque européenne d'investissement ont collaboré au sein d'un programme qui a permis notamment d'aborder la thématique de l'adaptation au changement climatique du système eau-énergie : l'eau est en effet le vecteur par lequel le changement climatique aura l'impact économique, social et environnemental le plus fort. Les mesures d'adaptation possibles auront un impact direct sur la consommation d'énergie pour le dessalement, les transferts, le traitement de l'eau, l'irrigation. Dans le même temps, il faudra que la production d'électricité s'adapte au nouveau climat, notamment pour ce qui concerne l'hydroélectricité et le refroidissement des centrales. Il faudra qu'elle puisse bénéficier d'investissements ayant pour objectif de limiter les dommages occasionnés par les événements extrêmes. Le développement d'ouvrages hydrauliques, à des échelles variables, est aussi une voie pour une production d'électricité décarbonée dont les zones littorales auront un besoin croissant pour leur développement plus soutenable. Les situations au Maroc et en Syrie ont été étudiées spécifiquement.



© Nelly Bourlion/Plan bleu.

Nouvelle d'anticipation
Entre terre et mer

Isabelle Bellin, *Technoscope*



À quoi pourrait ressembler le littoral du Nord-Pas-de-Calais en 2070? Accompagnons une classe de lycéens strasbourgeois en sortie scolaire pour découvrir comment ces paysages dunaires pourraient être recomposés, notamment « maritimisés », pour s'adapter aux impacts du changement climatique. Et comment la vie locale pourrait se réorganiser en harmonie avec la nature, la mer et ses débordements. Cette fiction est inspirée de faits réels, de travaux scientifiques, de stratégies territoriales en cours de réflexion et d'une bonne dose d'imagination.

Vendredi 5 décembre 2070. Cyprian s'est levé tôt : il s'apprête à accueillir une classe du lycée Buffon, de Strasbourg, venue découvrir sa région dans le cadre de la Semaine du climat, une semaine instaurée depuis la conférence des Nations unies sur le changement climatique à Paris, en décembre 2015. Au programme : le littoral, les prés-salés, la réserve naturelle de Nioudune et une sortie en mer à environ cinq milles marins pour visiter la farolienne, source d'énergie renouvelable et protection du littoral contre la houle. Une longue journée au grand air comme il les aime. Il n'a que 17 ans, mais il sait qu'il ne se lassera jamais de ce paysage entre terre et mer, qu'il soit battu par les vents comme aujourd'hui ou qu'il profite d'une chaleur si agréable en été.

À la gare de Mascoote, construite comme la ville vers 2040, il retrouve madame Flore, sa professeure de culture et environnement, qui a organisé la journée. Elle habite la région depuis plusieurs générations. C'est un des piliers du conseil participatif local, incollable sur l'histoire de Mascoote et fervente militante de l'adaptation au changement climatique.

– Bonjour madame, lance Cyprian, pas peu fier de côtoyer cette professeure respectée.

– Bonjour Cyprian.

– On va avoir une belle journée! Combien sont-ils?

– Une trentaine. Ils sont un peu en retard... Enfin, une heure et demie pour venir de Strasbourg, ça reste bien peu! Avant ces navettes par sustentation magnétique, il fallait compter cinq heures!

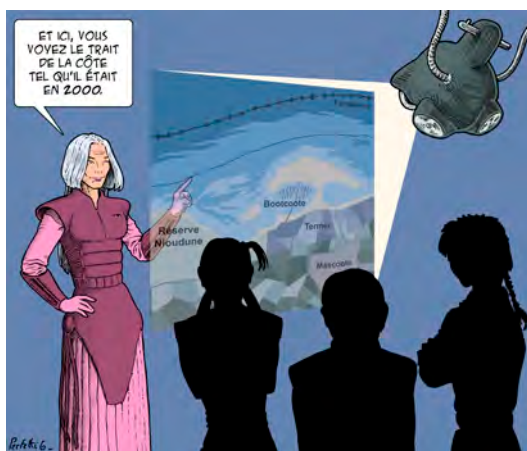
– La voilà!

Après de rapides présentations, les uns et les autres se répartissent dans des cyclosolaires, les plus sportifs aux pédales. Madame Flore leur a indiqué le canal scolaire sur lequel brancher leur puce auditive et leur lentille bionique pour pouvoir être connectés, échanger entre eux sans être dérangés par d'autres transmissions, consulter images et vidéos.

– En route. Nous sommes heureux de vous accueillir dans notre belle région. Ensemble nous allons remonter le temps et apprécier le chemin parcouru. Nous vous emmenons d'abord au lycée où, pour le 30^e anniversaire de la création de Mascoote, quelques élèves, dont Cyprian, ont monté une exposition sur notre jeune ville. Même si elle ne compte que 3 000 habitants, Mascoote reste emblématique

en termes de recomposition du territoire. C'est un des premiers endroits en France où on a maritimisé la bande littorale, en laissant la mer reconquérir les « zones basses », ces zones situées en dessous du niveau le plus haut atteint par la mer lors de conditions extrêmes. Avant, ces zones étaient « polderisées » comme on disait à l'époque, autrement dit asséchées pour être cultivées.

Grâce à ses électrodes, la professeure transmet aux élèves une image de polder sur le canal scolaire et poursuit.



– On a reconstruit la ville à 10 kilomètres de la côte et lancé de nombreux projets autour de l'environnement, l'énergie, l'agriculture ou l'industrie. J'avais votre âge lorsqu'on a commencé à y réfléchir. On ne parlait que de ça, au lycée, à la maison. Il a fallu une dizaine d'années de discussions ! Cela a même souvent tourné à la confrontation. Nous avons réussi à nous décider grâce à une large concertation, un échange entre tous les citoyens, les associations, les entreprises, les élus... en étudiant

les propositions dans un souci d'intérêt partagé associant protection des populations, de l'environnement et développement économique. C'est à ce moment-là que nous avons créé le conseil participatif, l'instance locale qui a porté tous les projets et les cogère aujourd'hui. Après coup, les bons choix paraissent souvent relever de l'évidence, mais au début du siècle, même si l'on était parfaitement conscients qu'il fallait modifier nos modes de vie, on avait du mal à agir. Pour bien comprendre, il faut que vous sachiez que les submersions marines étaient de plus en plus fréquentes dans la région à ce moment-là. La zone pavillonnaire en bord de mer, les deux campings et le célèbre hôpital maritime étaient souvent inondés, même parfois la ville pourtant à 1 kilomètre de la côte. J'avais 6 ans lors de la tempête de 2020 qui a précipité les événements. Nous sommes passés à deux doigts d'une catastrophe. Comme vous le voyez sur ce court extrait vidéo, les dégâts ont été considérables. C'est à la suite de ça qu'en 2022 la décision a été prise de ne plus assécher les zones basses, de laisser faire la nature et de réfléchir à une nouvelle organisation du territoire.

– Et où sont allés les habitants et les malades ? interroge un élève.

– En attendant que les concertations aboutissent, les résidents ont été provisoirement réinstallés dans la ville voisine et les malades pris en charge dans les hôpitaux de la région. Un bouleversement pour ces familles. Mais bien peu de choses comparé aux impacts du réchauffement climatique à l'échelle de la planète : des

sécheresses, des crises alimentaires, de nombreux déplacements de population, une biodiversité bouleversée...

– Comment saviez-vous que les submersions marines étaient dues au réchauffement climatique ? demande un autre élève.

– Parce que le niveau de la mer montait ! Et de plus en plus vite : d'environ 3,2 millimètres par an à l'échelle mondiale à cette époque, et depuis plusieurs décennies. Cela paraît peu, mais c'était déjà presque deux fois plus qu'au début du xx^e siècle. Et cela a continué ensuite, en un siècle la mer est montée d'environ 35 centimètres. Les scientifiques l'avaient prévu dès les années 2000. Et c'est bien ce qu'on a constaté en France. Le réchauffement climatique est en cause pour deux raisons principales : l'océan se dilate en se réchauffant et il contient de plus en plus d'eau provenant de la fonte des glaciers et des calottes polaires.

– Mais 35 centimètres, c'est rien par rapport aux marées ? rétorque un élève.

– Ici, c'est énorme à cause des nombreuses zones basses. Mais vous avez raison, le phénomène est aggravé par les tempêtes qui érodent la côte sous l'effet des vents et des vagues, font reculer la dune et entrer la mer dans les terres. On savait qu'un million et demi de personnes subiraient des inondations sur le littoral français, 70 millions en Europe et des centaines de millions dans le monde. Ça y est, nous y sommes : allons voir cela en images !

Ils garent les cyclosolaires et pénètrent dans le hall lumineux du lycée. Cyprian présente l'exposition.

– On est remontés au xiii^e siècle ! annonce-t-il fièrement. Notre ville a toujours dû lutter contre la mer, les tempêtes et le déplacement des dunes. Vers 1200, le premier port de pêche a été complètement ensablé. En 1777, un ouragan a entièrement recouvert le village de sable. Il a été reconstruit à 1 kilomètre de la côte comme vous l'a dit madame Flore. Regardez, ici on voit le clocher qui émergeait de la dune jusqu'en 1943 ! Et là on a monté un time-lapse (une vidéo en accéléré) du bord de mer de 2000 à nos jours : on voit comment la dune est progressivement devenue une presqu'île ; on voit aussi où se situaient l'hôpital maritime, la zone pavillonnaire, l'aciérie et l'ancienne réserve naturelle. Là, c'est quand on a reconstruit Mascoote, en 2040, et voici la route que nous allons emprunter, qui mène à Bootcoote, le quartier flottant, en passant par les prés-salés. Ici, c'est la réserve de Nioudune, et, en mer, la farolienne. Là, c'est l'usine de dessalement dans les terres.

– Merci Cyprian, reprend madame Flore. C'est un bon aperçu de notre territoire. J'ajoute que la précision de certains outils, comme les méthodes d'altimétrie, nous ont bien aidés à identifier les zones à maritimer et à faire les bons choix. Maintenant, allons rejoindre Bootcoote où nous prendrons le bateau pour la farolienne. En chemin, vous allez voir à quoi ressemble un littoral maritimisé. Couvrez-vous bien, ça souffle aujourd'hui.



