

## *Impacts à long terme du changement climatique sur le littoral métropolitain*

PROSPECTIVE



Ressources, territoires et habitats  
Énergie et climat  
Prévention des risques  
Développement durable  
Infrastructures, transports et mer

Présent  
pour  
l'avenir

## Remerciements :

Cet ouvrage est le fruit d'une collaboration avec des organismes publics liés au MEDDTL et des institutions extérieures qui œuvrent à la compréhension des effets du changement climatique sur le territoire.

Il a été conduit sous la direction de Claude Spohr

Nous remercions les personnes qui ont contribué à sa rédaction et tout particulièrement :

- Nicole Lenôtre, Gonéri Le Cozannet et Nathalie Dorfliger du BRGM,
- Céline Perhérin, Philippe Sergent et Joël L'Her du CETMEF,
- Pascale Delecluse de METEO France,
- Patrick Gentien et Philippe Gros de l'IFREMER,
- Alexandre Magnan de l'IDDRI

Ce travail a été coordonné par Jean-Claude Cohen et Bernard Dambrin de STRATYS, qui ont animé la réflexion auprès de la Mission prospective. Nous les en remercions également.

Collection « Études et documents » de la Délégation au Développement Durable (DDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD).

Série « Prospective », sous la responsabilité de la Mission prospective.

Titre du document : Impacts à long terme du changement climatique sur le littoral métropolitain.

Directeur de la publication : Dominique Dron

Rédacteur en chef et coordination éditoriale : Nathalie Etahiri

Auteur(s) : sous la direction de Claude Spohr

Maquette-réalisation : Belle Page

Date de publication : Octobre 2011



# *Impacts à long terme du changement climatique sur le littoral métropolitain*

Mission prospective  
Octobre 2011



# Table des matières

Préface	3
Introduction	5
<b>Phénomènes physique globaux</b>	
Élévation de la température (air, mer)	11
Modification du régime des tempêtes	17
Précipitations	19
Stratification marine	21
<b>Effets physiques</b>	
Élévation du niveau moyen de la mer	25
Courants marins (circulation océanique générale, régionale, locale)	29
Modification des vagues à la côte	31
Surcotes	33
<b>Effets sur les milieux</b>	
Submersions marines	39
Érosion – accrétion	43
Acidification de l’océan	47
Accentuation de la salinisation des eaux souterraines littorales	51
Modification de la composition des communautés biotiques	55
Invasions biologiques	57
Nouvelles toxicités pour l’homme	59
<b>Annexes</b>	
Abréviations et sigles	63
Glossaire	65
Bibliographie*	67

\* Notes de bibliographies dans le texte entre crochets.



# Préface

## Le changement climatique, nouvelle dimension du développement durable des territoires littoraux

Avec 7 000 kilomètres de côte pour la seule métropole – et le deuxième espace maritime mondial du fait de ses territoires ultramarins – la France est particulièrement concernée par toutes les évolutions qui concernent ou vont affecter le littoral. Espaces exceptionnellement denses<sup>1</sup>, d'une grande richesse écologique, plus vulnérables et convoités que d'autres, les territoires littoraux sont d'ores et déjà un enjeu majeur de développement durable pour notre pays. Cela sera encore plus le cas demain avec la perspective attendue d'installation dans les départements littoraux de plus de quatre millions d'habitants supplémentaires d'ici 2040 et le développement prévisible de nouvelles activités liées à l'urbanisation, au tourisme, aux énergies renouvelables, à l'aquaculture, au transport maritime...

C'est dans ce contexte de forte croissance démographique et économique qu'il faut d'ores et déjà anticiper un autre facteur de perturbation et d'évolution – appelé lui aussi à jouer un rôle majeur – qui est le **changement climatique**. Depuis des événements comme la tempête XYNTHIA, en février 2010, venant après beaucoup d'autres, on sait que les espaces littoraux sont particulièrement exposés à des risques naturels majeurs. Ce que nous disent les scientifiques, et en particulier ceux du GIEC, c'est que le **changement climatique va sensiblement amplifier ce potentiel de risques** : la montée du niveau moyen des mers, des houles plus fréquentes et plus fortes, le réchauffement et l'acidification des océans, la modification des courants marins, ... auront pour effet une accélération du recul de certaines parties du littoral, des submersions plus fréquentes, une fragilisation des cordons dunaires et des ouvrages de protection, une dégradation des écosystèmes maritimes et côtiers... Et tout cela aura naturellement des répercussions non négligeables sur les dynamiques de développement de ces territoires.

Même s'il existe aujourd'hui encore beaucoup d'incertitudes sur le rythme de modification future des climats – et surtout sur les manifestations locales des phénomènes climatiques à venir – les connaissances ont cependant suffisamment progressés pour que l'on puisse sans attendre commencer à intégrer la variable climatique dans la prospective territoriale. C'est la perspective dans laquelle se situe le présent ouvrage ; et à laquelle il apporte une contribution à ce stade très modeste : faire un état des lieux des savoirs scientifiques sur les risques naturels auxquels sont exposés les espaces littoraux et sur les conséquences physiques attendues liées au changement climatique. Si le document apporte en lui-même peu d'informations sur la géographie des phénomènes concernés son originalité est de croiser le regard de plusieurs

disciplines et d'associer les résultats de travaux menés souvent de manière cloisonnée... par les différents organismes de recherche publique français (BRGM, CEMAGREF, IFREMER, CETMEF, INRA...).

## Prendre en compte l'interdépendance des phénomènes

Les risques pour le littoral sont d'autant plus difficiles à prévoir que **les phénomènes sont interdépendants et leurs effets se combinent** : une élévation du niveau marin peut, par exemple, se conjuguer avec des survenues de tempêtes et des phénomènes de forte marée. Ce sont ces combinaisons de phénomènes qui vont configurer les menaces de submersion, d'érosion et de salinisation des sols et des aquifères, qui constituent les trois principales conséquences de l'élévation du niveau de la mer. La conjugaison de ces menaces **induit des impacts sur les milieux marins et littoraux, sur les ressources (eau, espace, biodiversité...), et enfin sur les activités humaines qui en dépendent. Il existe donc une chaîne d'impacts très active** qui explique pourquoi les grandes tendances climatiques (température, précipitation, niveau de la mer) menacent la vie des hommes sur les littoraux du monde et, en ce qui nous concerne ici, de France métropolitaine.

Une telle situation, combinée avec les incertitudes économiques et démographiques, induit un besoin de travaux de prospective territoriale, pour apprécier les risques potentiels et se prémunir de leurs conséquences. Il faut être informé, partager les connaissances, se projeter dans l'avenir et envisager les menaces futures pour faire la part des choses entre ce qui est indispensable, acceptable, souhaitable et réaliste. **Le développement d'une prospective territoriale comme approche systémique des risques climatiques** va s'imposer de plus en plus comme une nécessité autour des questions : quels phénomènes surviendront ? Avec quels effets sur les territoires littoraux en général, et sur les plus vulnérables en particulier ?

Les études de prospective, à différentes échelles territoriales, spécifiques aux enjeux et aux risques induits par le changement climatique, doivent permettre de retracer la chaîne d'impacts, depuis les phénomènes qui risquent de se conjuguer jusqu'à leurs conséquences sur les activités humaines. De telles méthodes nécessitent ainsi un croisement de disciplines scientifiques (climatologie, océanographie, géomorphologie, économie, sociologie, géographie...). Tous ceux qui souhaitent engager des politiques d'anticipation et d'adaptation ont besoin de cette connaissance pluridisciplinaire organisée comme un socle scientifique à adapter à chaque situation géographique, économique et environnementale.

Jacques Theys,

<sup>1</sup> Les communes littorales des métropoles sont, en moyenne, trois fois plus denses que l'ensemble des communes du territoire français, avec une densité qui dépasse trois cents habitants au kilomètre carré.



# Introduction

## Une contribution au programme « Territoires durables 2030 »

Cet état des lieux scientifique sur le thème « changement climatique et littoral » contribue en partie à l'élaboration du programme que mène depuis 2009 la Mission prospective de ce Ministère sur le thème « **Territoires durables 2030** ». L'objet général du programme est de s'interroger sur la « durabilité » ou la « non durabilité » des évolutions du territoire français – et de ses composantes – à l'horizon 2030. À côté de la construction de scénarios transversaux, le choix a été fait de porter un regard spécifique sur quelques enjeux majeurs du développement durable territorial : la ville, les écosystèmes aquatiques, la biodiversité, ... et le littoral.

Bien que la prospective du littoral français ne se réduise pas aux seules conséquences du changement climatique, c'en est une des dimensions les plus déterminantes à long terme. Les études de prospective, à différentes échelles territoriales, spécifiques aux enjeux et aux risques induits par le changement climatique, doivent permettre de retracer la chaîne d'impacts – depuis les phénomènes qui risquent de se conjuguer jusqu'à leurs conséquences sur les activités humaines.

De telles méthodes nécessitent ainsi un croisement de disciplines scientifiques (climatologie, océanographie, géomorphologie, économie, sociologie, géographie...) et tous ceux qui souhaitent engager des politiques d'anticipation et d'adaptation ont besoin de cette connaissance pluridisciplinaire organisée comme un socle scientifique à adapter à chaque situation géographique, économique et environnementale.

L'ouvrage ici présent a été conçu comme un outil à destination des responsables et acteurs locaux et régionaux confrontés à ces enjeux et qui engagent des exercices de prospective territoriale. Il donne des connaissances scientifiques de base et précise les domaines à approfondir et à explorer à l'occasion des études territoriales ou locales.

## La structure de l'ouvrage

Une quinzaine de fiches font le point des connaissances liées :

- **aux phénomènes climatiques et physiques généraux** (température, régime des tempêtes, précipitations, stratification marine) dont la transformation progressive est en partie tributaire du changement climatique ;
- **aux effets physiques induits possibles** (élévation du niveau de la mer, courants marins, vagues et surcotes, régime des fleuves et des apports sédimentaires) susceptibles d'avoir un impact sur le littoral ;

- **aux effets induits sur les milieux marins, côtiers et littoraux** (submersions marines, érosion-accrétion, acidification, salinisation, invasions biologiques, nouvelles toxicités).

Ces fiches sont classées en trois chapitres qui correspondent à cette logique de présentation :

- ce que l'on constate actuellement ;
- ce qui pourrait se passer ;
- les effets possibles sur les milieux et les impacts majeurs sur les territoires littoraux et les activités humaines.

La troisième partie (effets et impacts) est très peu développée, essentiellement parce qu'il est très difficile, à partir d'une compréhension générale des phénomènes, de définir à des échelles locales des impacts potentiels sur les activités humaines et les territoires. En outre les tendances climatiques pouvant être positives comme négatives, les impacts peuvent être d'une nature ou d'un autre selon les lieux. Ce dictionnaire se veut donc rester généraliste, de sorte à inciter les échelons territoriaux locaux à s'emparer de la question des menaces du changement climatique sur leur propre territoire, qui seront par nature spécifiques. Par ailleurs, s'agissant d'un outil conçu pour ceux qui engagent une prospective territorialisée du risque, le choix à été fait de ne présenter que des effets négatifs des évolutions climatiques sur les dynamiques territoriales et sur les activités anthropiques, car ces aspects demandent potentiellement davantage d'attention que les effets positifs (accrétion des plages, diminution de la fréquence et de l'intensité des orages saisonniers, apparition de nouvelles zones humides...), du moins sont-ils à considérer en priorité.

La complexité des mécanismes impose beaucoup de prudence dans la prévision des impacts à attendre du changement climatique aux échelles locales. Elle sous-entend également une multitude d'effets indirects, dont seuls quelques exemples seront succinctement présentés pour certaines fiches. Ainsi, la partie « *effets possibles sur les milieux et impacts possibles sur les territoires littoraux et les activités humaines* » donne au mieux une idée de la gamme des possibles sans aucune prétention à l'exhaustivité.

Nathalie Etahiri  
Responsable de la Mission prospective

## Rappel des travaux du GIEC

Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC, ou IPCC en anglais pour *Intergovernmental Panel on Climate Change*) créé en 1988, produit régulièrement une évaluation de l'état du climat de la planète, ainsi que de son évolution, et des impacts qui en découlent, en fonction des trajectoires socio-économiques que choisiront nos sociétés. Ce travail se base sur une étude exhaustive de l'ensemble de la littérature scientifique produite.

Le développement des activités humaines s'est fondé sur l'utilisation massive des énergies fossiles, dont la combustion rejette dans l'atmosphère des gaz à effet de serre (GES). Ces GES ont la particularité d'avoir une très longue durée de vie dans l'atmosphère (par exemple, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ne disparaît de l'atmosphère que par absorption dans la biosphère terrestre et marine par le processus de photosynthèse). Rapidement homogénéisés dans les basses couches de l'atmosphère, ces gaz y exercent un effet durable puisqu'ils ont la particularité d'interagir avec le rayonnement de grande longueur d'onde, dans l'infra rouge. Ils piègent une partie de l'énergie émise par la surface terrestre et les basses couches de l'atmosphère vers l'espace. Ce mécanisme de réchauffement dû au piégeage de l'énergie dans la gamme infrarouge, est indispensable à la vie terrestre telle que nous la connaissons, et se fait naturellement par la vapeur d'eau et un grand nombre d'autres gaz présents à l'état de trace dans l'atmosphère.

Cependant, l'excès des GES lié aux activités humaines a considérablement accru la concentration de gaz à longue durée de vie comme le dioxyde de carbone ou le méthane (la concentration en CO<sub>2</sub> a atteint 383.1 ppm (partie par million) ce qui, par rapport au niveau préindustriel de 250 ppm en 1750 représente une augmentation de 37 %) [1] et a provoqué le réchauffement généralisé de la surface de la planète, sur continent et océan, dont nous percevons les premières conséquences. L'énergie piégée par cet excès de GES est de l'ordre de 1 % de l'énergie que nous recevons de soleil, ce qui est une perturbation considérable.

La consommation des énergies fossiles dans les secteurs d'activité de transport, de production industrielle, d'énergie domestique, est la première source des gaz à effet de serre mais d'autres activités contribuent à cette situation comme le changement d'utilisation des sols, le développement de l'agriculture intensive, de l'élevage et de la riziculture (source de production de méthane en particulier),

L'état des lieux sur les conditions climatiques terrestres en 2005 est présenté dans le 4<sup>ème</sup> rapport d'évaluation du GIEC [2].

Les rapports du GIEC ne se contentent pas d'une évaluation de la situation actuelle mais ils essaient également d'analyser les trajectoires socio-économiques de nos sociétés et les conséquences de chacune d'elles en termes d'émission de GES et de climat pour la planète.

Lors du 4<sup>ème</sup> rapport (et des rapports précédents), la stratégie suivie était de s'appuyer sur une synthèse des travaux en modélisation économique qui conduisait à définir un ensemble de scénarios d'évolution possible (appelés les scénarios SRES) qui proposaient une évolution en termes d'émission de GES. Ces émissions de GES étaient ensuite transformées en concentration de GES par un modèle du cycle du carbone. Ces concentrations servaient ensuite à imposer une contrainte externe à un modèle d'évolution du climat d'échelle planétaire. Connaissant les conditions climatiques d'échelle planétaire, on pouvait travailler sur les variations climatiques à l'échelle sous-continentale en utilisant des méthodes de descente d'échelle.

La démarche de projection s'appuie sur deux grandes catégories de modèles :

- Des modèles d'évolution du climat : ces modèles sont fondés sur des lois physiques prenant en compte les principaux éléments du système climatique (atmosphère, océan, terres émergées, cryosphère et biosphère) ainsi que les processus qui se manifestent dans et entre ces divers éléments.

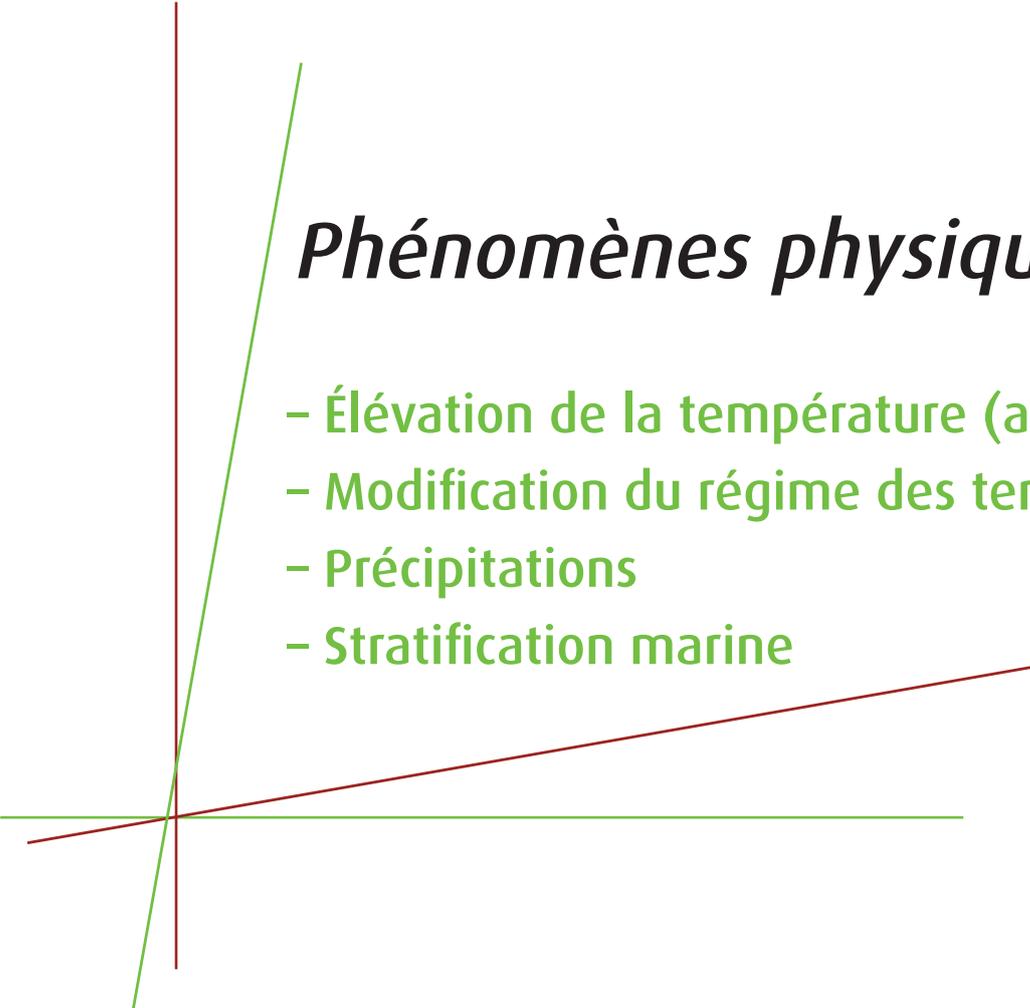
Les modèles globaux ont une maille de l'ordre de 250 km. Depuis quelques années, les projections ont été affinées avec des modèles climatiques régionaux ou des méthodes statistiques permettant de produire des informations sur la variabilité jusqu'aux échelles sous-continentales pour des échelles de temps allant des grands événements météorologiques à la décennie.

– Des scénarii d'émission de gaz à effet de serre (Rapport spécial sur les scénarios d'émissions – RSSE, 2000) prenant en compte plusieurs critères : variations démographiques, développement socio-économique, degrés d'évolution technologique et de choix en matière d'énergie (fossile, renouvelable...), et rapports à la mondialisation. Ces six scénarii sont les suivants :

- Scénarios **A1**. Trois scénarios sont regroupés sous cette famille. Caractéristiques décrites : une croissance économique très rapide ; une population globale qui plafonne en 2050 ; l'introduction rapide de technologies plus efficaces ; les grandes régions du monde convergent économiquement et interagissent fortement. Les trois scénarios se distinguent par l'intensité technologique de leur secteur énergétique : très intensif en ressources fossiles (**A1FI**), recours rapide et exclusif à des sources non-fossiles (**A1T**) ou mix énergétique équilibré (**A1B**) ;
- Scénario **A2**. Le monde est très hétérogène (affaiblissement du mouvement de mondialisation), la population globale croît constamment et la croissance économique comme le changement technologique sont fragmentés et lents ;
- Scénario **B1**. Les régions du monde convergent rapidement, la population mondiale plafonne en 2050, et la structure économique se tourne rapidement vers une économie de service et d'information (moins intensive matériellement et plus efficace énergétiquement) et un développement durable global ;
- Scénario **B2**. La population mondiale est en croissance continue, le développement économique et le changement technologique sont à des niveaux intermédiaires, et la recherche d'un développement durable se fait à un niveau plus local.

La démarche qui sera suivie pour l'analyse de trajectoires futures lors du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC est d'une nature différente. Un ensemble de trajectoires pour l'évolution des concentrations en GES va être proposé, ce qui correspond à un objectif politique. Compte tenu de ces trajectoires imposées, les équipes travaillant sur les modèles économiques essaieront de déterminer les choix à faire en termes de développement socio-économique pour atteindre une trajectoire imposée, alors que les climatologues quant à eux travailleront à décrire les conditions climatiques et les impacts liés à chaque trajectoire. Les deux groupes travailleront donc en parallèle, afin de documenter les choix de trajectoires encore possibles.



An abstract graphic consisting of several intersecting lines. A vertical red line and a horizontal green line intersect at the origin. A diagonal green line with a steep positive slope and a diagonal red line with a shallow positive slope also intersect at the origin. The text is positioned to the right of these lines.

## *Phénomènes physiques globaux*

- Élévation de la température (air, mer)
- Modification du régime des tempêtes
- Précipitations
- Stratification marine



# Élévation de la température (air, mer)

## Ce que l'on constate actuellement

Le climat se réchauffe : la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté d'environ 0,74°C au cours des cent dernières années (1906-2005) et de 0,13°C par

décennie (à 0,03°C près) au cours des 50 dernières années [3]. Cette vitesse s'est encore accélérée lors des trois dernières décennies où onze des douze dernières années figurent au palmarès des douze années les plus chaudes depuis 1850 [4].

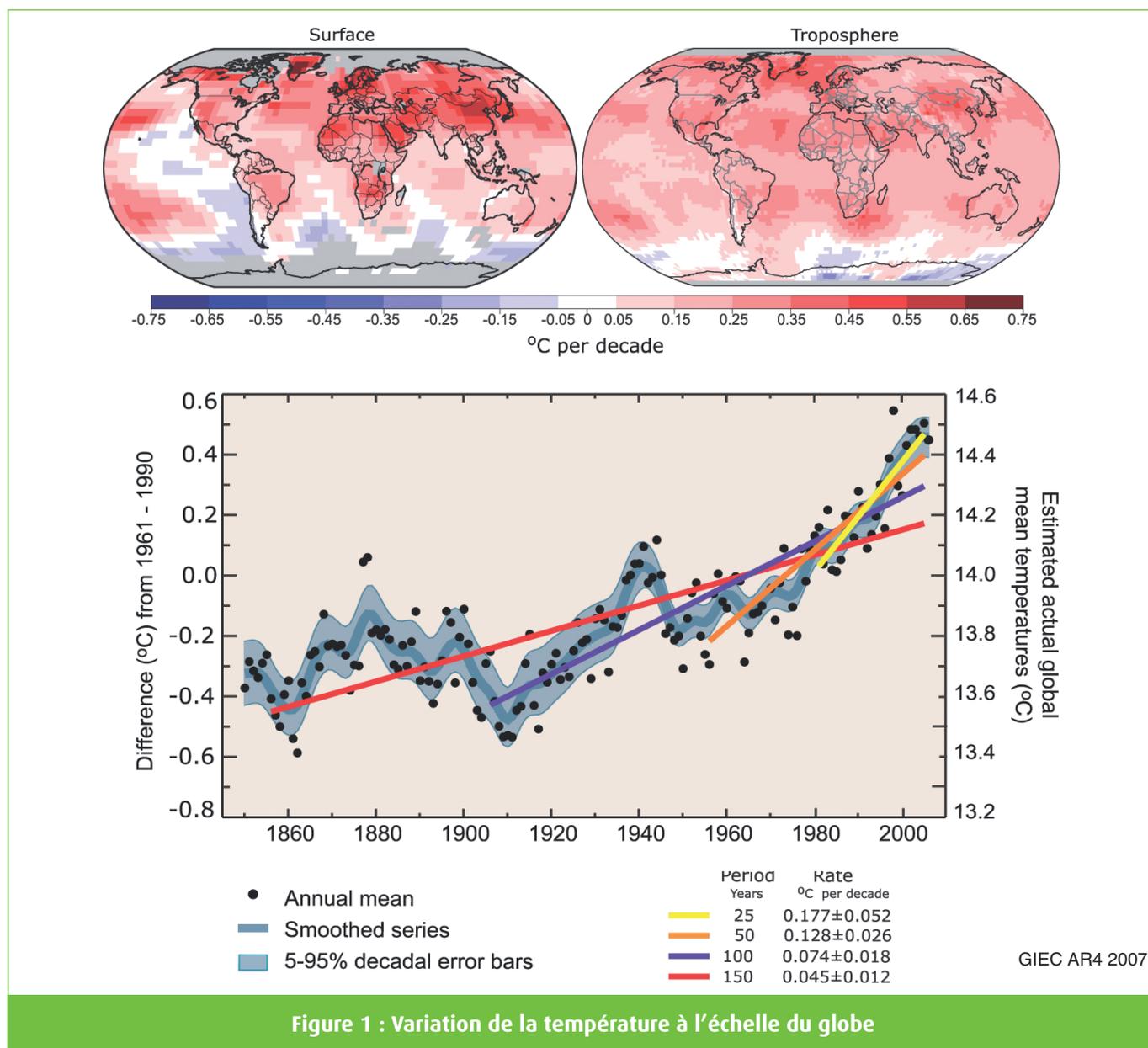


Figure 1 : Variation de la température à l'échelle du globe

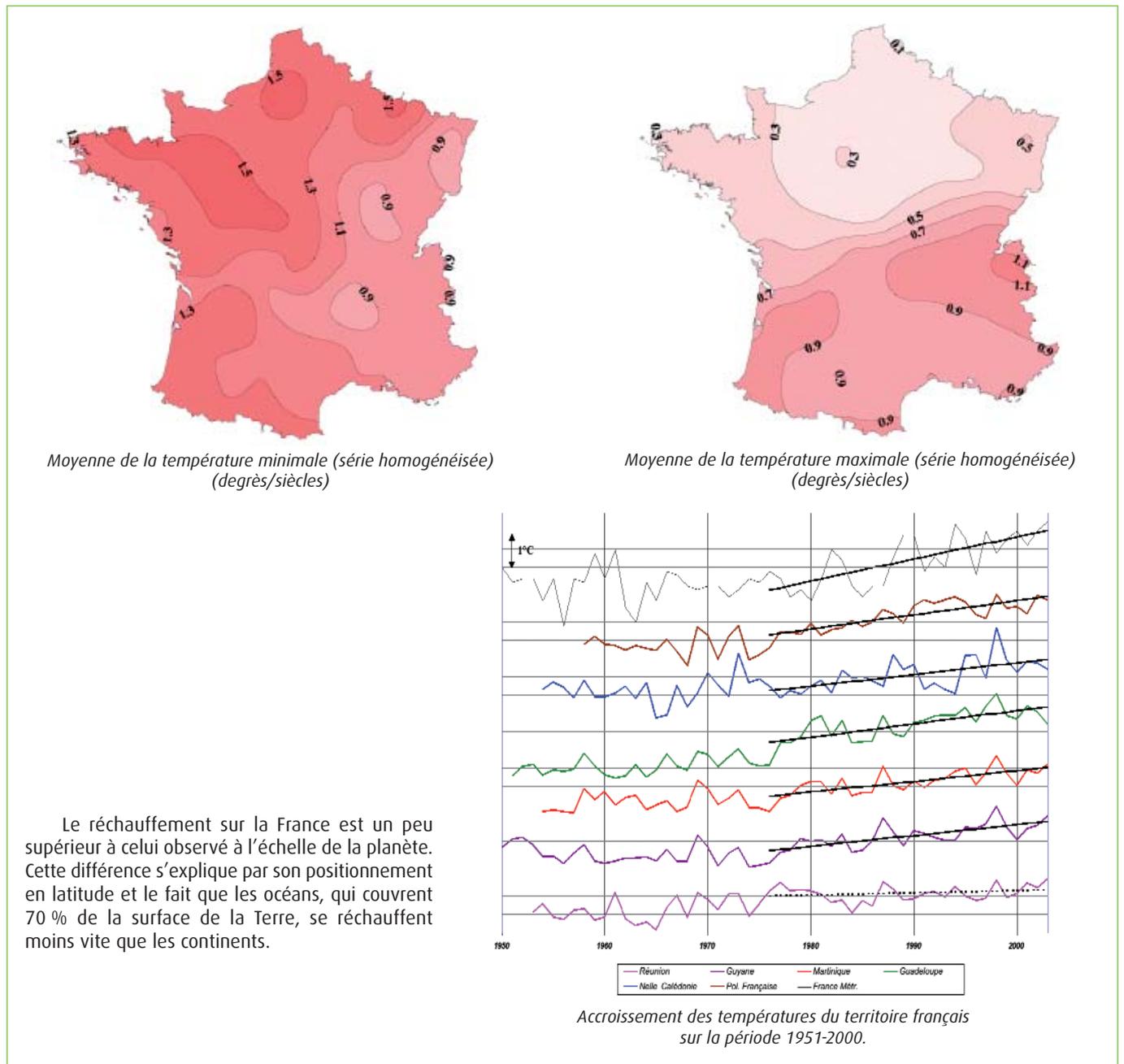
Au cours des 50 dernières années, les jours froids, les nuits froides et les gelées sont devenus moins fréquents sur la plupart des terres émergées et les jours chauds et les nuits chaudes plus fréquents. Les vagues de chaleur sont également devenues plus fréquentes sur la plupart des terres émergées [2].

Les températures des eaux de surface océaniques ont également augmenté mais à un taux plus faible que la température de l'air sur le continent. D'une manière générale, les continents se réchauffent davantage que les océans et les hautes latitudes plus que les basses latitudes. Sur terre comme sur mer, des variations locales sont observées.

La comparaison entre les observations et les simulations du climat permet d'attribuer l'essentiel du réchauffement climatique des 50 dernières années aux gaz à effet de serre d'origine humaine.

**En France**, au cours du xx<sup>e</sup> siècle, le réchauffement observé a été plus important que le réchauffement global. Les températures ont augmenté de 0,1°C en moyenne par décennie. Cette augmentation s'est accentuée sur la période 1973-2003, avec un rythme de 0,6°C par décennie [5].

Une analyse des séries quotidiennes sur la période 1951-2000 a été réalisée par Météo-France. Elle a permis de dégager des grandes tendances concernant l'évolution des extrêmes de température, avec notamment : des températures diurnes plus élevées, des températures de fin de nuit plus élevées, une diminution du nombre de jours de gel, une augmentation des vagues de chaleur, une diminution des vagues de froid et une augmentation de la variabilité des températures estivales, ce qui traduit une accentuation du risque de forte chaleur estivale.