Sans surprise, ce petit quart d'heure de pédalage à travers champs se transforme vite en course-poursuite. Cela n'empêche pas ces ados fougues de remarquer qu'à mi-chemin, la route change d'aspect. Cyprian explique qu'on entre dans la zone submersible. La chaussée est sur caissons, flottante si besoin au gré des marées et des tempêtes. C'est devenu commun sur le littoral. Le paysage change aussi. Madame Flore calme la troupe et reprend la parole.

– Tout autour de vous, ce sont des champs plus ou moins salés. Il y a seulement quelques décennies que l'on sait cultiver et gérer ces espaces agricoles. Les milieux soumis aux submersions marines ont été longtemps considérés comme extrêmes.

En concentrant leur regard sur les différentes espèces, les élèves visualisent sur leur lentille bionique des informations. Ils découvrent les Tamarix utilisés pour le bois de chauffage, les Atriplex qui forment de jolies haies et servent pour le fourrage, la betterave maritime, le lupin réticulé, les asperges ou encore la vigne que les submersions marines protègent du phylloxera, ce puceron ravageur. Ici et là, quelques constructions discrètes sont réservées aux agriculteurs.

Un peu plus loin, ils atteignent la Termer, cette bande de deux kilomètres de large que l'on trouve désormais sur une partie du littoral français où tourisme, élevage, pêche, chasse cohabitent et où ne sont construits que des abris légers, démontables et mobiles. La route flotte maintenant.

– Comme vous pouvez le voir, la Termer est surtout constituée de prés-salés, recouverts lors des grandes marées comme en ce moment : on y cultive toutes sortes de plantes halophiles, qui s'accommodent bien du sel. Certaines sont comestibles comme les salicornes ; d'autres sont utilisées en parapharmacie ; la plupart sont destinées à l'industrie cosmétique ou pharmaceutique. Sur votre droite, c'est du riz. Et à gauche des microalgues, dont on tire le carburant Bioalgo. Il y a aussi des élevages d'alevins dans les zones toujours immergées, comme là-bas au milieu des roseaux. Tiens, regardez ! Des flamants roses ! Ils viennent de la réserve où ils sont de plus en plus nombreux à nidifier.

– Oh ! Des moutons dans l'eau ! s'exclame une élève.

– Ce sont nos agneaux de pré-salés comme il en existait déjà dans la baie de Somme ou autour du Mont-Saint-Michel depuis le début du xx^e siècle. Leur viande est considérée comme fameuse, d'une couleur et d'une saveur particulière grâce à ces pâturages gorgés de sel et d'iode. Ils ont l'avantage de manger les chiens qui, sinon, envahiraient la zone et accéléreraient l'ensablement. Les bergers vont les rentrer sous peu dans les terres, pour passer l'hiver à la bergerie et revenir au printemps.

– Et en cas de tempête ? questionne un autre.

– Bien sûr, on les mène sur la terre ferme à la moindre alerte. Grâce aux prévisions météorologiques, on connaît les risques d'inondation plusieurs jours à l'avance. Ensuite, en temps réel, chacun est prévenu sur sa puce cérébrale d'alerte, en fonction de sa position précise.

L'ambiance devient de plus en plus marine. La route flotte désormais sur environ un mètre de fond. Ils atteignent Bootcoote.

– Quelques mots sur ce quartier flottant. Il a été conçu en même temps que la ville dans l'arrière-pays. Certains habitants, même s'ils ont compris qu'on ne pouvait plus continuer à bétonner les côtes pour l'intérêt de quelques-uns, au risque de mettre des vies en danger, ont tout de même voulu conserver ce qu'on pourrait appeler un « pied en mer ». Le conseil participatif a imaginé cette solution : un quartier flottant, de structure légère, démontable et écologique à tout point de vue. La centaine d'habitants qui y loge en est locataire, sur décision du conseil. Les services publics sont réduits au minimum et des engagements sont à respecter en termes d'écologie. En la matière, nos meilleures sentinelles sont les poissons et les coquillages qui ont élu domicile dans les structures. À commencer par les huîtres, que plusieurs ostréiculteurs élèvent ici, qui seraient très vite impactées. Côté sécurité, tous les habitants de Bootcoote ont l'obligation d'évacuer les lieux en cas d'alerte et n'ont aucune assurance quant au fait de retrouver leurs biens. Chacun peut, par ailleurs, être renvoyé dans les terres en cas de comportement inapproprié. Une vingtaine de havres – comme on les appelle – sont aussi réservés à la location saisonnière, en priorité pour les habitants de Mascoote. En trente ans, il n'y a encore jamais eu de gros dégât, mais comme vous l'avez compris, généralement on ne s'installe pas à vie ici. Cela attire surtout les jeunes à la recherche d'une grande proximité avec la nature. Venez, allons visiter un de ces havres.

Un intérieur très simple, mais confortable, bien loin du monde hyperconnecté de ces ados. Bien loin aussi des énormes quartiers flottants créés en Chine, à Manhattan ou à Singapour. Ici, pas d'étage et une architecture destinée à limiter la prise au vent. Électricité solaire, récupération d'eau de pluie, toilettes sèches, comme dans tous les quartiers écologiques. Cyprian aimerait bien habiter là, mais ses parents préfèrent une maison en ville. Ils louent un havre chaque été ou presque.

La petite troupe embarque sur le *Navhy*, le bateau à hydrogène qui fait la navette entre Bootcoote et la farolienne, pour le personnel et les touristes.

– Je profite de cette demi-heure de trajet pour vous donner quelques éléments sur la farolienne, cette petite ligne que vous distinguez à une dizaine de kilomètres. Vous connaissez tous ces éoliennes *farshore*, à distance des côtes, couplées à des centrales houlomotrices sous leur flotteur. Outre le fait qu'en 2040, ce n'était pas encore si courant, la nôtre est spécifique : ses flotteurs sont reliés entre eux pour atténuer la houle, et ainsi protéger la dune et le littoral. Je vous rappelle que l'érosion est un phénomène naturel : les sédiments sont déplacés sous l'effet des vagues, des courants, des vents ou encore des fleuves dans les estuaires. Ce qu'on appelle le « trait de côte » (la limite entre la terre et la plus haute mer) recule sans cesse dans le secteur, ce qui n'est heureusement pas le cas partout. Ici, la côte est, en général, en recul d'environ 1 mètre par an, parfois de 5 mètres par an, parfois, de plus de 15 mètres d'un coup lors des tempêtes ! Le problème est qu'on a de plus en plus construit en bordure de littoral, surtout au ^{xix}^e et ^{xx}^e siècle, avec l'essor des stations balnéaires. Pour protéger ces biens, depuis le Moyen Âge et jusqu'aux années 1980, on construisait des équipements en dur comme des digues ou des enrochements. On appelait cela des « défenses côtières », selon une vision très militaire. En 2015, 20 % de nos côtes étaient dénaturées de la sorte. Pourtant, les inondations se multipliaient. Vous avez dû entendre parler de la tempête Xynthia qui, en février 2010, a fait 53 victimes et 500 000 sinistrés. 6 000 maisons ont été inondées. Tout cela à cause de digues qui ont cédé. À l'époque, on interdisait déjà les constructions en zone inondable, mais les expropriations restaient exceptionnelles et très mal vécues. Même après Xynthia, les gens refusaient d'admettre le risque. Il a fallu que les catastrophes mondiales se multiplient dans les années 2020-2030 pour que l'état d'esprit change vraiment. Il y a eu New York dont la zone tampon en bordure de Manhattan et les murs de protection coulissants n'ont pas suffi ; Venise dont les aqua alta sont devenues permanentes en hiver malgré le gigantesque plan de sauvetage ; de nombreuses îles qui ont disparu comme aux Maldives... En France, les pires inondations ont eu lieu sur l'île de Ré et dans les estuaires de la Seine et de la Gironde où la conjonction de grandes marées, de vents forts et de débits élevés des fleuves ont fait beaucoup de dégâts, mais heureusement peu de victimes, car les systèmes d'alerte étaient efficaces. Des plans communaux de sauvegarde étaient en place dans toutes les zones à risque. La farolienne, l'installation que vous allez visiter, est, en quelque sorte, la génération suivante de protection, seulement ancrée sur le fond marin. Aujourd'hui, les digues ne sont entretenues voire reconstruites que dans les endroits où l'on ne peut vraiment pas faire autrement.

Ils approchent de l'installation. Même s'ils ont déjà vu des images ou des films de ce drôle de monstre marin de plus de 20 kilomètres de long, sur place, c'est impressionnant. Surtout que la mer est formée. Des techniciens assurent la visite. Les élèves montent à tour de rôle dans la nacelle à 200 mètres de haut. Ils aperçoivent alors la dune, les prés-salés et la Termer tout le long du littoral, au loin Mascoote et l'usine de dessalement. Tous se retrouvent ensuite dans la salle les machines, sous-marine, comme insonorisée par rapport au vacarme extérieur.

– Bienvenue, annonce un ingénieur. Notre farolienne comporte 30 éoliennes de 10 mégawatts (MW) chacune, avec des pâles de 120 mètres. Elles sont fixées sur des coques flottantes, ancrées et reliées entre elles par l'atténuateur de houle. Sous chaque éolienne, une turbine immergée récupère l'énergie de la houle. La puissance totale est de 500 MW. Outre l'usine de dessalement, nous alimentons 100 000 foyers de la région. Nous battons régulièrement des records de production lors des tempêtes. Selon nos calculs, la farolienne réduit de moitié la puissance de la houle au niveau du littoral. L'impact sur l'érosion est très bénéfique. Néanmoins, cela n'empêche pas la dune de reculer, mais elle recule beaucoup moins vite.

Les élèves peuvent voir les turbines en action, le tableau synoptique de la salle de contrôle et tous les relevés de paramètres. Avant de rejoindre le littoral, ils sont invités à partager un traditionnel waterzooi de bars et maigres, les poissons désormais pêchés dans la région au lieu de la roussette et du cabillaud qui ont disparu à cause de la surpêche et du changement climatique. Affamés par cette matinée au grand air, les jeunes ne se font pas prier même si ce légendaire plat flamand n'est pas dans leurs habitudes. Les discussions vont bon train.

– Il paraît que le réchauffement climatique a beaucoup affecté la biodiversité marine, questionne une élève.