**Figure 2 : Évolution observée des températures en France. (Météo-France)**

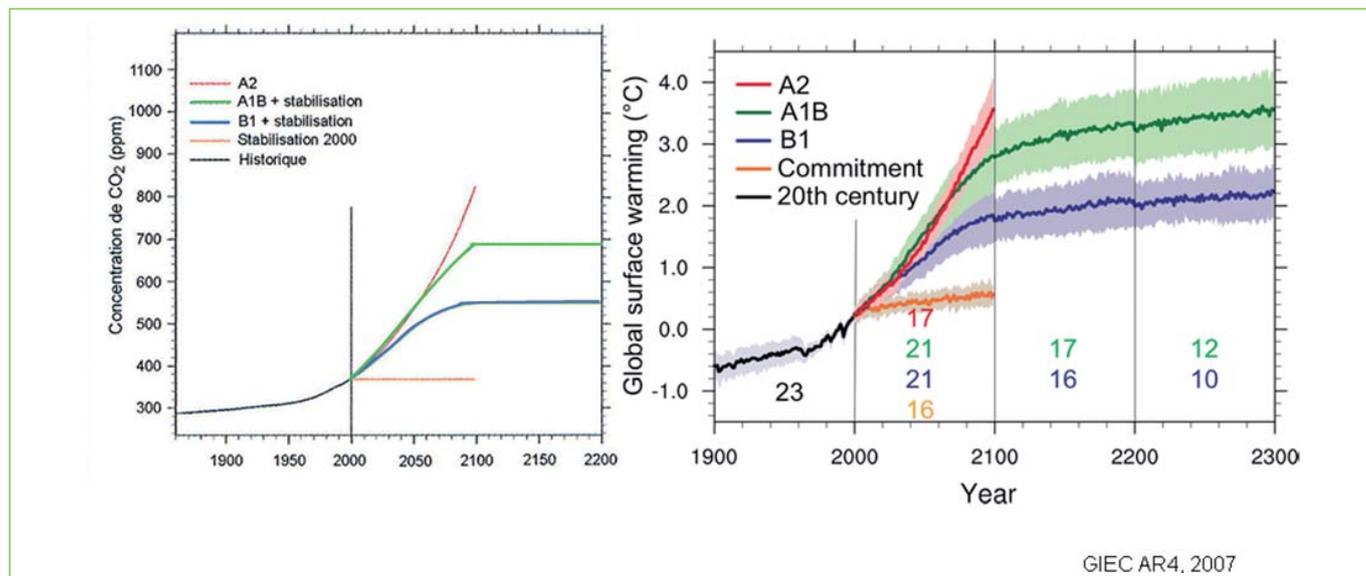
Le réchauffement observé ne concerne pas que la France métropolitaine mais s'observe également dans les territoires ultramarins, que ce soit dans les Antilles/Guyane, la Polynésie, la Nouvelle Calédonie, les îles tropicales et australes de l'océan Indien, et les territoires boréaux.

### Ce qui pourrait se passer

Les projections de réchauffement issues du 4ème rapport du GIEC sont très convergentes pour l'évolution en température. Elles sont d'environ 0,2°C par décennie durant les deux prochaines décennies et augmentent rapidement pendant la seconde moitié du 21<sup>e</sup> siècle, avec un écart marqué entre les différents scénarios SRES.

En 2100, le réchauffement serait de 2,1 à 2,9 C suivant le scénario B1 à 2,4-6,4°C suivant le scénario A1F1 [3] Cette fourchette de réchauffement s'explique par l'incertitude due aux divers scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre et aux modèles simulant l'évolution du climat. [3]

Même si les concentrations de tous les GES et des aérosols avaient été maintenues constantes au niveau de 2000, on devrait s'attendre à un réchauffement d'environ 0,1°C par décennie [2] pendant le siècle à venir. Cette tendance illustre les effets retard du réchauffement dus à l'océan et la biosphère terrestre.

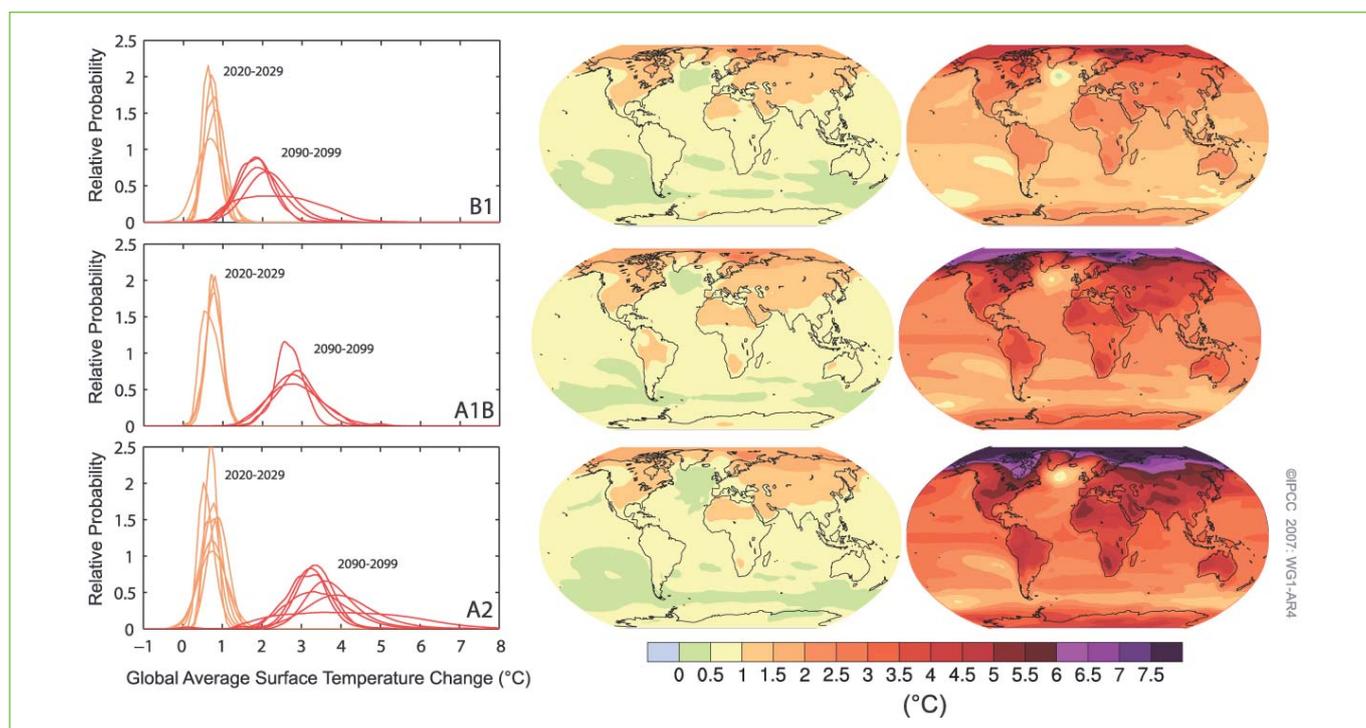


GIEC AR4, 2007

Figure 3 : Augmentation des émissions de CO2 et de la température d'équilibre selon divers niveaux de stabilisation

Le réchauffement sera plus marqué aux hautes latitudes qu'aux basses latitudes avec une accentuation marquée sur les

continents : le réchauffement maximal est prévu pour les régions arctiques.



©IPCC 2007: WG1-AR4

Figure 4 : Projections relatives au réchauffement à la surface du globe selon plusieurs modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan

Compte tenu des forts enjeux de développement dans de nombreux pays, comme l'Inde et la Chine, et des politiques actuelles d'atténuation du changement climatique, les émissions mondiales de GES vont continuer de croître dans les prochaines décennies [2]. Il est déjà observé que les concentrations actuelles en GES dépassent les concentrations prédites par les scénarios considérés comme pessimistes du GIEC.

De nombreuses conséquences sont à attendre en termes de température : augmentation des canicules, diminution des vagues

de froid, réchauffement des océans, fonte des glaciers, de la banquise et des calottes, diminution de la couverture de neige [3].

En France, les simulations prévoient une augmentation très nette du nombre de canicules estivales. Les journées de très forte chaleur (température maximale supérieure à 35°C) devraient devenir beaucoup plus fréquentes à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle : en moyenne, de 20 à 40 journées (selon le scénario) par été à Paris (contre moins de 3 actuellement) et de 25 à 55 journées à Toulouse (contre 3 à 5 actuellement) [3].

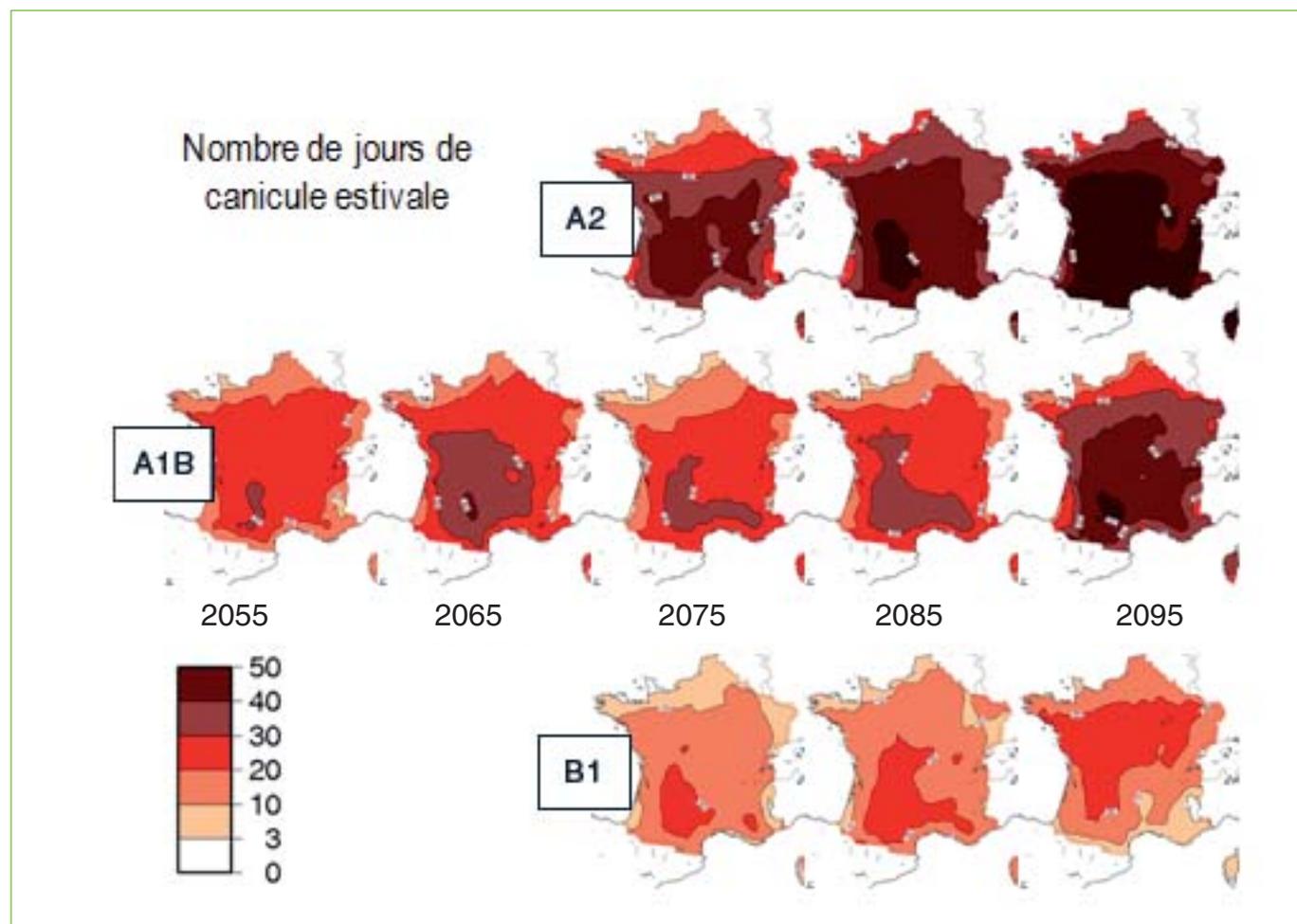


Figure 5 : Nombre de jours par an avec températures maximales supérieures à 35° en France (prévisions pour la seconde moitié du 21<sup>ème</sup> siècle, selon les trois schémas A2, A1B et B1 du GIEC).

#### Limitation des connaissances :

La plage des résultats de simulations est cohérente avec celle du précédent rapport d'évaluation (3<sup>ème</sup> rapport du Giec), mais les incertitudes estimées et les valeurs maximales sont supérieures, principalement parce que la gamme plus large des modèles disponibles suggère une rétroaction positive entre climat et cycle du carbone.

Dans un climat plus chaud, l'absorption du CO<sub>2</sub> par la biosphère terrestre augmente dans un premier temps pour de nombreuses espèces, mais cette augmentation peut brutalement s'arrêter par

insuffisance d'autres ressources (comme l'eau). Ces effets de seuil varient suivant les écosystèmes : ils ont pour conséquence de bloquer l'absorption et même parfois de transformer l'écosystème en source de CO<sub>2</sub>, ce qui explique la rétroaction positive pour de fortes concentrations. La force de cet effet de rétroaction varie de façon marquée entre les modèles [2].

Simuler les températures à des échelles inférieures à l'échelle continentale est un objectif important mais difficile car l'évolution des forts contrastes régionaux dépend de nombreux phénomènes locaux encore mal représentés dans les modèles, et l'instationarité des conditions climatiques rend délicate l'approche statistique [2].

## Les effets possibles sur les milieux, les territoires littoraux et les activités humaines

### Impacts sur les milieux et les territoires

<i>Types de territoires / milieux exposés</i>	<i>Nature des effets</i>
Dans les écosystèmes terrestres	Précocité des événements printaniers et déplacement, vers les pôles et vers les sommets, des habitats des plantes et des animaux. [2]
Pour certains systèmes marins et d'eau douce	des déplacements et des différences d'abondance des algues, du plancton et des poissons. [2]

### Impacts sur les activités humaines

<i>Types d'activités</i>	<i>Nature des impacts</i>
Agriculture — Sylviculture	Plantation plus précoce de céréales Développement des incendies de forêt et des parasites
Pêche	Évolution des stocks de poissons et des types d'espèces
Santé humaine	Mortalité liée aux fortes chaleurs[2] Changements dans les vecteurs de maladies infectieuses dans certaines régions [2] Changements des pollens allergisants dans les hautes et moyennes latitudes de l'hémisphère nord [2]



# Modification du régime des tempêtes

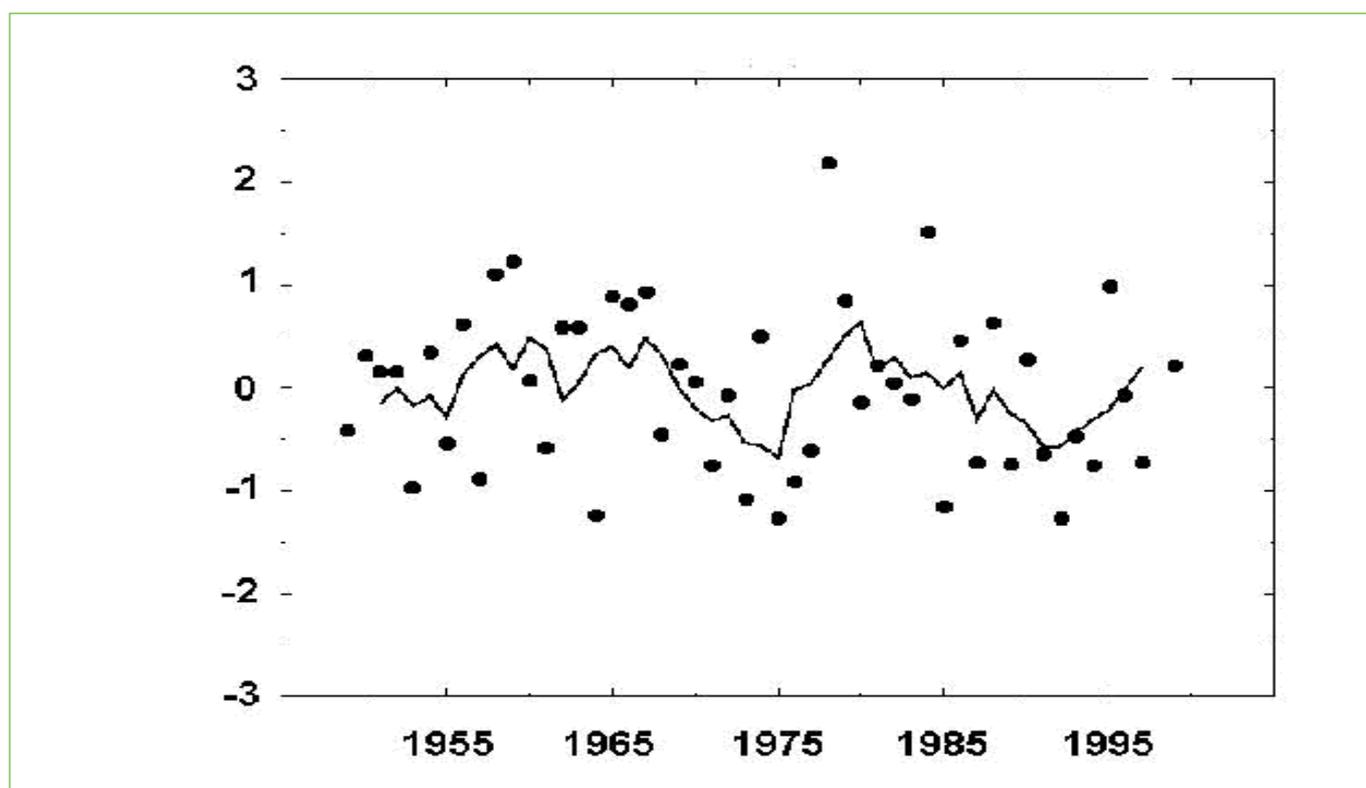
## Ce que l'on constate actuellement

Les tempêtes sont caractérisées par des vents violents et peuvent avoir des conséquences désastreuses sur les zones littorales. Le territoire français est vulnérable aux tempêtes provenant de l'océan Atlantique ainsi qu'aux tempêtes en Méditerranée.

Les années récentes ont été marquées par des événements importants comme les deux tempêtes de la fin d'année 1999 et la tempête Klaus en janvier 2009.

La question se pose de savoir si le changement climatique en cours peut s'accompagner d'un risque de tempête accru soit par l'intensité des événements ou par leur fréquence.

En fait, si on analyse la fréquence et l'intensité des tempêtes ayant frappé le territoire français, on observe un signal très variable d'une année à l'autre mais pas de tendance claire sur l'évolution.



**Figure 6 : Indice normalisé d'intensité des plus fortes tempêtes en France observées annuellement de 1949 à 1999.**

La courbe représente une moyenne glissante de l'indice sur des périodes de 5 ans. L'indice oscille au cours du temps suivant une échelle de variabilité de plusieurs dizaines d'années, sans tendance marquée sur l'ensemble de la période.

Cependant, ce type de phénomène est encore à la limite de détection puisqu'il est peu fréquent, et qu'il n'est pas facile de trouver un indicateur clair pour exprimer la force de la tempête puisque celle-ci peut être particulièrement sévère par son caractère abrupt ou sa durée, son extension spatiale, sa répétitivité...

Les tempêtes parvenant sur les côtes Atlantiques proviennent du rail des dépressions qui traverse l'océan Atlantique du Sud ouest au nord est. Ce rail est particulièrement actif pendant l'hiver, quand le contraste thermique entre les régions polaires et les latitudes subtropicales est marqué. Il oscille en force et en direction en fonction de la différence de pression en latitude.

Lorsque la différence de pression est forte, il s'incurve vers l'Europe du nord et s'accompagne de fortes tempêtes au nord ; lorsque cette différence faiblit, les tempêtes sont plus faibles et circulent vers l'est. Ces variations sont liées à un mode d'oscillation climatique important pour l'Atlantique : l'oscillation Nord Atlantique.

Les événements météorologiques extrêmes avec l'augmentation de la fréquence, de l'intensité et la modification des trajectoires des tempêtes et des cyclones ont une incidence directe sur :

- l'amplitude, la direction et la période de la houle,
- l'intensité et la direction des courants,
- la fréquence et l'amplitude des surcotes<sup>1</sup>.

## Ce qui pourrait se passer

### Limites des connaissances pour la France

Aucune tendance ne se dégage de façon très précise sur l'évolution des tempêtes [3] et il est difficile de se prononcer sur la robustesse même de ce résultat car il est lié au fait que des phénomènes d'effet contraire contribuent à l'activité du rail des tempêtes.

Par exemple, dans un climat plus chaud, la différence thermique entre les régions polaires et subtropicales diminue, ce qui affaiblit l'activité du rail, mais les régions subtropicales encore plus chaudes en altitude vont renforcer cette activité. L'équilibre entre ces phénomènes est délicat et peut conduire à des projections différentes d'un modèle à l'autre.

## Les effets possibles sur les milieux, les territoires littoraux et les activités humaines

### Impacts sur les milieux et les territoires

<i>Types de territoires / milieux exposés</i>	<i>Nature des impacts</i>
Façade Ouest	Effets directs du vent : amplifie l'amplitude, la direction et période de la houle, Augmente l'intensité et la direction des courants, Augmente la fréquence et l'amplitude des surcotes
Côtes basses	Évolution des rivages par érosion et/ou submersion ; en effet, ce sont les grandes tempêtes qui font évoluer les rivages marins en provoquant de fortes érosions ou des submersions étendues, comme l'ont bien montré celles qui ont affecté les rivages de la France occidentale en décembre 1999 [5]
Côtes basses, zones humides...	L'incursion d'eaux marines pourra conduire à une salinisation progressive des sols et, indirectement, à une modification des conditions d'équilibres écosystémiques. Inversement, cela pourra amener à l'apparition de nouvelles zones humides (ou une extension des zones humides existantes)
Toutes les côtes	Modification des courants côtiers réguliers et saisonniers

### Impacts sur les activités humaines

<i>Types d'activités</i>	<i>Nature des impacts</i>
Tourisme, urbanisation, agriculture	Pertes de surfaces émergées Modification des services rendus par les écosystèmes (ex. : fourniture d'eau douce, conservation des sols productifs)
Bâti littoral	Accentuation de dégradations

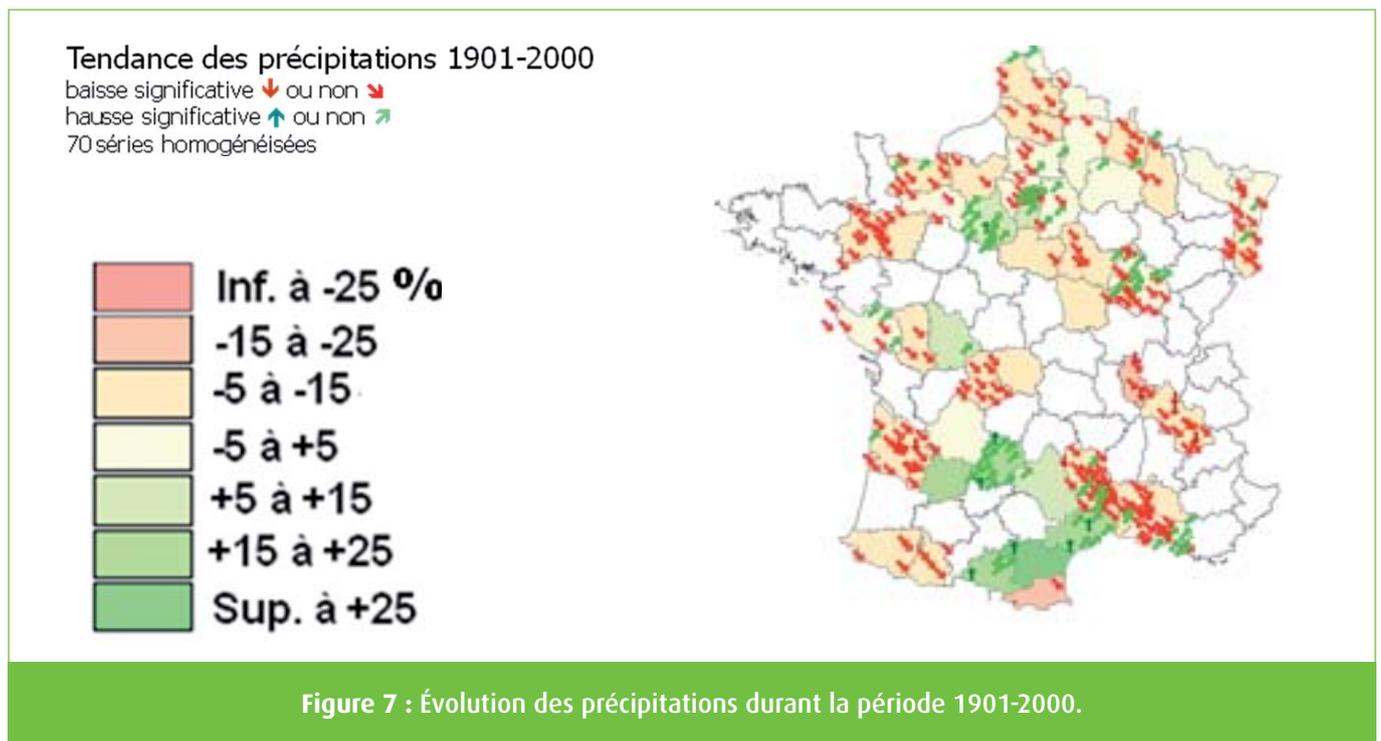
<sup>1</sup> Cf. fiche 7 modification des vagues à la côte.

# Précipitations

## Ce que l'on constate actuellement

De 1900 à 2005, les précipitations ont augmenté de façon significative dans les parties orientales de l'Amérique du Nord et du Sud, au nord de l'Europe, au nord et au centre de l'Asie, mais ont diminué au Sahel, dans le bassin méditerranéen, en Afrique australe et sur une partie du sud de l'Asie. Globalement, les surfaces affectées par la sécheresse ont probablement augmenté depuis les années 1970 [2].

En France, la carte ci-dessous représente l'évolution des précipitations depuis 1950 en moyenne annuelle. On constate une augmentation significative dans les départements marqués de flèches vertes (au centre, au nord et aussi au sud-ouest du Massif central), et une diminution dans les départements proches du bassin Méditerranéen. Cependant, cette carte comporte encore de nombreux départements en blanc où les mesures ne sont pas suffisantes pour interpréter le signal de l'évolution.



L'importance du contraste saisonnier (été plus sec, hiver plus humide) rend difficile l'interprétation d'une tendance globale, et de nombreux départements sont trop peu couverts en termes de précipitation pour que l'on puisse estimer les tendances. Lorsqu'on regarde l'évolution en fonction de la saison, la situation est contrastée. Sur les 50 dernières années, les hivers semblent plus pluvieux alors que les étés sont un peu plus secs. La sécheresse est en particulier marquée le long du bassin méditerranéen.

## Ce qui pourrait se passer

L'évolution des précipitations est plus difficile à prévoir que celle des températures de par la nature plus fragmentée de ce champ.

On peut noter cependant que la plupart des projections s'accordent sur quelques grandes tendances de l'évolution :

Un climat plus chaud va permettre une augmentation de la capacité atmosphérique à contenir de la vapeur d'eau. À l'échelle planétaire, la majorité des projections s'accorde sur :

- un accroissement des précipitations moyennes sur les régions déjà bien arrosées (comme les régions de convergence intertropicales ou l'Europe boréale)
- et une diminution sur les régions les plus arides, (comme la ceinture désertique tropicale, ou le bassin méditerranéen).

Notons cependant que des divergences importantes existent dans certaines régions comme l'Afrique de l'ouest où des tendances opposées apparaissent dans différents modèles.

À l'échelle régionale, les projections sur l'Europe de l'ouest confirment une Europe coupée en deux avec une tendance à

l'augmentation des précipitations au nord et un assèchement au sud. Cependant, la distribution varie en fonction des modèles et des saisons. De plus, des particularités régionales, liées au relief en particulier, influencent les régimes pluvieux. Il est donc très difficile de conclure sur l'évolution des précipitations en France.

Des simulations régionales pour l'ouest de l'Europe prévoient pour la fin du 21<sup>e</sup> siècle (scénarios A2, A1B et B2 du GIEC) :

- en été, un réchauffement marqué et une diminution des précipitations sur l'ensemble des régions françaises et

particulièrement sur les régions méditerranéennes, ce qui devrait conduire à des périodes d'étiages marqués en été dans toutes les régions de France. Le risque de sécheresse sur le sud de la France, l'Espagne et l'Italie sera accru ;

- en hiver, la tendance est à l'augmentation dans les régions ouest et nord, ce qui conduirait à un avancement des périodes de fort débit des rivières. Le même phénomène pourrait également arriver dans les rivières alpines du fait de la fonte précoce des neiges.

## Les effets possibles sur les milieux, les territoires littoraux et les activités humaines en France

### Impacts sur les milieux et les territoires

<i>Types de territoires exposés</i>	<i>Nature des effets</i>
Hautes latitudes et certaines régions tropicales humides	Augmentation du débit annuel des rivières et la disponibilité en eau [2].
Régions sèches des zones de moyenne latitude (Europe du sud Bassin méditerranéen) et des tropiques	Diminution des ressources en eau et de la disponibilité en eau [2] Fréquence accrue des incendies de forêt liée à la sécheresse Accroissement des épisodes de fortes précipitations
Côtes meubles	Glissements de terrain

### Impacts possibles sur les activités humaines

<i>Type d'activité</i>	<i>Impacts</i>
Agriculture –sylviculture	Impact sur la productivité des cultures des zones du sud de l'Europe Développement des incendies de forêt et des parasites Inondations (suite aux crues) Choix des usages de l'eau suite à la diminution des étiages
Énergie	Diminution du potentiel hydroélectrique
Tourisme (estival)	Menace en matière d'approvisionnement en eau Perte d'attractivité des destinations.

# Stratification marine

## Ce que l'on constate actuellement

L'océan est naturellement stratifié en température, avec des eaux relativement chaudes en surface, séparées des eaux froides profondes par une zone de variation thermique rapide appelée thermocline. Réchauffer les eaux de surface contribue à intensifier cette différence verticale et donc à isoler davantage les eaux de fond.

L'évolution du contenu thermique intégré sur les 500 premiers mètres montre un réchauffement depuis 1955, avec des périodes de stagnation, entrecoupées d'accélération au début des années 70, et dans les années 90. Ces oscillations reflètent l'importance de la variabilité naturelle de basse fréquence de l'océan, qui rend difficile la détection océanique du réchauffement global.