– Oui, environ 30 % de la superficie des océans est déjà concernée, répond madame Flore. Tout le système biologique est bouleversé : des espèces ont disparu, certaines populations d'organismes marins se sont effondrées, d'autres ont proliféré au détriment des espèces autochtones. Cela a longtemps été le cas de l'huître creuse du Pacifique, qui avait été introduite en France il y a un siècle et devenait très envahissante. Depuis qu'on a réussi à gérer son développement, c'est devenu une ressource locale importante. L'autre impact majeur de la concentration toujours plus forte de CO₂ dans l'atmosphère, c'est l'acidification des océans : plancton, crustacés, mollusques et coraux sont particulièrement touchés. C'est très inquiétant, car l'ensemble de la chaîne alimentaire est atteinte et nous n'avons pas encore trouvé de solution.

Retour à terre pour passer l'après-midi à la réserve naturelle de Nioudune. Même si ces jeunes s'étonnent de moins en moins, on les sent dubitatifs, bien calmes dans leur embarcation ballottée par les flots : ils mesurent mieux la force des éléments naturels, les stratégies qu'il faut déployer pour s'adapter, les nombreux impacts des modes de vie de leurs aînés. À l'approche de la dune, ils passent devant une drôle d'installation qu'ils n'avaient pas remarquée à l'aller. Cyprian explique :

– C'est le zouave de Zuydmer! Comme celui du pont de l'Alma à Paris, sauf que le nôtre a les pieds dans l'eau salée! Et il est un peu plus sophistiqué. Il enregistre des données sur la montée des eaux, la houle, mais aussi sur le climat et même l'érosion côtière grâce à un système de télémétrie laser 3D. Il fait partie du réseau national d'observatoires du trait de côte. Il a été installé en 2030, en même temps que les réflexions sur la réorganisation de Mascoote.

Ils longent la côte et accostent.

– Nous allons vous laisser explorer cet espace entièrement sauvage, précise madame Flore. Je vous demande de préserver la faune et la flore en restant sur les sentiers balisés. Cette réserve fait 250 hectares. Elle est d'une grande importance écologique. Vous trouverez sur le canal scolaire de nombreuses informations sur les espèces végétales – surtout des argousiers, troènes sauvages, de l'aubépine, des oyats –, les animaux – de nombreux oiseaux d'eau, des flamants roses, des lapins, des chevaux Haflinger –, ainsi que les parcours pédestres, les localisations des observatoires et les espaces d'information. Je serai bien sûr à votre disposition sur ce même canal. Avant de vous laisser découvrir Nioudune, un petit mot encore sur Mascoote. Vous avez pu constater et, j'espère, comprendre pourquoi Mascoote est souvent cité en exemple en France et en Europe. Après la tempête



Xynthia, plusieurs stratégies d'adaptation ont été imaginées en France. Deux ont été retenues. Dans la majorité des cas, il a été décidé de réorganiser les territoires et les activités selon l'érosion et les risques de submersions, en instaurant une Termer. Parfois, on laisse faire la nature, les dunes s'érodent et se reforment au gré des vents ; parfois, on accompagne cette évolution naturelle. Dans quelques cas spécifiques, lorsque cette solution est difficilement envisageable au regard d'enjeux stratégiques comme des villes denses ou d'intérêt patrimonial, le trait de côte est maintenu aussi longtemps que possible. Cela passe par différentes solutions de digues ou par le rechargement des plages en sable, comme l'ont longtemps fait les Pays-

Bas. Les choix faits à Mascoote, non sans mal comme je vous l'ai dit, associent plusieurs stratégies, toutes importantes, même si certaines vous paraîtront dérisoires bien que très utiles, comme de stabiliser les dunes en replantant des oyats tous les ans, en posant ces barrières en bois que vous avez pu apercevoir, qu'on appelle des « ganivelles », ou grâce au repos dunaire, cette période de plusieurs mois dans l'année où toute circulation humaine y est interdite. Cette réorganisation du territoire s'est accompagnée d'un développement économique local, durable et propice à une économie circulaire. Il faut savoir qu'à l'époque, la région avait un des plus forts taux de chômage, plus de 18 % dans les années 2010, ce qui doit vous sembler astronomique ! Maintenant, on vit bien ici et ce n'est pas seulement grâce au tourisme, même s'il faut reconnaître que le climat en été attire plus de monde que sur la côte méditerranéenne écrasée de chaleur (Mascoote accueille 30 000 habitants en été !). C'est aussi parce qu'il y a du travail sur la

farolienne, dans l'usine de dessalement, dans les prés-salés, dans la réserve, en aquaculture, en ostréiculture. Contrairement à beaucoup de villes du littoral qui attirent seulement les personnes âgées, nous avons beaucoup de familles et de jeunes ici. Sur ce, place à la nature! Et ne faites pas trop de bruit pour respecter et admirer les oiseaux. On se retrouve dans deux heures.

La petite troupe se disperse, chacun appréciant les lieux à sa manière. Les deux heures passent bien vite, trop vite. La nuit tombe, il est temps de reprendre la navette. Chacun repart avec, en souvenir, un petit pot de miel de Nioudune. Aucun doute que plusieurs reviendront et feront, à leur tour, découvrir la région.

Bibliographie

Adger, W.N., S. Agrawala, M.M.Q. Mirza, C. Conde, K. O'Brien, J. Pulhin, R. Pulwarty, B. Smit and K. Takahashi (2007) : « Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity » in *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, p. 717-743.

Adloff F., S. Somot, F. Sevault, M. Déqué, M. Herrmann, C. Dubois, R. Aznar, E. Padorno, E. Alvarez-Fanjuls, G. Jordà et D. Gomis (2015), « Sensivity of the Mediterranean Sea to boundary forcings in an ensemble of 21st century climate change scenarios », *Clim. Dyn.* (accepted).

Agence des aires marines protégées, synthèse et chiffres clés relatifs aux aires marines protégées françaises (avril 2014).

Amelung, B. et A. Moreno, (2009), « *Impacts of climate change in tourism in Europe* ». PESETA-Tourism study. EUR, Scientific and Technical Research series, ISSN 1018-5593.

André Camille (2013), Analyse des dommages liés aux submersions marines et évaluation des coûts induits aux habitations à partir des données de l'assurance : Perspectives apportées par les tempêtes Johanna (2008) et Xynthia (2010), thèse de l'Université de Bretagne occidentale soutenue le 18 décembre 2013, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00961315/document>

Bard, E., B. Hamelin et R.G. Fairbanks, (1990) « U/Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados. Sea level during the past 130,000 years », *Nature*, 346, p. 456-458.

Basilico, L., N. Massu, et D. Martin, (2011), *Changement climatique – impacts sur le littoral et conséquences pour la gestion*, Éditeur ECOFOR.

Becker, M., B. Meyssignac, C. Letetrel, W. Llovel, A. Cazenave, and T. Delcroix (2012), « Sea level variations at tropical Pacific islands since 1950 », *Global and Planetary Change*, 80-81, p. 85-98, doi : 10.1016/j.gloplacha.2011.09.004.

Bird, E. C. F., (1987), « The modern prevalence of beach erosion », *Marine Pollution Bulletin*, 18(4), p. 151-157.

Boening, C., K. K. Willis, F. W. Landerer, and R. S. Nerem (2012), « The 2011 La Nina : so strong, the oceans fell », *Geophys. Res. Lett.*, 39, L19602, doi : 10.1029/2012GL053055.

Bonneton, P., S. Abadie, B. Castelle, J. Favenc, C. Mallet, et A. Sottolichio (2013), « Modification du littoral », in *Les impacts du changement climatique en Aquitaine, un état des lieux scientifique* [H. Le Treut (ed.)]. Presses universitaires de Bordeaux/LGPA-éditions, 157-172, ISBN 978-286 781-874-5.

Brown, S., R. J. Nicholls, S. Hanson, G. Brundrit, J. A. Dearing, M. E. Dickson, S. L., Gallop, S. Gao, I. D. Haigh, J. Hinkel et al. (2014), « Shifting perspectives on coastal impacts and adaptation », *Nature Climate Change*, 4(9), p. 752-755.

Brunel C. et F. Sabatier (2009), « Potential sea-level rise influences in controlling shoreline position for French Mediterranean Coast », *Geomorphology*, 107, p. 47-57.

Bulteau, T., J. Mugica, C. Mallet, C. Garnier, D. Rosebery, F. Maugard, A. Nicolae Lerma, A. Nahon, et B. Millescamps (2014), *Évaluation de l'impact des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la morphologie de la Côte Aquitaine*, Rapport final BRGM/RP-63797-FR.

Cazenave, A., H. Dieng, B. Meyssignac, K. von Schuckmann, B. Decharme, and E. Berthier (2014), « The rate of sea level rise », *Nature Climate Change*, 4, p. 358-361, doi : 10.1038/NCLIMATE2159.

Cazenave, A., and G. Le Cozannet (2014), « Sea level rise and coastal impacts », *Earth's Future*, 2(2), p. 15-34, doi : 10.1002/2013EF000188.

CGDD, *Études & documents, Le littoral : chiffres-clés*, n° 32, janvier 2011. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ED32.pdf>

CGDD, *Références – Environnement littoral et marin*, mai 2011.

CGDD (2011), « Impacts à long terme du changement climatique sur le littoral métropolitain », *Études et Documents*, 55.

CGDD, *Références – Apports du programme Liteau à la gestion durable de la mer et du littoral : projets de recherche 2004-2012*, mars 2015.

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

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

Church, J. A., P. U. Clark, A. Cazenave, J. M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M. A. Merrifield, G. A. Milne, R. S. Nerem, P. D. Nunn, A. J. Payne, W. T. Pfeffer, D. Stammer, and A. S. Unnikrishnan (2013), « Sea Level Change » in *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia,

V. Bex and P. M. Midgley (eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1137-1216.

CIRIA, CUR, Cetmef (2009), *Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques*. CIRIA, CUR, Cetmef, 1330 p. + DVD-Rom : p. 859-907.

Coll M., C. Piroddi, J. Steenbeek, K. Kaschner, F. Ben Rais Lasram, et al. (2010) The Biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, Patterns, and Threats. PLoS ONE 5(8): e11842. doi:10.1371/journal.pone.0011842

Costa, S. (2004), « L'impact du changement climatique sur le recul du trait de côte. L'exemple de la "Valleuse d'Antifer" (Haute-Normandie) in Clus-Auby C., R. Paskoff et F. Verger (2004), *Impact du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du littoral : scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100* (rapport). Rochefort : Conservatoire du littoral. 41 p.