De plus, l'océan se réchauffe au contact avec l'atmosphère. Le réchauffement de l'air va progressivement pénétrer dans l'océan. Si pour de grandes régions océaniques, cette pénétration se fait lentement par diffusion verticale, dans quelques régions clés, la pénétration sera accélérée par la circulation océanique : les grands fonds seront atteints par le phénomène de convection aux hautes latitudes, les eaux de moyenne profondeur seront réchauffées par

les phénomènes de ventilation aux latitudes tempérées. C'est ainsi que l'Atlantique Nord, où se forment les eaux profondes Nord Atlantique, se réchauffe plus vite en profondeur que les régions tropicales, ou le Pacifique.

Ce que l'on observe aujourd'hui, c'est un signal de réchauffement marqué en surface, avec des pénétrations plus importantes dans le nord de l'Atlantique nord, où se forment les eaux profondes nord atlantiques.

Comprendre la pénétration en profondeur de la chaleur ainsi que la vitesse de ce signal reste un défi de connaissance sur la circulation océanique.

Un second facteur intervient sur la stratification océanique, c'est la quantité d'eau reçue ou perdue en surface par l'océan par les échanges avec l'atmosphère, que l'on traduit en variation de concentration en salinité (s'il pleut, l'apport d'eau diminuera la salinité, alors que dans les zones d'évaporation, la salinité augmente). On trouve dans les profils océaniques la trace des modifications des champs de précipitations avec une diminution de salinité dans les régions de convergence intertropicales, et une augmentation de salinité dans les ceintures tropicales.

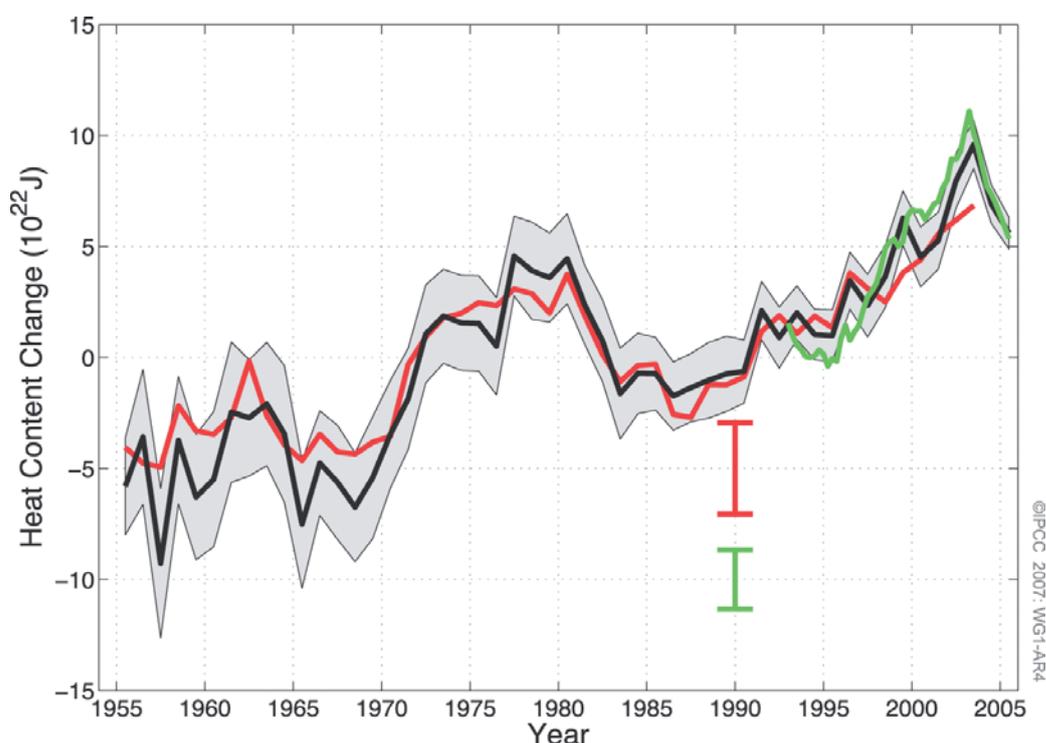


Figure 8 : Évolution du contenu thermique intégré des océans sur les 500 premiers mètres depuis 1955.

## Ce qui pourrait se passer

La stratification océanique contrôle les échanges entre l'océan de fond les eaux de surface, elle est importante pour les écosystèmes marins dont la plupart réside dans les eaux de surface, elle est également importante pour la propagation du son dans l'eau dont se servent de nombreuses espèces pour s'orienter ou pour chasser.

Augmenter la stratification va limiter les échanges verticaux, en particulier en sels nutritifs, ou en oxygène. Cela va conduire à appauvrir les eaux profondes en oxygène jusqu'à les rendre inhabitables pour certaines espèces, cela peut également conduire à diminuer la productivité des zones de surface, par diminution des apports en sels nutritifs. Un effet retour en sera une diminution de la séquestration du dioxyde de carbone par les écosystèmes marins et donc une amplification positive de la concentration en GES.

Mais il faut également tenir compte de l'évolution de la dynamique océanique. Un océan très stratifié aura une circulation générale différente de l'actuel. Toutes les projections sur la fin du siècle s'accordent sur un **ralentissement de la grande boucle de circulation océanique** qui entraîne les eaux chaudes et salées de surface de l'Atlantique nord vers les régions arctiques. Ces eaux s'alourdissent par refroidissement lors de leur voyage vers le nord et dans les régions de formation de glace de mer, elles s'alourdissent encore car la glace en se formant rejette le sel dans les eaux environnantes. Devenues très denses, ces eaux plongent en profondeur pour retrouver leur équilibre gravitaire et elles quittent ensuite les régions polaires sous forme d'un grand courant de bord ouest froid, contribuant ainsi à évacuer les eaux froides et salées vers le sud. Ce faisant, elles contribuent à l'équilibre thermique de la planète à part égale avec l'atmosphère. Cette boucle de circulation est appelée MOC (Meridional Overturning Circulation) pour Cellule méridienne de Retournement de circulation en français.

Dans un climat plus chaud, il y aura certes moins de différence thermique à compenser entre les hautes et les basses latitudes mais encore faut-il que le ralentissement de la MOC soit équilibré

avec les nouvelles conditions thermiques, ce qui ne pourra se faire dans les prochaines décennies puisque l'on considère que plusieurs centaines, sinon milliers d'années sont nécessaires pour équilibrer cette grande circulation océanique avec le climat.

### Limites des connaissances

Observer l'évolution du comportement de la MOC passe par l'observation des masses d'eau, de leurs propriétés physiques et de leur déplacement, sur plusieurs décennies.

Notre connaissance est encore très fragmentaire et s'appuie sur des programmes de mesures qui permettent d'accumuler les observations nécessaires sur de longues périodes. Pour ce phénomène, l'observation des conditions de surface ne suffit pas : il faut aussi estimer les flux profonds, dans des zones de dynamique de courants active, marquée par une activité de méso-échelle et d'instabilité prononcée.

L'importance de la variabilité naturelle dans ces régions de l'Atlantique Nord est aussi un obstacle. Il faut pouvoir identifier et filtrer la signature de l'oscillation Nord Atlantique ou la variabilité des régions sub-arctiques, pour extraire le signal dû au changement climatique.

Une source d'information importante provient aujourd'hui des simulations numériques qui explorent la sensibilité de cette région aux modifications de climat. Tous les modèles convergent sur un ralentissement de la MOC à échelle de la centaine d'année [11]. **Cependant, ces modèles n'ont qu'une représentation grossière de ce phénomène et peinent à reproduire l'ordre de grandeur de la MOC et ses caractéristiques régionales. De plus, de nombreux phénomènes ne sont pas encore pris en compte dans les projections : accélération de la fonte des calottes, diversité des cheminées convectives, activité de méso-échelle...** Il y a encore des marges de progrès importantes à réaliser pour comprendre et reproduire avec confiance l'avenir de la circulation océanique en atlantique nord.

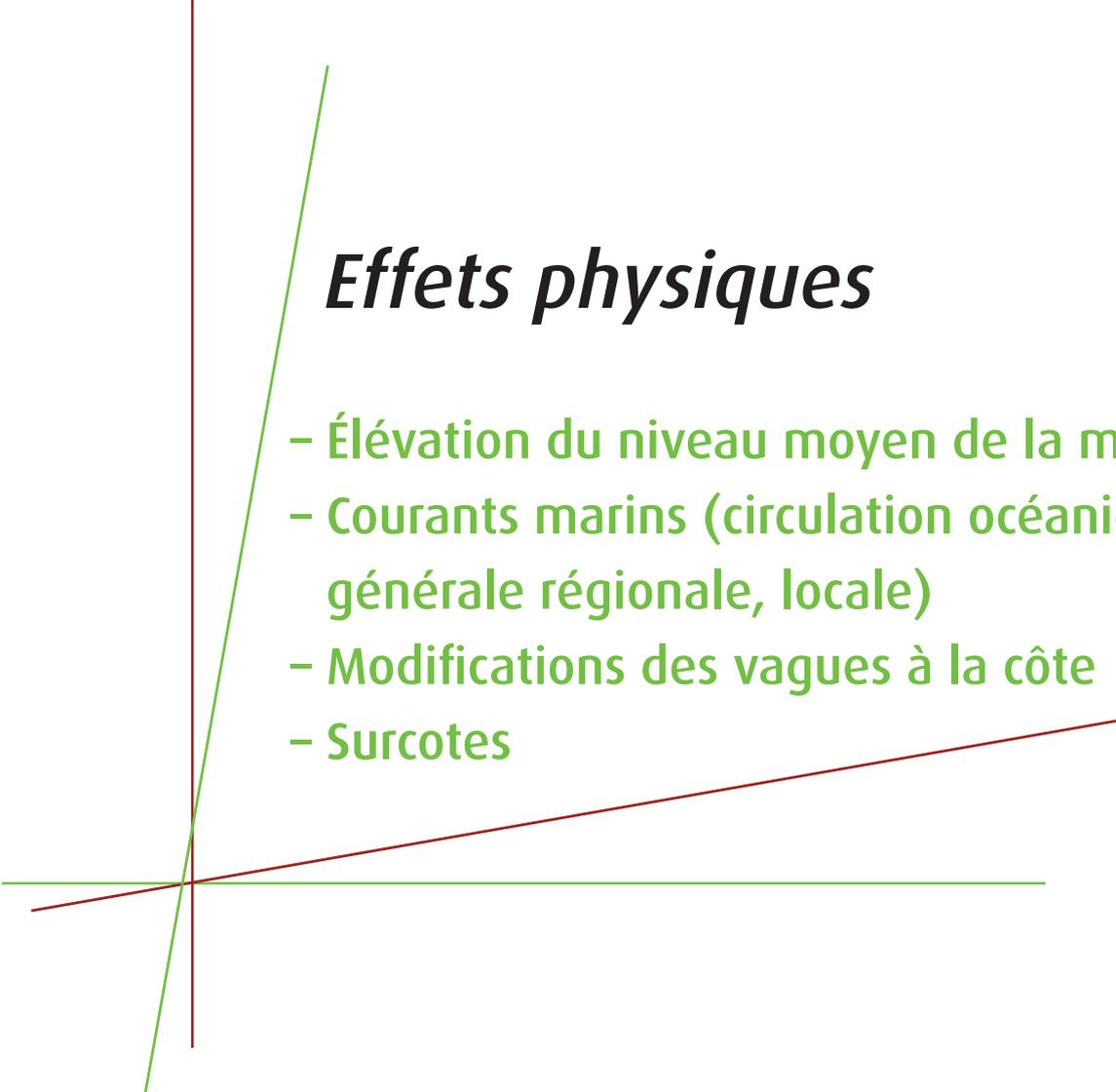
## Les effets possibles sur les milieux, sur les territoires littoraux et les activités humaines

### Impacts possibles sur les milieux et les territoires

<i>Types de territoires et milieux exposés</i>	<i>Nature des impacts</i>
Océans (au large)	Modification des courants marins
Écosystèmes sous marins (végétaux et animaux)	Perturbation des équilibres écosystémiques sous-marins Modification de la propagation des sons

### Impacts possibles sur les activités humaines

<i>Type d'activité</i>	<i>Impacts</i>
Tourisme	Modification des critères d'attractivité des destinations littorales

An abstract graphic consisting of several intersecting lines in red and green. A vertical red line is on the left, a horizontal green line is in the middle, and a diagonal green line crosses the vertical red line. A diagonal red line also crosses the horizontal green line.

## *Effets physiques*

- Élévation du niveau moyen de la mer
- Courants marins (circulation océanique générale régionale, locale)
- Modifications des vagues à la côte
- Surcotes



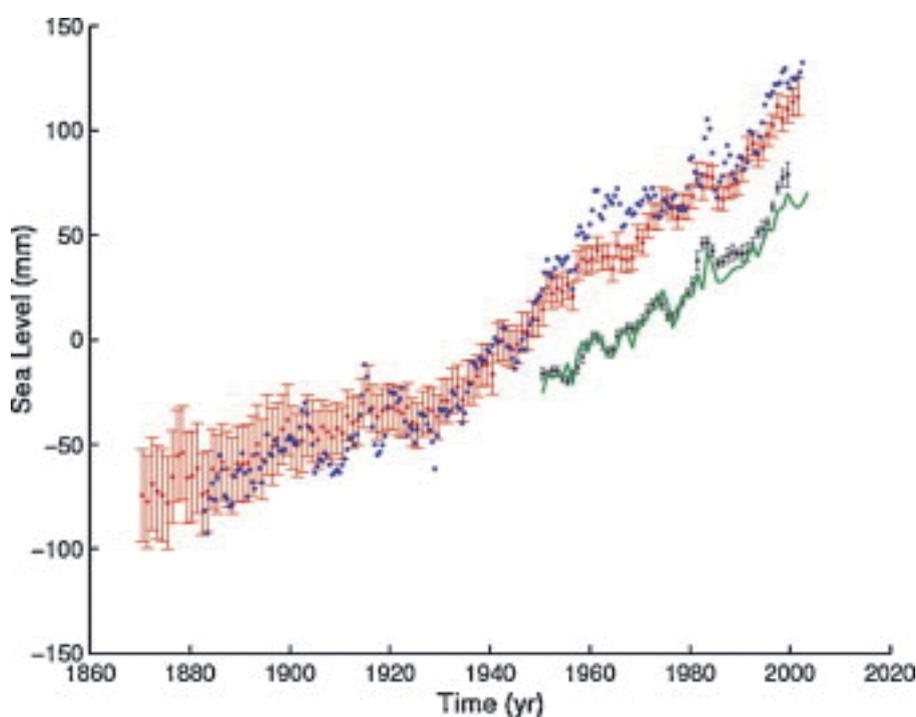
# Élévation du niveau moyen de la mer

## Ce que l'on constate actuellement

### Observations

Entre 1870 et 2004, le niveau marin moyen s'est élevé de 1.7 mm/an (+/-0.3 mm/an).

Cette tendance n'est pas linéaire (Figure 6.1) : au contraire, des accélérations sont observées, en particulier entre 1993 et 2005 où le niveau de la mer moyen s'est élevé de 3,3 mm/an [6]. Entre 2005 et 2008, l'élévation du niveau marin moyen s'est considérablement ralentie.



**Figure 9 : Reconstitutions du niveau moyen de la mer ; Figure extraite de Cazenave et al. (2008) [7].**

En rouge : données de Church and White (2006) (8) ; en bleu : données de Jevrejeva et al. (2006) (9) ; en vert, données de Holgate et al. (2006) (10)

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

L'élévation relative du niveau de la mer est mesurée depuis la fin du 19<sup>e</sup> siècle par des marégraphes (par exemple depuis 1845 à Brest). Depuis 1993, des données d'altimétrie satellitaire sont utilisées. Tandis que les satellites mesurent une élévation par rapport à un ellipsoïde de référence, les marégraphes mesurent un niveau marin relativement au socle sur lequel ils sont positionnés. Étant rattachés à la terre, ils peuvent être soumis à des mouvements verticaux d'une ampleur comparable à celle du signal de l'élévation du niveau marin. Ces mouvements peuvent être liés

à des phénomènes locaux tels que des pompages d'eau ou d'hydrocarbures ou bien à des phénomènes de plus grande emprise, par exemple d'origine tectonique. Ces phénomènes sont difficiles à prendre en compte lors des réanalyses car souvent peu connus. Ainsi, on peut noter qu'en prenant en compte ces phénomènes, Woppelmann et al. trouvent une élévation du niveau marin moyen de **1,3 mm/an** en moyenne au 20<sup>e</sup> siècle. Cette estimation permettrait de résoudre l'énigme posée par la différence entre l'élévation expliquée et l'élévation observée (voir paragraphe 3), mais le GIEC, dans son rapport de 2003, a retenu les estimations de +1.7 mm/an entre 1870 et 2004.

### Causes de l'élévation séculaire du niveau marin moyen

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

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

Cause de l'élévation séculaire du niveau marin moyen	1961-2003	1993-2003
Expansion thermique	25 %	30 %
Fonte des glaciers et des couvertures glacées	45 %	28 %
Fonte de la calotte du Groenland	5 %	8 %
Fonte de la calotte arctique	13 %	8 %
Total expliqué	1.1mm/an	2.8mm/an
Total observé	1.8mm/an	3.1mm/an

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

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

Entre 2008 et 2003, en dépit du ralentissement de l'élévation du niveau marin moyen observée, la **composante « fonte des calottes polaires »** aurait augmenté de 80 %. [11], [7]0

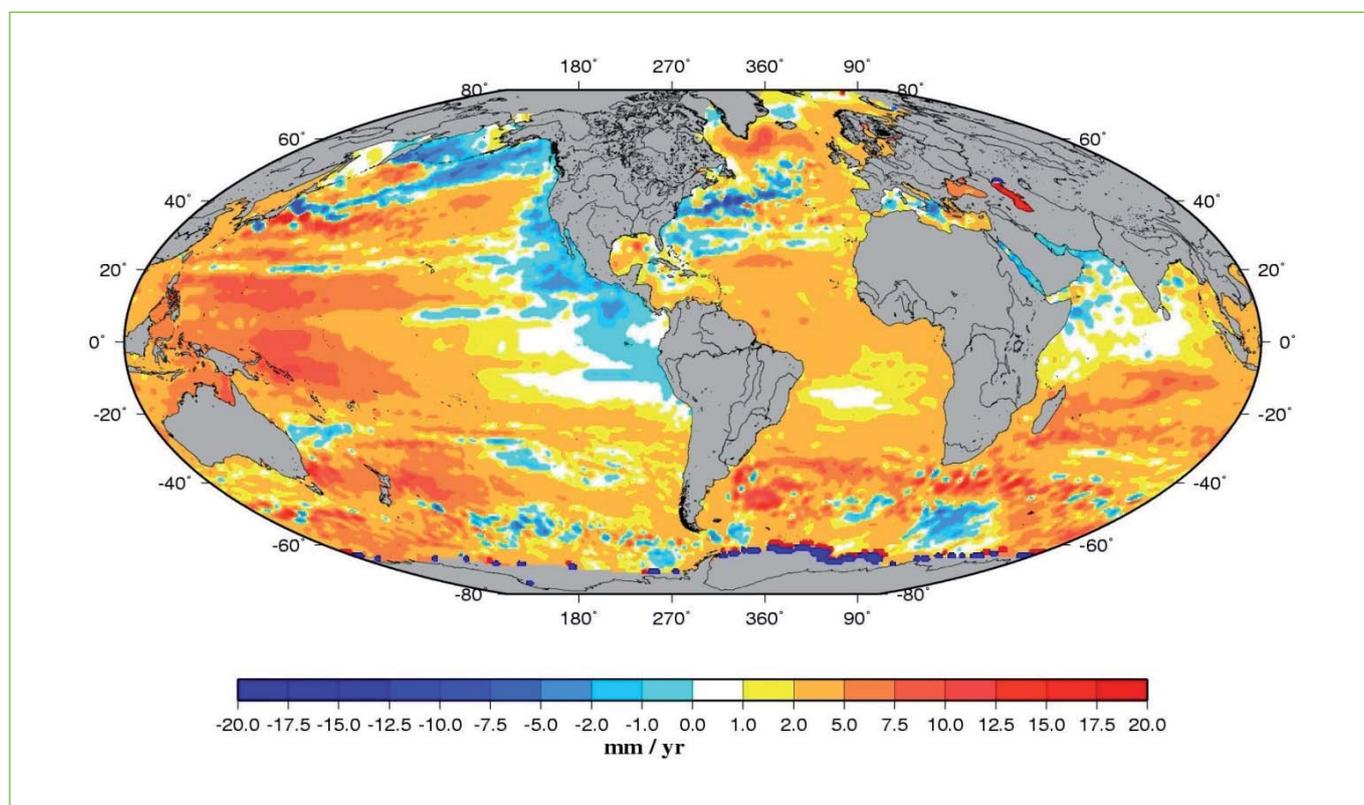
### Variabilité régionale de l'élévation séculaire du niveau marin

L'élévation séculaire du niveau marin n'est pas uniforme : les mesures réalisées entre 1996 et 2006 par satellite mettent en évidence une variabilité spatiale et temporelle.

Ainsi, dans certaines zones du pacifique ouest, la hausse du niveau marin a été 5 fois supérieure à la moyenne globale au cours de 1993/2007, alors que dans le pacifique est, le niveau a baissé. La variabilité régionale est liée principalement aux variations de température et, plus localement, de salinité de l'océan (12). Ces variations de température de la surface de l'océan sont elles même corrélées à des oscillations climatiques régionales (El Niño/La Niña, Oscillation Atlantique Nord, etc.), qui sont des anomalies persistantes à grande échelle des champs de pression.

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

À des échelles de temps de l'ordre de plusieurs millions d'années, la position des continents a une forte influence sur le climat. Ainsi, au cours du Tertiaire, la coïncidence d'un continent en position polaire a permis la constitution de la calotte glaciaire antarctique, induisant une réduction du niveau marin global. A des échelles de temps de l'ordre de dizaine de milliers d'années, ce sont les cycles glaciaires-interglaciaires et donc les cycles de Milankovitch, liés à l'excentricité de l'orbite terrestre, obliquité et précession de l'axe de rotation, qui gouvernent indirectement la hauteur des océans. Le quaternaire compte ainsi 17 cycles glaciaires-interglaciaires au cours desquels des calottes glaciaires se forment sur les continents (période de régression marine) puis fondent (période de transgression) [13]. Lors du dernier maximum glaciaire il y a 18 000 ans le niveau de la mer était 120 m plus bas que le niveau actuel.



**Figure 10 : Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2007) d'après Topex/Poseidon et Jason-1. Source LEGOS/GOHS**

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

Très peu d'études présentent des sites dans lesquels l'élévation du niveau marin d'origine climatique constatée actuellement est la cause principale de recul du trait de côte ou d'aggravation des aléas d'érosion ou de submersion (voir fiches associées). Sur quelques sites [14], l'érosion ou la submersion constatée au cours du 20<sup>e</sup> siècle a été, au moins partiellement, attribuée à l'élévation séculaire du niveau marin relatif, c'est-à-dire l'élévation résultant à la fois de la composante climatique du niveau marin et de sa composante géologique (subsides ou surrections de diverses échelles spatiales). Ce n'est pas un cas général. Au contraire, dans l'exemple classique du golfe du Mexique [15], l'accélération de l'érosion des îles Dernières peut être reliée statistiquement à une réduction des stocks sableux disponibles, mais pas de manière claire à l'élévation du niveau marin ou la variabilité des régimes de tempêtes et de cyclones.

## Ce qui pourrait se passer

### Introduction

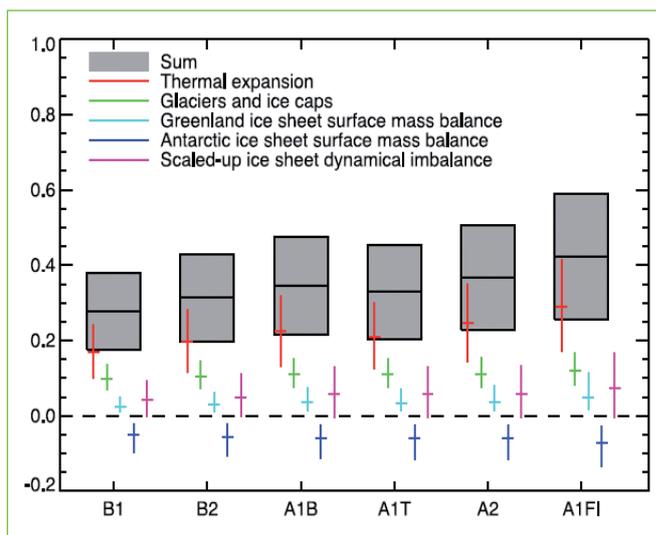
L'élévation du niveau marin se poursuivra très probablement au cours du 21<sup>e</sup> siècle et après. En revanche, la question de savoir quelle sera l'amplitude de cette élévation, est une question scientifique qui n'est pas tranchée.

Même si les températures se stabilisaient aujourd'hui, le niveau marin moyen continuerait d'augmenter en raison de la très forte inertie des phénomènes en jeu. Ainsi, la **dilatation thermique des océans se poursuivra** très probablement, mais c'est surtout le **devenir des calottes polaires Antarctique et du Groenland qui cause les incertitudes les plus grandes**. En effet, les masses d'eau qui y sont stockées sous forme de glace représentent l'équivalent respectivement de 70 m et 7 m d'élévation du niveau marin. Si la fonte totale de l'Antarctique n'est pas envisagée, sa partie la plus vulnérable au changement climatique est celle qui se situe dans le prolongement de la péninsule Antarctique (appelée Bassin Antarctique occidental), qui **représente l'équivalent de 5 m d'élévation du niveau marin**. En réalité, la communauté scientifique ne publie pas aujourd'hui de travaux scientifiques qui laisseraient penser que ces calottes pourraient fondre totalement. En revanche, elle s'interroge sur la question des pertes aux marges des calottes continentales qui pourront ou non être compensées par davantage de précipitations sur la calotte.

### Ce que prédisent les modèles climatiques

Pour estimer l'élévation du niveau marin, la modélisation du climat cherche à représenter les processus physiques de fonte des calottes polaires et d'accumulation de glace, quitte à paramétrer certains phénomènes. Ces modélisations indiquent que le changement climatique s'accompagnerait de davantage de précipitations sur l'Antarctique [16]. On peut d'ailleurs noter qu'entre 1993 et 2003, la calotte Antarctique a moins fondu qu'entre 1961 et 2003, ce qui est une manifestation de la forte variabilité décennale de ces phénomènes de fonte (Voir tableau 6.1). **Ces modélisations conduisent le GIEC (2007) à prédire une élévation modérée du niveau de la mer en 2100, allant de 18 à 59cm selon les scénarios [17] (voir figure 15).** Il faut cependant noter le traitement très approximatif de la fonte des calottes dans ces modèles, dont aucun ne prenait en compte une accélération des processus de fonte liée à la dynamique des calottes.

Ces approches de modélisation du climat permettent de régionaliser l'élévation du niveau marin moyen liée aux effets thermiques. On peut noter que pour ce qui concerne les côtes



**Figure 11 : Projections pour le niveau moyen de la mer pour le 21<sup>e</sup> siècle et les contributions de chacun des phénomènes modélisés en m, pour 6 scénarios climatiques.** Il s'agit d'une estimation de l'élévation attendue en moyenne entre les moyennes des périodes 1980 à 1999 d'une part, 2090 à 2099 d'autre part. Les barres grises représentent les incertitudes (5 % et 95 %) liées à la modélisation climatique. *Source : Meehl et al. 2007 [17].*

françaises, l'écart par rapport à la moyenne n'excéderait pas 10 cm en Atlantique [17]. Il pourrait ne pas y avoir de hausse du niveau marin par dilatation thermique sur les côtes françaises méditerranéennes [18], compte tenu des effets renforcés d'évaporation. Ce résultat repose sur une seule modélisation et appelle donc d'autres études mais il est révélateur de la situation particulière de la Méditerranée.

### Ce que prédisent les modèles semi-empiriques

La communauté des glaciologues observateurs constate une accélération des pertes de masses d'eau des calottes Antarctique et du Groenland sur les 15 dernières années [11] ; [18]. Pour eux, des processus dits « abrupts » (c'est-à-dire plus rapides que ceux qui les ont enclenchés) sont en jeu. Il peut s'agir par exemple de glissements accélérés des glaciers sur leurs moraines, de la fonte accélérée de calottes reposant sur un socle continental mais en contact avec l'océan qui se réchauffe ou bien de l'accélération de l'écoulement de glaciers continentaux suite à la débâcle d'une banquise en aval. Ces processus abrupts ne sont paramétrés dans les résultats du GIEC que par une estimation moyenne sur la dernière décennie du siècle dernier, ce qui n'est pas satisfaisant.

D'autres approches de modélisation ont vu le jour : il s'agit de représenter au moyen de quelques équations simples la réponse du niveau marin à un changement de température et de l'ajuster à des observations, par exemple aux reconstitutions du niveau marin de 1900 à aujourd'hui. En utilisant ces approches, des élévations du niveau marin de 1 m [19] et 1,2 m [20] sont trouvées en 2100. Hansen [22] note que ces modèles semi-empiriques sont calibrés sur des périodes où les variations du niveau marin sont essentiellement dues à la dilatation thermique des océans alors que ce qui est craint pour le 21<sup>e</sup> siècle est une élévation du niveau marin liée à une fonte des calottes polaires. Il estime donc ces valeurs sous-estimées et envisage 5m d'élévation du niveau marin moyen pour 2100.

## Résumé

Plusieurs estimations coexistent actuellement pour l'élévation du niveau marin. Les estimations basses vont de 0.18 à 0.59 m pour 2100 [17]. D'autres proposent une élévation du niveau marin moyen de l'ordre du mètre [19], [20] ou au-delà [22]. Dans tous les

cas, il convient de noter que l'on passe d'un mode dans lequel le niveau marin moyen a peu évolué depuis 5000 ans à un mode dans lequel le niveau marin variera de manière plus ou moins accélérée pendant plusieurs siècles. Cette remarque conduit à recommander de prendre en compte le fait que l'élévation du niveau marin se poursuivra très probablement après 2100.