Costa, S, D. Delahaye, S. Freiré-Díaz, R. Davidson, L. Di-Nocera, and E. Plessis (2004) « Quantification by photogrammetric analysis of the Normandy and Picardy rocky coast dynamic (Normandy, France) », *Geological Society Engineering, Geology special publication, 20: Coastal chalk cliff instability*, Mortimore et Duperret (eds.), p. 139-148.

Cramer, W., G. W. Yohe, M. Auffhammer, C. Huggel, U. Molau, M. A. F. da Silva Dias, A. Solow, D.A. Stone, and L. Tibig (2014), « Detection and attribution of observed impacts » in *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 979-1037.

Dean, R. G. (1991), « Equilibrium beach profiles : characteristics and applications », *Journal of Coastal Research*, 7, 1, p. 53-84.

Dörfliger, N., S. Schomburgk, M. Bouzit, V. Petit, Y. Caballero, P. Durst, O. Douez, M. Chatelier, N. Croiset, et N. Surdyk (2011), *Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers de métropole*, Rapport BRGM/RP-60829-FR, 302 p.

FAO, *Food balance sheet of fish and fishery products in live weight and fish contribution to protein supply*, 2011.

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, 64 p.

Gornitz, V., (1991), « Global coastal hazards from future sea level rise », *Global and Planetary Change*, 89(4), p. 379-398.

Gouriou, T. (2012), « Évolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphie effectuées depuis la fin du XVIII^e siècle en Charente-Maritime », Thèse de doctorat de l'université de la Rochelle, soutenue le 26 mars 2012.

Gouriou, T., B. Martin-Miguez, and G. Wöppelmann (2013), « Reconstruction of a two-century long sea level record for the Pertuis d'Antioche (France) », *Continental Shelf Research*, 61-62, p. 31-40.

Hallegatte, S., N. Ranger, O. Mestre, P. Dumas, J. Corfee-Morlot, C. Herweijer, and R. M. Wood (2011), « Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen », *Climatic change*, 104(1), p. 113-137.

Hallegatte, S., C. Green, R. J. Nicholls, and J. Corfee-Morlot (2013) « Future flood losses in major coastal cities », *Nature Climate Change*, 3(9), p. 802-806.

Hawkes, P. J., G. Pauli, H. Moser, Ø. A. Arntsen, P. Gaufres, S. Mai, and K. White (2010), « Impacts of climate change on waterborne transport », *Civil Engineering*, p. 55-63.

Hemer, M. A., J. Katzfey, and C. E. Trenham (2013), « Global dynamical projections of surface ocean wave climate for a future high greenhouse gas emission scenario », *Ocean Modelling*, 70, p. 221-245.

Hinkel, J., D. Lincke, A. T. Vafeidis, M. Perrette, R. J. Nicholls, R. J. S. Tol, B. Marzeion, X. Fettweis, C. Ionescu, and A. Levermann (2014), « Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise » *PNAS*, doi : 10.1073/pnas.1222469111.

Idier D., H. Muller, R. Pedreros, J. Thiébot, M. Yates, R. Créach, G. Voineson, F. Dumas, F. Lecornu, L. Pineau-Guillou, P. Ohl, et D. Paradis (2012a) *Système de prévision de surcotes en Manche/Atlantique et Méditerranée : Amélioration du système existant sur la façade Manche/Gascogne* [D4]. Rapport BRGM/RP-61019-FR, 172 p.

Idier, D., F. Dumas, and H. Muller (2012b), « Tide-surge interaction in the English Channel », *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, p. 3709-3718.

IPCC (2007), *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, 996 p.

IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.

Kriebel D. L. (1985) « Numerical simulation of time-dependant beach and dune erosion », *Coastal Engineering*, vol. 9, n ° 3, p. 221-245.

Kwadijk, J. C. J., M. Haasnoot, J. P. M. Mulder, M. M. C. Hoogvliet, A. B. M. Jeuken, R. A. A. van der Krogt, N. G. C. van Oostrom, H. A. Schelfhout, E. H. van Velzen, H. vanWaveren, and M. J. M. de Wit (2010), « Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: a case study in the Netherlands, WIREs », *Clim Change*, 1, p. 729-740.

Laborie, V., F. Hissel, et P. Sergent (2014) « Impact of climate change on Gironde Estuary », *La Houille blanche*, n° 6, 2014, p. 34-39

Lambeck, K., C. D. Woodroffe, F. Antonioli, M. Anzidei, W. R. Gehrels, J. Laborel, and A. J. Wright (2010), « Paleoenvironmental records, geophysical modelling, and reconstruction of sea level trends and variability on centennial and Longer Timescales » in *Understanding sea level rise and variability* [Church, A., P. L. Woodworth, T. Aarup, and W. S. Wilson (eds)]. Wiley-Blackwell, p. 61-121.

Lebreton, P., et C. Trmal (2009) « Impact du changement climatique sur le trait de côte naturel et les ouvrages littoraux » *La Houille Blanche*, 2, p. 45-51.

Lejart, M. (2009), « Étude du processus invasif de *Crassostrea gigas* en Bretagne : état des lieux, dynamique et conséquences écologiques. Ecology, environment » université de Bretagne occidentale, Brest.

Lemoine, J.-P., (2014), *Analyse par modélisation de l'impact de l'élévation du niveau marin sur les niveaux de pleine mer dans l'estuaire de la Seine*, Rapport du GIP Seine-aval, 25 p. Disponible sous le lien : http://seine-aval.crihan.fr/web/attached_file/componentId/kmelia324/attachmentId/33334/lang/fr/name/elevation_niveau_marin_GIPSA2014.pdf.

Le Roy S., R. Pedreros, C. André, F. Paris, S. Lecacheux, F. Marche, and C. Vinchon (2014), « Coastal flooding of urban areas by overtopping: dynamic modelling application to the Johanna storm (2008) in Gâvres (France) », *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2, p. 4947-4985.

Letortu P. (2013), « Le recul des falaises crayeuses haut-normandes et les inondations par la mer en Manche centrale et orientale : de la quantification de l'aléa à la caractérisation des risques induits », Thèse de doctorat (université de Caen Basse-Normandie). 408 p.

Llovel, W., J. K. Willis, F. W. Landerer, and Fukumori I. (2014), « Deep-ocean contribution to sea level and energy budget not detectable over the past decade », *Nature climate Change*, published on line 5 October 2014, doi : 10.1038/NCLIMATE2387.

Marcos M., and M. N. Tsimplis (2008), « Coastal sea level trends in southern Europe », *Geophysical Journal International*, 175 (1), p. 70-82.

Masson-Delmotte, V., M. Schulz, A. Abe-Ouchi, J. Beer, A. Ganopolski, J. F. González Rouco, E. Jansen, K. Lambeck, J. Luterbacher, T. Naish, T. Osborn, B. Otto-Bliesner,

T. Quinn, R. Ramesh, M. Rojas, X. Shao and A. Timmermann (2013), « Information from Paleoclimate Archives » in : *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 384-464.

Menendez, M., and P. L. Woodworth (2010), « Changes in extreme high water levels based on a quasi-global tide-gauge data set », *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 115, C10011, doi : 10.1029/2009JC005997.

Meysignac, B., M. Becker, W. Llovel, and A. Cazenave (2012b), « An assessment of two-dimensional past sea level reconstructions over 1950-2009 based on tide-gauge data and different input sea level grids », *Surveys in Geophysics*, 33(5), p. 945-972, doi : 10.1007/s10712-011-9171-x.

Mimura, N., R.S. Pulwarty, D.M. Duc, I. Elshinnawy, M.H. Redsteer, H.Q. Huang, J.N. Nkem, and R.A. Sanchez Rodriguez (2014), « Adaptation planning and implementation » in *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 869-898.

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte.

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, « Le projet de loi biodiversité est adopté » (24 mars 2015), <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Le-projet-de-loi-biodiversite-est.html>

Nerem, R. S., D.P. Chambers, C. Choe, and G.T. Mitchum (2010) « Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions », *Mar. Geodesy*, 33 (1), p. 435-446.

Nicholls, R. J., S. E. Hanson, J. A. Lowe, R. A. Warrick, X. Lu, and A. J. Long (2014), « Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts », *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(1), p. 129-150.

Nicolle, A, M. Karpytchev, and M. Benoit (2009), « Amplification of the storm surges in shallow waters of the Pertuis Charentais (Bay of Biscay, France) », *Ocean Dynamics*, 59, p. 921-935.

ONERC (2010), « Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatique et des mesures d'adaptation possibles. Synthèse n° 2 » – février 2010 – Direction générale de l'énergie et du

climat/Service du climat et de l'efficacité énergétique/Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique. Disponible sous le lien : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/synth_niveau_mer.pdf.

ONERC (2012), *Les outre-mer face au défi du changement climatique, 2012*, Rapport au Premier ministre et au Parlement, Paris, La Documentation française, 216 p.

ONML, fiche thématique sur les zones basses du littoral métropolitain : http://www.onml.fr/onml_f/fiche.php?id_fiche=72&auth=OK_visu

ONML : fiche thématique sur l'érosion côtière sur le littoral métropolitain : http://www.onml.fr/onml_f/Erosion-cotiere-sur-le-littoral-metropolitain

ONML, fiche thématique sur l'évolution de la population littorale : http://www.onml.fr/onml_f/Densite-de-population-des-communes-littorales-en-2010-et-evolution-depuis-1961-1962

ONRN (2015), Cahiers de l'ONRN n° 2 : Connaissance de la sinistralité pour la prévention des risques naturels. http://www.onrn.fr/site/binaries/content/assets/documents/onrn/publications_2015/15-03-03_onrn_cahiers-2.pdf

Ouzeau G., M. Déqué, M. Jouini, S. Planton, R. Vautard, M. Vrac, sous la direction de Jean Jouzel (2014), *Le Climat de la France au XXI^e siècle*, vol. 4, « Scénarios régionalisés », édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer.

Palanisamy, H., A. Cazenave, T. Delcroix, and B. Meyssignac (2015), « Spatial trend patterns in the Pacific Ocean sea level during the altimetry era: the contribution of thermocline depth change and internal climate variability », *Ocean Dynamics*, p. 1-16.

Petit M. (2009), *Le réchauffement climatique et les tortues marines, synthèse bibliographique des connaissances actuelles*, Te mana o te moana, 35 p.