### Les effets possibles sur les milieux, sur les territoires littoraux et les activités humaines

#### Impacts possibles sur les milieux et les territoires

<i>Types de territoires et milieux exposés</i>	<i>Nature des impacts</i>
De nombreuses côtes sableuses, certaines falaises meubles et certains aquifères côtiers	Aggravation de l'aléa érosion d'une manière générale [23]
Côtes basses et aquifères côtiers	Aggravation de l'aléa submersion temporaire [23]
Aquifères côtiers	Aggravation des intrusions salines dans les aquifères [14]
Zones humides	Pertes de zones humides [14]
Villes côtières sur zones basses avec aquifère côtier	Élévation du niveau des eaux souterraines [14]
Estuaires	Élévation du niveau moyen de l'eau dans les estuaires [24]

Il faut noter que les effets sur les falaises érodables sont sujets à discussions : certes, les vagues pourront agresser davantage la falaise en raison d'un niveau marin plus haut et les précipitations la fragiliser, mais le nombre de jours de gels par an pourrait diminuer [25]. Pour les plages et les marais côtiers, ce sont les bilans sédimentaires qui causent érosion et accrétion en premier lieu, le niveau marin n'étant qu'un des paramètres intervenant dans ces processus. (Voir chapitre sur l'érosion)

#### Impacts possibles sur les activités humaines

<i>Type d'activité</i>	<i>Impacts</i>
Agriculture	Salinisation des sols Augmentation des coûts de protection contre les risques côtiers Perte de terres côtières
Habitat	Modification des zones affectées par les aléas côtiers Augmentation des coûts de protection contre les risques côtiers
Infrastructures	Modification des zones affectées par les aléas côtiers et des zones à protéger Augmentation des coûts de protection contre les risques côtiers Déplacement d'infrastructures ou besoin de repenser s'il est judicieux de les positionner à la proximité immédiate de la côte
Tourisme	Réduction des plages voire possibilité de disparition de plages de poche Élévation des coûts d'équipement et d'entretien en/des ouvrages de défense Submersion d'infrastructures touristiques

# Courants marins

## (circulation océanique générale, régionale, locale)

### Ce que l'on constate actuellement

La **circulation thermohaline** de l'Atlantique Nord (à laquelle le Gulf Stream participe) transporte un flux de chaleur vers le nord égal à celui de l'atmosphère et contribue à maintenir des températures relativement douces en Europe du Nord Ouest. Bien que des observations ponctuelles récentes aient suggéré une diminution de 30 % de depuis les années 1990 de cette circulation vers le nord, des données complémentaires sont nécessaires pour interpréter cette mesure en terme de tendance car la forte variabilité naturelle de la circulation peut biaiser l'interprétation de mesures isolées.

Les programmes d'observation et de modélisation du **tourbillon subpolaire** de l'Atlantique Nord (OVIDE-Clipper) qui ont été engagés depuis 4 ans, fournissent des premiers éléments sur l'évolution de la circulation thermohaline dans le tourbillon subpolaire. [6]

Des travaux sur la variabilité climatique ont permis de relier les variations interannuelles de température, de salinité et du niveau de la mer avec les variations de **forçage atmosphérique** et la propagation des ondes planétaires. Ils ont ainsi permis de mieux comprendre les variations naturelles de la circulation océanique sur les périodes décennales, centenaires et millénaires. À partir de nouveaux jeux de données (satellites, ARGO) L'IFREMER propose

une reconstruction de la variabilité de la circulation océanique des 10 à 50 dernières années [27].

### Ce qui pourrait se passer

La circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord ralentira très probablement au cours du 21<sup>e</sup> siècle ; mais il est très peu probable que cette circulation connaisse une transition brusque de grande ampleur sur cette période [2] [28].

**Limitations des connaissances** : l'incertitude demeure importante sur ce phénomène pour plusieurs raisons : les modèles océaniques actuels peinent à représenter correctement l'amplitude et les variations de la MOC ; de plus, les contraintes apportées aux hautes latitudes par l'évolution de l'atmosphère et de la glace sont mal connues. Par exemple, une accélération de la fonte de la calotte du Groenland augmenterait l'eau douce en surface, ce qui ralentirait la formation d'eau profonde, élément essentiel de la circulation océanique. Ce type d'événement est reconnu pour avoir ralenti fortement et même arrêté la MOC pendant les périodes glaciaires, du fait de ruptures mécaniques et non liée à l'augmentation de la température contribuant ainsi à un fort refroidissement de l'Europe du Nord. Des changements à plus long terme de la circulation thermohaline de l'océan Atlantique ne peuvent être évalués avec confiance [2].

### Les effets possibles sur les milieux, sur les territoires littoraux et les activités humaines

#### Impacts possibles sur les milieux et les territoires

<i>Types de territoires et milieux exposés</i>	<i>Nature des impacts</i>
Écosystèmes marins	Changements de la productivité des écosystèmes marins

#### Impacts possibles sur les activités humaines

<i>Type d'activité</i>	<i>Impacts</i>
Pêche	Diminution des pêches associée à la réduction de la productivité des écosystèmes marins
Tourisme	Modification des conditions de baignade (accentuation des courants, refroidissement des eaux...)



# Modification des vagues à la côte

## Ce que l'on constate actuellement

### Définitions

#### Génération des vagues

La formation des vagues résulte du mouvement de l'air à la surface de l'eau qui provoque par frottement la formation d'oscillations. Du fait du caractère irrégulier du vent, les vagues se propagent dans toutes les directions.

Lorsque le vent devient plus fort, une direction privilégiée apparaît. Les rides plus nombreuses et d'amplitude plus importante se composent en des ondulations de plus grande amplitude donnant une prise au vent supplémentaire et s'accroissant de plus en plus.

Lorsque les vagues se sont propagées sur de grandes distances en dehors de la surface d'action des vents qui les ont produites, elles sont appelées houles. Elles ont alors un aspect ordonné, et sont quasi régulières à la fois en hauteur, période et direction.

#### Propagation des houles jusqu'à la côte

Les houles se propagent sans déformation tant que la profondeur est grande, c'est à dire supérieure à la demi-longueur d'onde.

À l'approche des côtes, elles subissent de fortes modifications par réfraction ou déferlement et par diffraction et réflexion lorsqu'elles rencontrent des obstacles.

Les modifications subies à l'approche des côtes sont directement liées aux caractéristiques des houles elles-mêmes (période  $T$ , longueur d'onde  $L$ , hauteur  $H$ , direction  $D$ ) ainsi qu'à la bathymétrie, dont découle la profondeur d'eau.

### Déferlement

La *cambrure* ( $H/L$ ) augmente jusqu'à une cambrure limite, à laquelle le déferlement se produit. Le lieu de déferlement dépend directement de la profondeur d'eau.

Le déferlement est à l'origine d'une grande dissipation d'énergie. Celle-ci débute avant le point de déferlement et se traduit par une variation du niveau d'eau. Cette élévation de la surface libre, comptée à partir du niveau d'eau au repos, est appelée *set-up* à l'intersection avec le trait de côte. Le *run-up* est la hauteur maximale, comptée à partir du niveau d'eau au repos, atteinte par la vague sur le rivage. Si celle-ci est supérieure au niveau du rivage ou à la crête des ouvrages présents sur celui-ci, le déferlement produira des franchissements.

### Impact sur le littoral

La dissipation d'énergie lors du déferlement des vagues a plusieurs impacts au niveau du trait de côte, dont les principaux sont :

- mobilisation des sédiments meubles, érosion,
- déstabilisation des ouvrages,
- franchissements, submersion,

### Évolutions observées au large.

L'évolution en fréquence et en intensité des houles extrêmes n'est pas établie sur ces vingt-cinq dernières années. En particulier, les données mesurées de houle, qui permettraient de confirmer ou non ces informations issues de traitements numériques, n'ont pas une période d'observation suffisante [4].

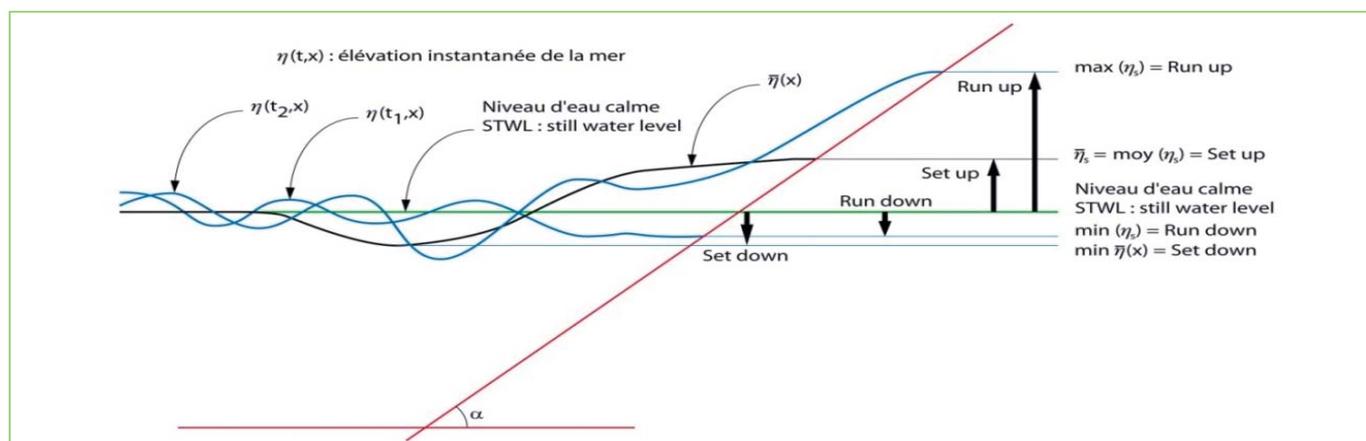


Figure 12 : Déferlement (CETMEF)

Dans le cadre du projet Discobole (Données pour le dimensionnement des Structures Côtières et des Ouvrages de BOrd de mer à Longue Echéance) mené par EDF R&D associé au CETMEF, à l'UBO et au Laboratoire de Géographie Physique (CNRS), une base de données de houles a été réalisée par simulation numérique à partir de forçages météorologiques de 1979 à 2003 sur l'ensemble du littoral français Atlantique-Manche-Mer du Nord. L'analyse statistique menée sur les 25 années de houle produites a montré qu'en eau profonde, l'intensité des houles était stationnaire sur la période considérée. Cette période d'observation reste cependant encore faible pour dégager clairement des tendances.

## Ce qui pourrait se passer

### L'impact du changement climatique sur les vagues

#### Au large

Un des impacts du changement climatique est la modification du régime des tempêtes qui conditionnent vents et pressions, qui viendra probablement modifier d'une part, la génération des vagues, et d'autre part, les régimes de surcotes.

L'évolution des houles en intensité et fréquence n'est cependant pas encore établie [29].

#### À la côte

L'impact le plus important sur les houles proviendra de l'élévation du niveau moyen de la mer. La modification du niveau marin, et donc de la profondeur, joue en effet un rôle significatif dans la propagation des houles.

Cette élévation aura peu d'impact sur les houles se propageant en grande profondeur mais un impact fort sur celles se propageant en profondeurs plus faibles au niveau des côtes (29), (30). L'augmentation de la profondeur d'eau permettra, du fait d'une plus faible atténuation (29), à des houles plus importantes en hauteurs et périodes d'atteindre les côtes. En première estimation par fonds plats, une augmentation du niveau moyen de la mer d'un mètre se traduirait par une augmentation de la houle incidente de

80 cm (d'après Mac Cowan, 1891 ; Munk, 1949). Cet effet sera d'autant plus sensible que les fonds seront faibles.

L'énergie dissipée au niveau du trait de côte sera bien plus importante qu'auparavant.

Avant d'atteindre le trait de côte, en zone de shoaling secteur où les vagues se gonflent et se cambrent sous l'effet de la diminution de profondeur, les impacts sur les houles pourraient être les suivants :

- aux profondeurs les plus grandes, l'élévation du niveau moyen de la mer aura peu d'effet,
- aux les profondeurs plus faibles, les effets du shoaling seront plus faibles pour des vagues équivalentes mais des vagues plus importantes pouvant se propager, les effets de celles-ci seront alors plus forts.

### Impacts sur le littoral

Les impacts du changement climatique seront les plus importants sur les zones soumises aux houles déferlantes, dans les petits fonds à proximité des côtes :

- plus fortes dissipations d'énergie au niveau du trait de côte accroissant les phénomènes d'érosion, l'élévation du niveau de la mer sera accompagnée d'une récession générale du trait de côte [29], importants dégâts sur les ouvrages en faibles profondeur (ouvrages de défense,...), déstabilisation due aux dépôts de sédiments, endommagement des carapaces,
- augmentation du run-up entraînant des franchissements par paquets de mer et des submersions marines. Des événements de franchissements liés aux vagues aujourd'hui considérés comme exceptionnels pourraient devenir plus courants du fait de houles plus fortes atteignant la côte grâce à une profondeur d'eau plus grande.

Ces impacts seront plus forts sur les littoraux à faibles marnage, du fait de la nécessité sur les côtes à plus fort marnage d'une concomitance entre les niveaux hauts de pleine mer et de fortes houles.

# Surcotes

## Ce que l'on constate actuellement

### Définitions

#### Surcote instantanée

La surcote instantanée est définie comme la différence positive à un moment donné  $t$  entre le niveau marin observé et le niveau de marée prédit. Dans le cas où le niveau marin observé est inférieur au niveau prédit, on parle alors de décote.

L'étude des surcotes est intéressante principalement dans le cadre de l'étude des niveaux marins extrêmes de pleine mer, la surcote étudiée est souvent la surcote de pleine mer, définie comme la différence entre le pic de pleine mer prédit et le pic du niveau marin observé même si ceux-ci n'interviennent pas simultanément.

Les surcotes (ou décotes) se déduisent essentiellement du niveau marin observé et de la marée prédite.

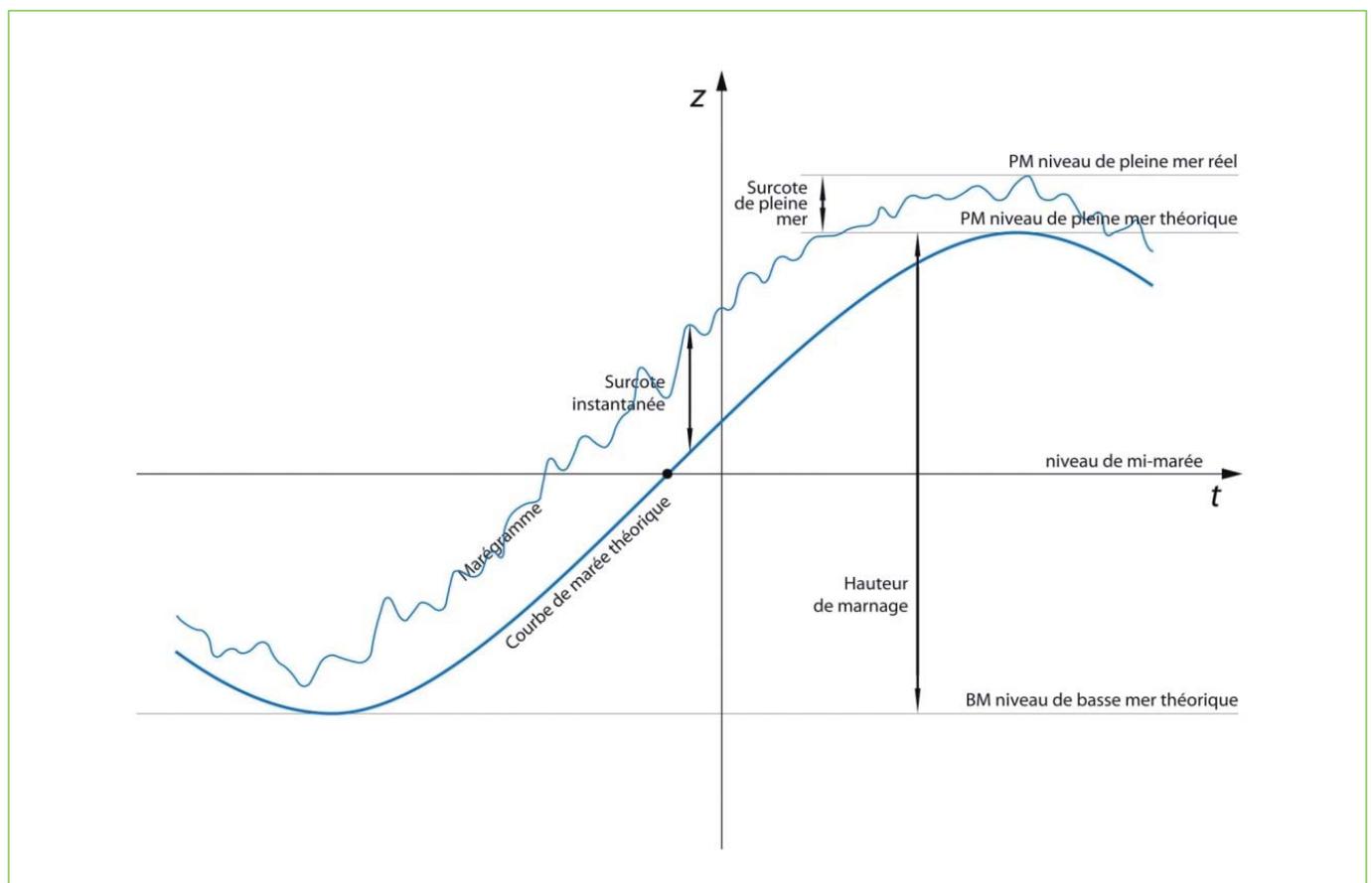


Figure 13 : Surcote instantanée et surcote de pleine mer (CETMEF)

#### Surcote météorologique

L'origine des surcotes (ou décotes) est essentiellement météorologique (surcotes ou décotes atmosphériques). Elles sont généralement provoquées par le passage d'une dépression météorologique (ou d'un anticyclone). La variation de niveau est

induite pour partie par les variations de pression atmosphérique accompagnant le passage de la perturbation et par l'action du vent à la surface de la mer.