Petit, V., J. Y. Caous, I. Czernichowski, P. de la Quèrière, 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, 120 p.

Pieau, C. (1995), « Temperature variation and sex determination in reptiles » in *BioEssays*, vol. 18, n°1.

PIGB, COI, SCOR (2013), Acidification des océans Résumé à l'intention des décideurs – Troisième Symposium sur « L'océan dans un monde avec un taux élevé de CO₂ ».

Programme international sur la géosphère et la biosphère, Stockholm (Suède). (IOC/BRO/2013/5)

Projet de loi adopté par l'Assemblée nationale pour la reconquête de la biodiversité de la nature et des paysages, <http://www.senat.fr/leg/pjl14-359.html>

Range, P., M. A. Chícharo, R. Ben-Hamadou, D. Piló, M. J. Fernandez-Reiriz, U. Labarta and L. Chícharo (2014), « Impacts of CO₂-induced seawater acidification

on coastal Mediterranean bivalves and interactions with other climatic stressors », *Regional Environmental Change*, 14(1), p. 19-30.

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

Stive, M. J. F. (2004), « How important is global warming for coastal erosion? An editorial comment », *Climatic Change*, 64 (1–2), p. 27-39.

Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, N.L. Bindoff, F.-M. Breon, J.A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J.M. Gregory, D.L. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. Krishna Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan et S.-P. Xie (2013), « Résumé technique », in *Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques*. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Stocker, .F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (dir. Pub.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (NY), États-Unis d'Amérique.

Testut, L., G. Wöppelmann, B. Simon, and P. Téchiné (2006), « The sea level at Port-aux-Français, Kerguelen Island, from 1949 to the present », *Ocean Dynamics*, 56(5-6), p. 464-472.

UICN France (2013), *Panorama des services écologiques fournis par les milieux naturels en France – vol. 2.2 : les écosystèmes marins et côtiers*, Paris, France.

Van de Walle I., R. Picard, G. Dubois et J.P. Ceron TEC – CREDOC (2009), *Climat, météorologie et fréquentation touristique*, rapport final.

Waelbroeck, C., L. Labeyrie, E. Michel, C. Duplessy, J.F. McManus, K. Lambeck, E. Balbon, and M. Labracherie (2002), « Sea level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic 4 records », *Quaternary Science Reviews*, 21, p. 295-305.

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

Wong, P. P., I. J. Losada, J.-P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K. L. McInnes, Y. Saito, and A. Sallenger (2014) « Coastal systems and low-lying areas » in *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C. B., V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea,

and L. L. White (eds.]). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA361-409.

Woodworth, P. L., M. Menendez, and W. R. Gehrels (2011), «Evidence for century-timescale acceleration in mean sea levels and for recent changes in extreme sea levels», *Surveys in Geophysics*, 32(4-5), p. 603-618, doi : 10.1007/s10712-011-9112-8.

Wöppelmann, G., N. Pouvreau, and B. Simon (2006), «Brest sea level record : a time series construction back to the early eighteenth century», *Ocean Dynamics*, 56(5-6), p. 487-497, doi : 10.1007/s10236-005-0044-z.

Wöppelmann, G., N. Pouvreau, A. Coulomb, B. Simon, and P. L. Woodworth (2008), «Tide gauge datum continuity at Brest since 1711: France's longest sea-level record», *Geophysical Research Letters*, 35, L22605.

Wöppelmann, G., M. Marcos, A. Coulomb, B. Martin-Miguez, P. Bonnetain, C. Boucher, M. Gravelle, B. Simon, and P. Tiphaneau (2014), «Rescue of the historical sea level record of Marseille (France) from 1885 to 1988 and its extension back to 1849-1851», *Journal of Geodesy*, 88, p. 869-885.

Zijlema, M., G. Stelling, and P. Smit (2011), SWASH, «An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters», *Coastal Engineering*, 58, p. 992-1012.

Rapport d'activité de l'Observatoire



Créé par la loi en 2001, article L229-1 et suivants du code de l'environnement, l'ONERC est rattaché au ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE) via le service « Climat et efficacité énergétique » de la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC).

L'ONERC est présidé par M. le sénateur Paul Vergès et dirigé par M. Laurent Michel, directeur général de l'énergie et du climat. Le secrétariat général est assuré par M. Nicolas Bériot assisté de quatre chargés de mission, dont un ingénieur documentaire-webmestre. L'ONERC constitue le « pôle Adaptation » de la DGEC, en charge du pilotage de la politique nationale d'adaptation. Il assure également la fonction de point focal de la France au sein du GIEC. Cette annexe, sans être exhaustive, présente les principales actions impliquant l'ONERC depuis septembre 2014 jusqu'à septembre 2015.

Action internationale

Du fait de la publication du 5^e rapport d'évaluation du GIEC, la fonction de point focal du GIEC pour la France a occupé une large part des activités internationales de l'Observatoire en 2014 et 2015. En outre, l'ONERC participe régulièrement à d'autres travaux internationaux notamment au niveau de l'Union européenne, de l'océan Indien, du bassin Méditerranéen et a développé des relations multilatérales et bilatérales avec les services en charge des politiques publiques d'adaptation dans plusieurs pays.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)

En tant que point focal du GIEC pour la France, l'ONERC a organisé une conférence de presse et un colloque à l'occasion de la publication de la synthèse du 5^e rapport d'évaluation. Le Dr R. Pachauri, président du GIEC, y a exposé les points clés de la synthèse en présence d'acteurs des politiques climatiques et de journalistes. S'appuyant sur le travail de chercheurs français, l'ONERC a publié, dans les jours suivant l'adoption, une traduction provisoire du résumé pour décideurs de la synthèse afin de faciliter la diffusion rapide des résultats au sein de la communauté francophone.

Pour accompagner ces événements, le livret « Mieux comprendre le GIEC », élaboré avec l'appui de la Direction de la communication du MEDDE, a été réédité pour une diffusion dépassant désormais 5 000 exemplaires. Les fiches accompagnant le livret ont été complétées par un encart reprenant les grandes conclusions de la synthèse.



OBSERVATIONS

- TEMPÉRATURE**: **+0,85 °C** ENTRE 1880 ET 2012. C'est l'augmentation de la température (moyenne mondiale) combinée et saisonnière.
- NIVEAU DES MERS**: **+19 cm** ENTRE 1993 ET 2010. C'est l'élévation du niveau moyen des mers.
- PH DE L'OcéAN**: **-0,1 unité** DEPUIS LE DÉBUT DE L'ÈRE INDUSTRIELLE. C'est la diminution du pH due au fait de l'absorption de dioxyde de carbone.
- GES**: **En 10 ans*** ON A ÉMIS 100 GIGAOGRAMMES DE CO₂, CH₄, N₂O. On a émis 100 Gt de gaz à effet de serre principaux depuis qu'on a commencé à brûler des combustibles fossiles en 1750.

IMPACTS

De nombreuses espèces animales voient leur aire de répartition, leurs activités saisonnières, leur schéma de migration et leur occasion d'élever un jeune se réduire ou disparaître. Les interactions entre les espèces se modifient aussi. Dans certaines régions du monde, le changement climatique a élargi l'impact négatif que posent sur le rendement des cultures.

PROJECTIONS

Pour avoir une chance de maintenir un réchauffement à 2 °C (probabilité supérieure à 66 %) à la fin les émissions totales de CO₂ à environ 2 600 gigatonnes. Entre 1870 et 2011, on a émis 2,3 de carbone sous forme de CO₂. Au-delà de 2100, de nombreux aspects du changement climatique et leurs impacts associés continueront pendant des siècles, même si les émissions de GES cessent. Le risque de changement abrupt et irréversible augmente au même temps que l'ampleur du réchauffement. L'adaptation et l'atténuation sont des stratégies complémentaires pour réduire et gérer les risques liés au changement climatique.

EXTRÊMES

Des changements dans de nombreux phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes ont été observés depuis 1950 environ. Certains de ces changements ont été associés à des influences humaines, y compris une diminution des événements extrêmes de températures froides, une augmentation des événements extrêmes de températures chaudes, une augmentation des événements extrêmes de hauts niveaux de la mer et une augmentation du nombre d'événements de fortes précipitations dans un certain nombre de régions.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Le changement climatique est une menace pour le développement durable. Cependant, des approches novatrices atténuent, évitent et réduisent les risques. Elles offrent de nombreuses opportunités de développement.

ONERC Observatoire National sur les Effets du Changement Climatique

Fiche récapitulative des éléments clés de la synthèse du 5^e rapport d'évaluation du GIEC.

Lors des assemblées plénières du GIEC, Nicolas Bériot coprésidé le comité financier. Les assemblées plénières du GIEC ont finalisé et approuvé à l'unanimité des 195 pays membres le 5^e rapport d'évaluation. Ces assemblées ont permis également de consolider les règles et procédures de l'institution préalablement à l'élection d'un nouveau bureau en octobre 2015. L'ONERC coordonne le versement de la contribution française au budget du GIEC émanant de trois ministères : Affaires étrangères, Recherche et Développement durable. Enfin, l'ONERC appuie la participation des chercheurs français aux travaux du GIEC en prenant en charge une partie des missions des experts.

Dans le prolongement des travaux du GIEC, la communauté scientifique a organisé à Paris une grande conférence scientifique à l'Unesco, en juillet 2015, intitulée « *Our common future under climate change* » à laquelle l'ONERC a contribué notamment en animant une session sur les savoirs indigènes.

Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC)

L'ONERC a participé à la 20^e session de la Conférence des Parties à la CCNUCC ayant eu lieu en décembre 2014 à Lima, à un atelier d'experts sur le Système mondial d'observation du climat (SMOC) et à l'intersession de Bonn au printemps 2015. L'ONERC assure une fonction d'appui scientifique et technique au sein de l'équipe de négociations climatiques, notamment en préparation de la

conférence Paris climat 2015 (COP21) pour les aspects relatifs aux sciences climatiques et aux politiques publiques d'adaptation.

En appui d'initiatives des postes diplomatiques visant à mobiliser le plus largement possible les acteurs en vue de la COP21, l'ONERC a participé à plusieurs opérations de sensibilisation aux politiques publiques climatiques et de relais d'informations scientifiques : soit directement sur place, soit en préparant des supports de communication spécifiques (exemples : Australie, Norvège, Bulgarie, Roumanie, République tchèque, Japon, Turquie, Bosnie, Mozambique, Chine, Royaume-Uni, Thaïlande). L'ONERC a également appuyé certaines ambassades étrangères en France pour la mise au point d'événements de même nature.



Tour de France du Climat, photo collective autour de la sphère du ministère, sur les marches de la Grande Arche de La Défense, 31 mars 2015.

© Arnaud Bouissou MEDDE-MLETR.

En appui des travaux du GIEC et des négociations de la CCNUCC, l'ONERC participe à un groupe informel d'experts européens (ex EGSci) visant à construire une vision collective au sein de l'espace européen des sujets scientifiques, en appui des équipes de négociation.

En vue de renforcer les synergies, au niveau international, entre prévention des risques et adaptation au changement climatique, l'ONERC a participé activement aux négociations du nouveau cadre international d'action pour la réduction des risques de catastrophes (déclaration de Sendai de la stratégie internationale de réduction du risque de catastrophe des Nations unies).

Espace européen

Représentant la DGEC, l'ONERC siège pour la France au sein du groupe de travail mis en place par la Direction générale Climat de la commission européenne pour le suivi de la mise en œuvre de la stratégie européenne d'adaptation adoptée en 2013. Dans ce cadre, l'ONERC met à jour annuellement les informations concernant les actions d'adaptation de la France par l'intermédiaire des documents de suivi (*MMR adaptation*) sur la plate-forme d'échange *Climate Adapt* (<http://climateadapt.eea.europa.eu/>) et participe aux travaux préparatoires à l'élaboration d'un cadre d'évaluation des politiques d'adaptation (exemple : *adaptation scoreboard*) conduits par l'Agence européenne de l'environnement.



The screenshot shows the 'European Climate Adaptation Platform' website. The header includes the 'Climate ADAPT' logo, navigation links (Sign In, Glossary, Contact, Sitemap, Legal notice, About, Help), and a search bar. The main navigation bar lists 'Home', 'Adaptation information', 'EU Adaptation Policy', 'Countries, regions, cities', 'Tools', 'Links', 'Search the database', and 'Newsletter'. Below this, there are sub-navigation links for 'General', 'Countries', 'Transnational regions', and 'Cities and towns'. The main content area is titled 'France' and features a map of Europe with France highlighted. A dropdown menu labeled 'Choose a country' is visible. Below the map, there are tabs for 'Legal framework', 'Assessments', 'Priority sectors', 'Local actions', 'Summary', and 'Contact'. The 'Legal framework' tab is active, displaying text about the responsibility for climate change adaptation in France, split between national, regional, and local levels. It lists several key events and laws, including the creation of ONERC in 2001, the adoption of the National Adaptation Strategy in 2006, and the implementation of the Grenelle Environment Forum in 2009. It also mentions the National Adaptation Plan published in 2011 and the Regional Climate, Air and Energy Schemes (SRCAE) and local adaptation actions designed within Territorial Climate-Energy Plans (PCEET) under the provisions of Law 2010-788 of 12 July 2010. At the bottom of the page, there are logos for the European Commission and the European Environment Agency.

Plate-forme d'échange européenne « Climate Adapt ».

En relation avec l'Agence européenne de l'environnement (AEE) et sous la coordination du CGDD/SOeS, l'ONERC fait partie du groupe de travail fédéré dans le réseau Eionet rassemblant les correspondants de l'AEE intéressés par les problématiques d'observation des effets du changement climatique et de l'adaptation. À ce titre, l'ONERC a participé à la réalisation d'un rapport thématique sur les transports en Europe.

Initiatives multilatérales et bilatérales

L'ONERC a présidé un groupe d'échange franco-chinois sur les questions liées à l'énergie et au changement climatique mis en place par le ministère des Affaires étrangères et du développement international et le MEDDE. Ce groupe a permis plusieurs échanges techniques à haut niveau tant en Chine qu'en France métropolitaine.

Dans le cadre de l'enseignement des langues étrangères à l'École nationale de la météorologie (Météo-France), l'ONERC bénéficie de la traduction en anglais de certaines publications par les élèves ingénieurs en formation initiale. Cette action contribue à faciliter la diffusion des travaux français et à appuyer les interventions internationales de l'ONERC.

Plan national d'adaptation au changement climatique

Le premier Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) a été publié en juillet 2011 pour une période de cinq années. Les actions relatives au PNACC en matière d'évaluation ou de contenu thématique ont fait l'objet d'une attention spécifique dans le cadre de la conférence environnementale 2014 et font partie à ce titre des priorités de la feuille de route ministérielle associée, publiée au printemps 2015.

Dans le cadre de l'appui à la phase de diagnostic de l'évaluation du PNACC confiée au Conseil général de l'écologie et du développement durable par Madame la ministre de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, l'ONERC a accueilli, en stage long, un étudiant de l'Institut d'études politiques de Grenoble afin de constituer un état des lieux de la mise en œuvre du PNACC.



Frise chronologique du premier Plan national d'adaptation au changement climatique.

En complément, l'ONERC a accueilli, en stage long, une étudiante de l'Institut d'études politiques de Paris et de l'université Pierre-et-Marie-Curie pour appuyer la préparation du renforcement de l'intégration de la biodiversité dans le Plan national d'adaptation au changement climatique tel que cela a été demandé dans la feuille de route ministérielle issue de la conférence environnementale 2014.

Outils et intégration de l'adaptation

Contribution aux activités d'adaptation

L'ONERC participe à de nombreuses initiatives dans le domaine des impacts, de la vulnérabilité et de l'adaptation ainsi que dans le domaine amont des sciences de l'atmosphère, notamment :

- au programme de recherche et d'innovation GICC (Gestion et impacts du changement climatique) piloté par le Commissariat général au développement durable ;
- à la conférence environnementale ;
- aux actions ministérielles et interministérielles relatives à l'adaptation (exemple : suivi du « Plan national Canicule », suivi de la stratégie de gestion intégrée du trait de côte) ;
- à certaines initiatives régionales, territoriales ou associatives (Ville de Paris, Île-de-France, Picardie, Rhône-Alpes, Nantes métropole, Loiret, Plaine commune, Limousin, etc.) ;
- au Club ViteCC (CDC Climat) destiné aux acteurs territoriaux de l'adaptation ;
- à des activités d'adaptation au changement climatique portées par le Fonds français pour l'environnement mondial et l'AFD ;
- événements organisés par les collectivités territoriales.

Les agents de l'ONERC ont fortement contribué à de nombreux événements organisés dans le cadre de la conférence Paris climat 2015 (COP21).

Projet de recherche Adamont

Dans le cadre du programme de recherche Gestion et impacts du changement climatique (GICC) du MEDDE, l'ONERC cofinance le projet de recherche Adamont pour une période de trois ans. Le projet, coordonné par l'IRSTEA, est conduit en partenariat avec Météo-France. Il vise à développer une action de recherche partenariale et intégrée sur l'adaptation au changement climatique sur un territoire de moyenne montagne, qui associe production de connaissances et démarche opérationnelle en lien avec le changement climatique et les pratiques à faire évoluer.

Les terrains d'étude pour ce projet sont les parcs naturels régionaux de la région grenobloise (PNR du Vercors comme terrain principal et PNR des Bauges, de Chartreuse et des Baronnies provençales comme terrains satellites), territoires partenaires sensibles au changement climatique et permettant de prendre en compte une diversité de gradients, tant climatique qu'altitudinal, social, économique et écologique.

Le portail de l'adaptation

Afin de donner encore plus de visibilité au sujet de l'adaptation et aux impacts du changement climatique, le site web de la DGEC incorpore à différentes rubriques les éléments élaborés sur la base des travaux de l'ONERC. La rubrique consacrée

à l'adaptation constitue désormais un véritable portail pour la thématique, avec des périodes très actives de consultation qui ont enregistré jusqu'à 30 000 pages vues en un mois. La rubrique « Suivi et évaluation » du PNACC est mise en avant compte tenu du déroulement du bilan final dont le rapport de diagnostic est attendu fin octobre 2015. La rubrique « Adaptation » met également en avant les outils principaux de l'adaptation comme les rapports de la mission coordonnée par Jean Jouzel (série « Le climat de la France au xxi^e siècle ») ou le site « Drias les futurs du climat » (projection climatique en accès libre et gratuit).

En complément des projections climatiques accessibles sur « Drias les futurs du climat » la publication des volumes 4 (*projections régionalisées*) et 5 (*hausse du niveau marin*) marque une étape importante dans la diffusion d'informations scientifiques à destination des acteurs de l'adaptation. En effet, ces deux volumes constituent la synthèse, pour les territoires français, des informations les plus récentes en phase avec le 5^e rapport d'évaluation du GIEC. Les principales conclusions ont été présentées devant plus de 200 personnes réunies pour l'occasion à l'hôtel de Roquelaure.



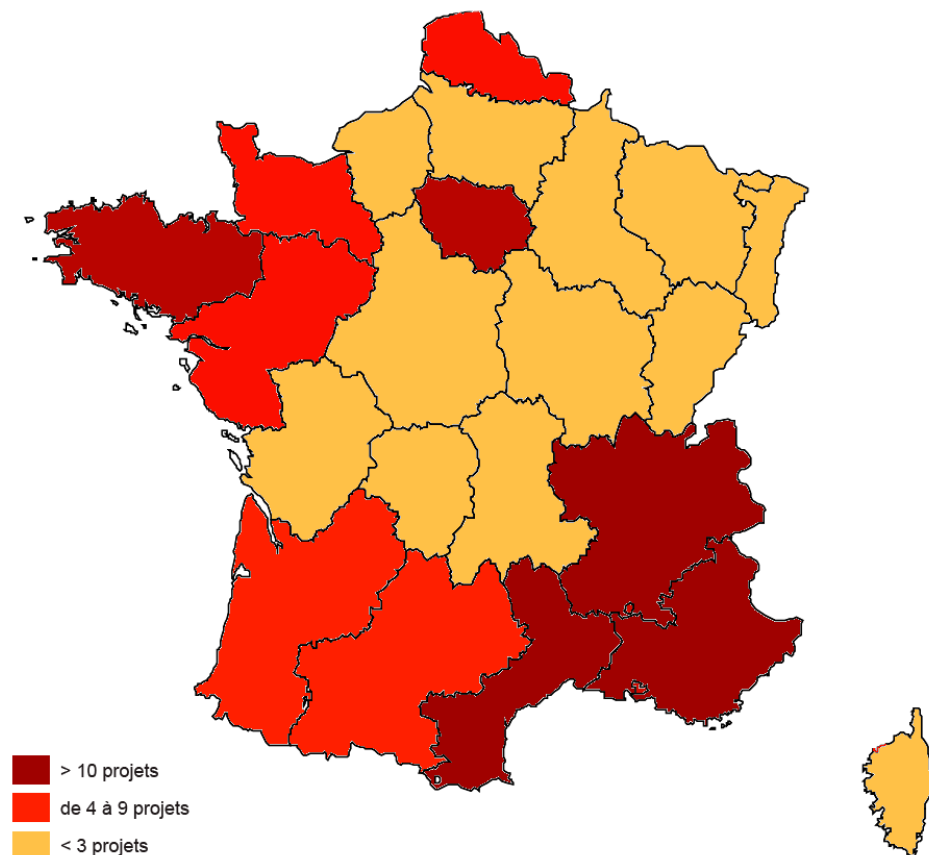
Conférence de présentation du Volume 5 de la série « Le climat de la France au xxi^e siècle ».

© MEDDE/SG/DICOM

Base de données des projets de recherche

L'ONERC a mis en ligne à l'automne 2011 une base de données recensant des projets de recherche sur le changement climatique et l'adaptation. Prévue par le PNACC, cette base de données a pour but de faciliter et d'accélérer la diffusion des résultats de la recherche. Elle rassemble des informations sur des projets menés actuellement par des équipes françaises ou achevés depuis 2008.

Développée en partenariat avec le Groupement d'intérêt scientifique climat-environnement-société, cette base est régulièrement enrichie. Les 76 projets présents lors de l'ouverture (décembre 2011) ont été largement complétés puisque, en septembre 2015, la base recense 270 projets. Une valorisation spécifique visant à mieux faire connaître cet outil spécialisé a été effectuée en 2015.



Terrains d'études répertoriés dans la base de données des projets de recherche.

Information, formation et communication

L'ONERC assure ses missions d'information et de communication en étroite collaboration avec la Direction de la communication (Dicom) du MEDDE. Ces actions visent tous les publics par l'intermédiaire de différents supports dont certains sont présentés ci-après. L'ONERC apporte son soutien en matière de réalisation de supports d'information sur l'adaptation au changement climatique pour différents organismes (services déconcentrés du MEDDE, administrations centrales y compris hors MEDDE, communication interne au MEDDE, établissements publics, organisations non gouvernementales, presse, associations).

Rapports annuels

Le rapport annuel « L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change » a été publié à l'automne 2014 et diffusé directement à plus de 2 000 destinataires. Il dresse un panorama des enjeux de l'adaptation au changement climatique pour l'arbre et la forêt en France métropolitaine. Ce rapport a été présenté à plusieurs reprises auprès de professionnels de la filière bois et auprès d'agent du ministère chargé de l'Agriculture et remis par le président de l'ONERC, Paul Vergès, à Madame la ministre de l'Écologie du Développement durable et de l'Énergie, Ségolène Royal.



La ministre Ségolène Royal s'est vu remettre le 11 février 2015 le rapport sur « L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change » par le sénateur de La Réunion, Paul Vergès, président de l'ONERC.

Source : © MEDDE/SG/DICOM

Lettre trimestrielle aux élus

La lettre de l'ONERC aux élus, diffusée à 5 800 exemplaires, connaît toujours un succès important notamment en raison de son format concis et du ton direct des articles. En complément de l'édition, la lettre est aussi diffusée sous forme dématérialisée à plus de 400 destinataires. Les numéros 22 à 25 ont traité respectivement les thèmes « Climatisation et Rafraîchissement », « Arbre et forêt », « Transition énergétique » et « Conférence Paris Climat 2015 ». La lettre aux élus est désormais accompagnée d'un encart sur un indicateur du changement climatique afin d'illustrer le thème traité par des données et des témoignages d'experts.



Le climat change, agissons ! n°23 « Sols et sécheresse » mai 2015.

Sélection d'informations thématiques (lettre de veille technique)

La lettre de veille technique contient une sélection d'une vingtaine de liens web classés selon les catégories « Actualités », « Publications » et « Manifestations » ainsi que quelques informations relatives à l'Observatoire. Ces informations ciblées sont diffusées, tous les deux mois, à plus de 800 abonnés (une cinquantaine seulement jusqu'en 2012) et accessibles en ligne. En complément, l'ensemble des manifestations recensées alimente un agenda des événements accessible en ligne.

Actions de formation et séminaires

Une session de sensibilisation sur le portail « Drias les futurs du Climat » a été réalisée auprès d'une centaine d'agents des ministères du Développement durable et de l'Économie dans le cadre du cycle de formation « Défi Climat ». Plusieurs actions de formation au sein d'établissements d'enseignement supérieur sont assurées par l'ONERC (exemples : AgroParisTech, École nationale de la météorologie, PontsParisTech, etc.) ou de publics spécialisés (exemples : grandes entreprises, journalistes radio et télévision, ateliers de recherche).

Exposition pédagogique itinérante

L'exposition pédagogique itinérante, composée de 13 panneaux autoportants, est mise à disposition gratuitement sur simple demande à l'ONERC. Alors, qu'en 2014, l'exposition a été présentée 100 jours seulement, les dix premiers mois de l'année 2015 enregistrent déjà plus de 400 jours d'exposition¹, attestant de l'intérêt croissant de la société pour la problématique du changement climatique à la veille de la grande conférence Paris 2015. Compte tenu de l'obsolescence de certains éléments, la diffusion de cette exposition a été remplacée à l'été 2015 par deux expositions complémentaires. L'une visant un public averti à des fins d'explication des phénomènes et l'autre visant un public le plus large possible à des fins de sensibilisation. La première exposition a été conçue avec l'appui de Météo-France et de l'IPSL au cours de l'année 2015 sur la base des derniers éléments publiés par le GIEC. Les deux expositions ont bénéficié du travail de l'équipe spécialisée au MEDDE conférant ainsi aux différents supports un univers graphique proche.

Grand public

Dans le cadre d'un partenariat pluriannuel avec l'association Météo et Climat, présidée par Jean Jouzel, les supports d'information réalisés par la Direction générale de l'énergie et du climat avec l'appui de l'ONERC ont été diffusés lors des journées scientifiques 2014 dédiées à la qualité de l'air et du Forum international de la météorologie au printemps 2015. De plus, l'ONERC a diffusé, au sein de son réseau, 200 exemplaires du numéro spécial de la revue *La Météorologie* (éditée par Météo et Climat) consacrée au 5^e rapport d'évaluation du GIEC.



Visite de madame la ministre, Ségolène Royal, au 12^e Forum international de la météo et du climat.

Source : © MEDDE/SG/DICOM

L'ONERC a contribué, en partenariat avec l'Ademe, à la réalisation par le Réseau action climat d'un kit pédagogique² de présentation du 5^e rapport d'évaluation du GIEC progressivement diffusée en 2014 et 2015.

1. Valeur provisoire au 30 septembre 2015.

2. www.rac-f.org/IMG/pdf/KIT-2014-V13-web5.pdf

Les indicateurs du changement climatique

Un effort important de mise à jour des indicateurs a été effectué en 2014 et 2015. Ce qui a permis de disposer d'environ 80 % d'indicateurs intégrant des données de moins de cinq ans. En parallèle, la conception des encarts sur les indicateurs associée aux lettres aux élus a également permis de valoriser ces mises à jour récentes par des représentations graphiques attractives. Ainsi, la présentation des indicateurs sur le site web s'effectue désormais dans la majorité des cas par une lecture progressive d'informations de plus en plus techniques : d'un message-clé illustré jusqu'au jeu de données brutes en passant par le commentaire de l'expert.

En 2015, deux nouveaux indicateurs, élaborés par Météo-France, ont rejoint la série diffusée par l'ONERC : l'indicateur de sécheresse de sol dérivé du projet « Climsec » et l'indice de risque de feux météorologique dérivé des travaux de la mission interministérielle relative aux feux de forêt.

INDICATEUR du changement climatique
Sécheresse annuelle en métropole
Cet indicateur recense les épisodes de sécheresse de la France métropolitaine. Il est basé sur la définition de l'ONERC (Observatoire National des Evénements et Risques Climatiques) et est normalisé de façon à rendre possible la comparaison de l'indicateur de sécheresse de la France métropolitaine avec celui de la France entière.

LA PAROLE À... Jean-Michel Soubeyroux, climatologue
L'indicateur de sécheresse annuelle en métropole provient du projet Climsec. Il ne mesure pas la sécheresse météorologique (le déficit de précipitation), mais la sécheresse des sols. Les données sont issues de modélisation et non de mesures directes in situ. Il agrandit la famille des indicateurs de sécheresse de la France métropolitaine. L'analyse des impacts qui ne s'observe pas facilement. Évalué scientifiquement depuis plus de 20 ans, l'indicateur est utilisé de façon opérationnelle par les services hydrologiques, notamment dans le cadre des comités sécheresse. Autre aspect spécifique, l'indicateur étudie des extrêmes et non des moyennes. Il nous aide ainsi à appréhender un des enjeux majeurs du changement climatique. Il doit permettre aussi de convaincre les décideurs que des sécheresses comme celle de 2003 ou 2011 vont se reproduire et devenir de plus en plus fréquentes.

2005-2014 : au cours de la dernière décennie, les surfaces touchées par la sécheresse ont dépassé 8 millions sur 10 la moyenne (99% à 100%).

INDICATEUR du changement climatique
Bonne pratique
BANS LE GARD Cultiver sous des parasols vivants, les arbres
Terres à la recherche d'acheteurs. Cela aurait pu être la pancarte plantée sur le terrain de Viéville, dans le Gard, au moment où Denis Florès s'en est porté acquiescent en 2010. Les terres étaient en vente depuis 10 ans, mais personne n'en voulait. Leur défaut : on y trouve des arbres. Denis Florès, papa en bio, y cultive depuis, à l'ombre des toyers et des peupliers, des légumes et des céréales. Il a dû couper ses peupliers hauts de 34 mètres devenus adultes, mais a planté des arbres fruitiers. L'arbre sert de parasol. L'utile très peu d'eau, car on est à l'abri du soleil direct. Et ça ne déshydrate jamais à outrance. En bio et en agriculture, l'arbre nourrit le sol, l'enrichit, le structure. Ce même sol, qui ne s'échauffe jamais, nourrit la plante.

LE CHIFFRE
92% de surfaces agricoles en France métropolitaine affectées par la sécheresse en 2014.

Surface de la France affectée annuellement par la sécheresse sur la période 1959-2014

Afin de remédier au problème récurrent de sécheresse des sols, les agriculteurs vont devoir s'adapter en modifiant leur mode de production (agro-écologie, irrigation en goutte à goutte...), leur type de céréales (du blé plus que du maïs), voire en envisageant des mesures de rupture telles que la reforestations ou la modification de leurs types de cultures (arbres fruitiers, maraîchage...).

ONERC
Observatoire National des Evénements et Risques Climatiques

Encart indicateur «Indice de sécheresse annuelle en métropole» de la lettre *Le climat change, agissons !* n° 23.

Statistiques de fréquentation

L'accroissement significatif de la fréquentation du site de l'ONERC (cf. tableau ci-après) au cours des années 2013 et 2014 s'est stabilisé en 2015 à environ 10 000 visites et 20 000 pages vues en moyenne chaque mois. L'évolution de

la fréquentation atteste d'un intérêt grandissant de la thématique auprès d'un public de plus en plus large.

Année	2010	2011	2012	2013	2014	2015 *
Visites (mensuelles moyennes)	2 304	2 061	2 998	5 944	9 157	9 749 (valeur provisoire)
Pages vues (mensuelles moyennes)	5 405	5 349	7 639	14 101	20 024	20 665 (valeur provisoire)
Événements nationaux	Concertation du PNACC	Lancement du PNACC	Ouverture DRIAS les futurs du climat	Vol. 1 AR5 (GIEC)	Vol. 2 et 3 et synthèse AR5 (GIEC) Vol. 4 « Climat de la France au XXI ^e siècle »	Vol. 5 « Climat de la France au XXI ^e siècle » « Diagnostic du PNACC »

* Données provisoires sur la base des neuf premiers mois de l'année.

Annexes



Annexe I

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AEE	Agence européenne de l'environnement
AFD	Agence française de développement
AVISO	Archiving, Validation And Interprétation Of Satellite Oceanographic Data
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
CatNat	Garantie catastrophes naturelles
CCNUCC	Convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques
CCR	Caisse centrale de réassurance
CDC	Caisse des dépôts et consignations
CEA	Commissariat à l'énergie atomique
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CERFACS	Centre européen de recherche et de formation avancées en calcul scientifique
CETE	Centre d'études techniques de l'équipement
COP	Convention of the Parties (CNUCC)
CTeesMes	Commission technique d'étude et d'évaluation des surcotes marines dans l'estuaire de la Seine
CETMEF	Centre d'études techniques maritimes et fluviales
CGDD	Commissariat général au développement durable
CHARM	CHAnnel integrated approach for marine Resource Management
CIRIA	Construction Industry Research and Information Association
CMIP	Climate Models Intercomparison Project
CNRM	Centre national de recherches météorologiques
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
COM	Collectivités d'outre-mer
CORDEX	Coordinated regional climate downscaling experiment
CREDOC	Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie
DiCom	Direction de la communication du medde
DGALN	Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (MEDDE)
DGEC	Direction générale de l'énergie et du climat (MEDDE)
DGPR	Direction générale de la prévention des risques (MEDDE)
DOM	Département d'outre-mer
DRIAS	Donner accès aux scénarios climatiques régionalisés français pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et environnements
FAO	Food And Agriculture Organization
FEDER	Fonds européen de développement régional
FFSA-GEMA	Fédération française des sociétés d'assurance – Groupement des entreprises mutuelles d'assurance
GES	Gaz à effet de serre
GICC	Gestion et impact du changement climatique – Programme de recherche du MEDDE
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIZC	Gestion intégrée des zones côtières
GPS	Global Positioning System
Ifremer	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
IRD	Institut de recherche pour le développement
IRSTEA	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture
LEGOS	Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiale
LICCo	Littoraux et changements côtiers – Living with a Changing COast
LIENS	Littoral environnement et sociétés
LSCE	Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement
MEDDE	Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie
MIACA	Mission d'aménagement de la côte aquitaine
MISTRALS	Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales
MRN	Mission risques naturels
NSCMG	North Sea Coastal Managers Group
ONEMA	Office national de l'eau et des milieux aquatiques
ONERC	Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique
ONRN	Observatoire national des risques naturels
PAPI	Plan d'action de prévention des inondations
PESETA	Projection of Economic Impacts of Climate Change in Sectors of the European Union Based on Bottom-Up Analysis
PGRI	Plan de gestion des risques d'inondation
PIGB	Programme international sur la géosphère et la biosphère
PLU	Plan local d'urbanisme
PNACC	Plan national d'adaptation au changement climatique
PNR	Parc naturel régional
PNUE	Programme des Nations unies pour l'environnement
PPRL	Plan de prévention des risques littoraux
PRU	Projet de renouvellement urbain
PSMSL	Permanent Service for Mean Sea Level
PSR	Plan submersions rapides
RCAO	Regional Coupled Atmosphere-Ocean model
RCP	Representative Concentration Pathway
REFMAR	Réseaux de référence des observations marégraphiques
RGCU	Réseau génie civil et urbain
ROLNP	Réseau du littoral normand et picard
SCOT	Schéma de cohérence territoriale
SNGRI	Stratégie nationale de gestion des risques d'inondations
SHOM	Service hydrographique et océanographique de la marine
SMP	Shoreline Management Plan
SNGRI	Stratégie nationale de gestion des risques d'inondations
SNRH	Service des risques naturels et hydrauliques de la DGPR
SOeS	Service de l'observation et des statistiques
SONEL	Système d'observation du niveau des eaux littorales
SPM	Summary for Policy Makers
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
TGN	garantie « Tempête, Grêle, poids de la Neige sur les toitures
TRI	Territoire à risque inondation
UE	Union européenne
ZAC	Zone d'aménagement concerté
ZNIEFF	Zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique

Annexe 2

CONTRIBUTEURS ET REMERCIEMENTS

Cet ouvrage a été réalisé sous la direction de Laurent Michel, directeur de l'Observatoire national des effets du réchauffement climatique, et de Nicolas Bériot, secrétaire général.

Auteurs :

Isabelle Bellin, Technoscope

Vincent Bourcier, MEDDE/ONERC

Éric Brun, MEDDE/ONERC

Anny Cazenave, CNES

Sébastien Colas, MEDDE/CGDD, Observatoire national de la mer et du littoral

Stéphane Costa, Université de Caen Basse Normandie

Jean-Karl Deschamps, 1er vice-président de la région Basse-Normandie (interviewé par Clotilde WARIN, MEDDE/SG/DICOM)

Olivier Douez, BRGM

Jérôme Duvernoy, MEDDE/ONERC

Pierre Gaufrès, CEREMA

Mireille Guignard, MEDDE/DGALN

Nick Hardiman, conseiller au Département des inondations et du risque littoral à l'Agence de l'environnement en Angleterre (interviewé par Clotilde WARIN, MEDDE/SG/DICOM)

François Hissel, ONEMA

Thierry Hubert, MEDDE/DGPR

Déborah Idier, BRGM

Didier Jourdan, SHOM

Vanessya Laborie, CEREMA

Antoine Lafitte, Plan Bleu

Roseline Laroche, MEDDE/DGPR

Sylène Lasfargues, MEDDE/ONERC

Gonéri Le Cozannet, BRGM

Boris Leclerc, MEDDE

Régis Leymarie, Conservatoire du littoral

Sylvain Mondon, MEDDE/ONERC

Alexandre Pauthonnier, IGN

Olivier Paz, maire de Merville, président de la communauté de communes Campagne et baie de l'Orne (interviewé par Clotilde WARIN, MEDDE/SG/DICOM)

Vincent Petit, BRGM

Serge Planton, Météo-France/CNRM

Amélie Roche, CEREMA

Patrick Santurette, Météo-France

Philippe Sergent, CEREMA

Yves-Marie Tanguy, SHOM

Personnes ayant contribué à la relecture :

Vincent Bourcier, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique

Éric Brun, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique

Pascal Douard, Conseil général de l'environnement et du développement durable

Jérôme Duvernoy, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique

Sylvain Mondon, Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique

Tout comme sur la plupart du globe, les littoraux de France métropolitaine et outre-mer sont des zones concentrant des enjeux majeurs. Une démographie et une urbanisation en forte croissance, des activités socio-économiques très dynamiques et des espaces naturels abritant une riche biodiversité caractérisent ces territoires, qui subissent les influences conjuguées de l'océan et des terres.

Le présent rapport décrit les premiers signes du changement climatique perçus le long du littoral. En s'appuyant sur les connaissances scientifiques les plus récentes, et notamment celles présentées dans le cinquième rapport du GIEC, il dresse le panorama des évolutions attendues au cours des prochaines décennies et de leurs impacts potentiels. Une attention particulière est portée à la hausse du niveau des mers. À la vingtaine de centimètres de hausse déjà observée depuis 150 ans, devraient s'ajouter encore 26 à 82 cm d'ici la fin du siècle, en fonction des efforts réalisés pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

L'adaptation du littoral à la hausse passée et future du niveau des mers est indispensable. Elle prend déjà forme dans les mesures de prévention prises contre les épisodes de submersion marine. Les travaux en cours sur l'évolution récente du trait de côte permettent de bien distinguer les différentes causes, et de donner ainsi aux décideurs et aux citoyens les clés les meilleures pour assurer le développement durable de ces territoires si précieux.

Un récit d'anticipation nous projette enfin sur une côte du Nord de la France vers les années 2070, illustrant les impacts considérables attendus du changement climatique. Ainsi, apparaît plus clairement la nécessité d'agir pour réduire massivement les émissions futures de gaz à effet de serre tout en s'adaptant aux conséquences inéluctables des émissions passées et actuelles.



Diffusion
**Direction de l'information
légale et administrative**
La documentation Française
Tél. : 01 40 15 70 10
www.ladocumentationfrancaise.fr



Prix : 15 €
ISBN : 978-2-11-010037-5
DF : 5HC39810
Imprimé en France