Les surcotes générées par ces dépressions sont parfois aussi appelées, marée de tempête, et peuvent entraîner des variations

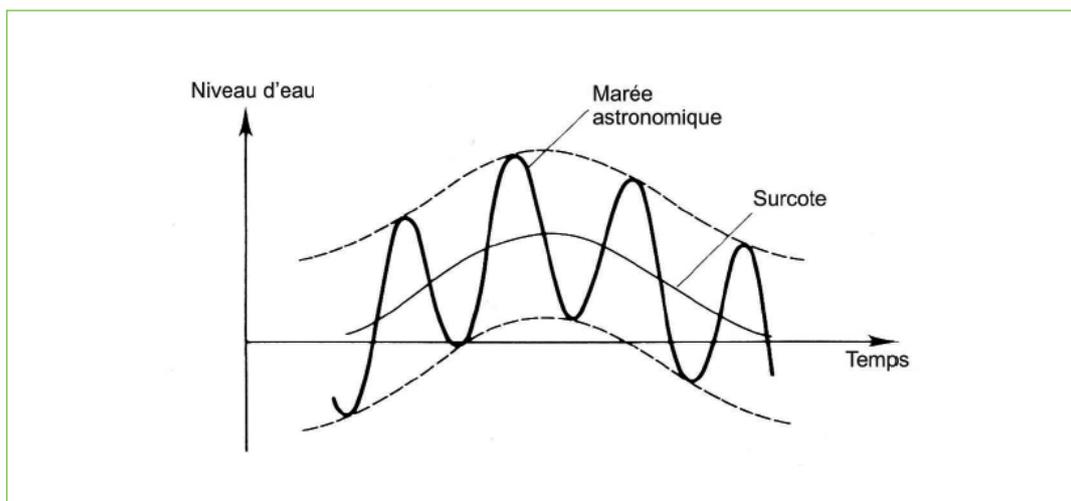


Figure 14 : Variation du niveau d'eau due à une surcote et à une marée astronomique.  
Source : Guide Enrochements, 2009.

du niveau de la mer jusqu'à 2 ou 3 mètres. Cette variation peut être d'autant plus importante que la dépression avance vite, particulièrement dans la zone où les profondeurs sont plus faibles.

Les effets de la pression atmosphérique et du vent se combinent lors de la génération de surcotes. Les faibles pressions provoquent une surcote. À l'inverse, les hautes pressions provoquent une décote. Ce phénomène est appelé effet barométrique inverse. Ainsi une baisse de pression d'un hectopascal élève le niveau marin d'environ un centimètre. Cette valeur peut cependant être plus ou moins élevée selon la topographie du fond et la vitesse de déplacement de la dépression.

Près des côtes, les effets dynamiques prennent donc de l'ampleur et amplifient les surcotes.

Dans nos régions, les pressions s'étalent entre 950hPa et 1050hPa, agissant ainsi sur le niveau de la mer d'une valeur comprise entre -0.37 m et 0.63 m. Les caractéristiques des champs de vent (direction, vitesse et durée d'action) permettent d'évaluer cette surcote due au vent.

### Seiches

Les seiches sont des oscillations stationnaires observées dans des zones plus ou moins confinées et générées par des perturbations météorologiques externes. On les observe le plus souvent dans des zones semi-fermées telles que les baies ou les estuaires. Elles ont une période propre dépendant de la géographie et de la bathymétrie, souvent comprise entre 10 minutes et quelques heures, et plus faible dans les ports (30 secondes à 10 minutes). Les variations de niveau provoquées par les seiches restent généralement de l'ordre de quelques centimètres à quelques décimètres et peuvent atteindre jusqu'à un mètre comme à Port-Tudy.

De nombreux phénomènes sont fréquemment évoqués comme origine des seiches : variations d'intensité de précipitation, irrégularité de la houle, variations de la vitesse du vent, variations de pression atmosphérique... Sur les façades Manche Atlantique, les ondes longues liées aux trains de vagues apparaissent comme l'élément déclencheur le plus probable [32].

### Surcote liée aux vagues

La surcote liée aux vagues (*setup*) : à l'approche de la côte, les vagues déferlent du fait des conditions de géographie et de

bathymétrie côtière, ainsi que des caractéristiques des vagues, hauteur et période

Plus précisément, lorsque le plateau continental est large, le forçage atmosphérique est prépondérant ; lorsque les pentes sous-marines sont fortes et le plateau continental étroit, la surcote liée aux vagues prédomine souvent.

### Impacts sur le littoral

Les surcotes peuvent avoir un impact important puisqu'elles peuvent provoquer des fortes variations du niveau marin et entraîner des niveaux marins extrêmes provoquant des submersions marines.

### Évolutions observées

Dans le cadre du projet Discobole (Données pour le dimensionnement des Structures Côtières et des Ouvrages de Bord de mer à Longue Echéance) mené par EDF R&D associé au CETMEF, à l'UBO et au Laboratoire de Géographie Physique (CNRS), une base de données de surcotes a été réalisée par simulation numérique à partir de forçages météorologiques de 1979 à 2003 sur l'ensemble du littoral français métropolitain Atlantique-Manche-Mer du Nord.

L'analyse statistique menée sur les 25 années de surcotes produites a montré qu'aucune tendance ne pouvait être décelée quant à l'évolution des surcotes. La durée d'observation de 25 ans n'est pas encore cependant suffisante pour dégager des tendances liées au changement climatique à l'égard des phénomènes qu'on cherche à mettre en évidence.

### Ce qui pourrait se passer

#### L'impact du changement climatique sur les surcotes et décotes

Les modifications des régimes de tempêtes viendront modifier les processus d'apparition des surcotes (ou décotes), liées directement aux conditions de vent et de pression. D'autre part, l'élévation du niveau moyen de la mer viendra modifier leur propagation.

L'évolution des surcotes extrêmes avec l'élévation du niveau moyen de la mer reste très difficile à estimer [30]. Dans le cas d'un océan à fond plat, la surélévation du niveau de la mer accroîtrait les risques d'apparition des surcotes extrêmes [29].

Les surcotes peuvent être reproduites à l'aide de modèles numériques adaptés (Benoit et al, 1997). La modélisation numérique reste le meilleur outil pour cerner l'influence d'une élévation du niveau de la mer sur les surcotes [29]

Dans le cas de la Méditerranée, il y aurait un impact faiblement modérateur des changements de conditions atmosphériques sur la fréquence des surcotes extrêmes. Ce serait d'un ordre de grandeur inférieur à l'impact de la hausse du niveau marin (Ullman, 2008). L'impact du changement climatique sur les cyclones est du domaine de la recherche car le changement

climatique aurait des effets contradictoires sur l'intensité des cyclones et leur genèse [33].

### Impact sur le littoral

L'évolution des surcotes extrêmes viendra directement faire évoluer les niveaux marins extrêmes de pleine et basse mers. L'impact principal concerne le risque de submersion marine et la conception des aménagements et infrastructures portuaires et côtières.

## Les effets possibles sur les milieux, les territoires littoraux et les activités humaines

### Impacts possibles sur les milieux et les territoires

<i>Types de territoires et milieux exposés</i>	<i>Nature des impacts</i>
Côtes basses et falaises meubles	Érosion – départ de sédiments
Zones basses	Submersion

### Impacts possibles sur les activités humaines

<i>Type d'activité</i>	<i>Impacts</i>
Exploitation portuaire	Fragilisation des infrastructures portuaires et littorales liée à l'évolution des sollicitations Évolution des possibilités d'exploitation portuaire liées aux infrastructures existantes
Habitat	Endommagements liés aux inondations, de l'habitat, des infrastructures et réseaux, des installations d'activité, privées et publiques.



## *Effets sur les milieux*

- Submersions marines
- Érosion – Accrétion
- Acidification de l’océan
- Accentuation de la salinisation des eaux souterraines littorales
- Modification de la composition des communautés biotiques
- Invasions biologiques
- Nouvelles toxicités pour l’homme



# Submersions marines

## Ce que l'on constate actuellement

### Définition

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

Il y a 3 modes de submersion marine possibles [31] :

- « au débordement », lorsque le niveau de la mer est supérieur au niveau des ouvrages de défense ou aux trait de côte naturels,
- à « des franchissements par paquets de mer » liés au déferlement des vagues, Les phénomènes de franchissement sont la conséquence d'une élévation instantanée du niveau marin lié au flux et reflux des vagues sur la plage. La hauteur d'eau maximale atteinte par la mer au dessus de son niveau moyen étant appelée *run-up* (cf. Figure).
- « à la rupture ou à la destruction d'un cordon dunaire à la suite d'une érosion intensive, » ou « la rupture de digues ou d'ouvrages de protection », lorsque le niveau topographique en arrière est inférieure au niveau de la mer

### Quelques événements de submersion marine

Lors de la tempête du 1 février 1953, les submersions marines ont causé 2000 morts et l'évacuation de 72000 personnes en Hollande, 300 morts en Angleterre, 25 en Belgique, et de nombreux dégâts en Allemagne et en France. Si le caractère exceptionnel de la tempête (des surcotes de plus de 3m ont été observées) est en cause, l'entretien des digues avait été relativement négligé depuis les années 30, et a été un des facteurs aggravants de la tempête en Hollande notamment.

La tempête Lothar du 27 décembre 1999 a également causé des submersions marines.

Dans les Antilles et à la Réunion, les épisodes de houle cyclonique, éventuellement créés par des cyclones situés assez loin au large des

côtes, sont à l'origine de submersions, de dégâts aux infrastructures par le choc mécanique des vagues, la mise en mouvement de débris et l'affouillement. A titre d'exemple, le cyclone de 1928 a causé 1200 morts en Guadeloupe. Il a été caractérisé par une submersion du « Petit Cul-de-sac marin » lié à une trajectoire particulière du cyclone. À la Réunion, outre les épisodes de houle cyclonique tels que Gamède (2007), la houle australe peut avoir des effets similaires : ainsi en mai 2007, une houle australe a fait 2 morts, coulé de nombreuses embarcations dans des ports et causé des dommages à des infrastructures côtières.

### Origine des submersions marines

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

Les submersions marines sont liées à plusieurs phénomènes naturels qui sont des composantes du niveau marin (cf. fiche Niveau marin et surcotes) ou l'impact des houles). La hauteur d'eau maximale atteinte par la mer au dessus de son niveau moyen (*run-up*) est déterminée en cumulant le niveau de marée prédit, la surcote atmosphérique, le set-up et le swash. (cf. fiche Propagation des vagues à la côte

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

### La problématique de submersion marine

Les dommages liés à une tempête sont liés à la conjonction de plusieurs phénomènes et pas uniquement de la surcote : pris individuellement, chacun des paramètres (hauteur des vagues, surcote, marée) peut-être caractérisé par une probabilité d'occurrence. Pour autant, le caractère extrême d'une valeur donnée est souvent découplé des dommages causés par une tempête : ainsi, les plus fortes houles de la tempête du 24/01/2009

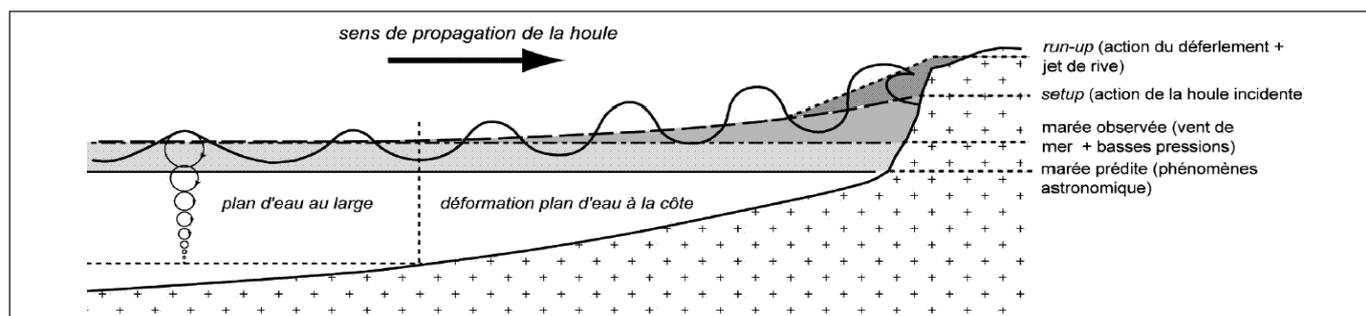


Figure 15 : Principaux paramètres entrant en compte dans l'évaluation des niveaux marins extrêmes.

Source : Cariolet et Suanez, 2008.

ont eu lieu à marée basse et n'ont pas causé de dégâts (au contraire des vents forts). Un autre exemple est la tempête du 10 mars 2008 qui a affecté les côtes bretonnes a causé de nombreux dommages (en particulier liés à des inondations) alors que, pris individuellement, chacun des paramètres n'était pas extrême : vents de 130 à 140km/h, hauteur significative de houle de 10 m sur la bouée des Pierres Noires mouillée au sud de Ouessant, marée de coefficient 105 (Sources : Météo-France, Previmer, Cetmef).

### Vulnérabilité des zones côtières à la submersion

La caractérisation de la submersion est en premier lieu liée à l'étude des niveaux extrêmes de la mer.

Pour la France, par exemple, une étude du conservatoire du littoral indique que 80 % des sites du patrimoine (actuel et futur) du Conservatoire sont concernés par des phénomènes d'érosion et/ou de submersion [8].

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

#### Limitations des connaissances :

L'ensemble des travaux disponibles ne permettent pas d'avoir une connaissance suffisamment fine tant des ouvrages que de la topographie (zones littorales et zones basses arrière-littorales) pour apprécier les conséquences sur l'ensemble du territoire français d'éventuelles submersions marines [20]. En particulier, les cotes d'altitude ne sont pas toujours connues avec la précision nécessaire pour établir les conséquences possibles d'une élévation du niveau marin de quelques dizaines de centimètres à l'horizon 2100 [8].

## Ce qui pourrait se passer

### Les impacts du changement climatique sur les facteurs de submersion

L'élévation du niveau moyen de la mer, engendrera une submersion permanente de zones basses et les niveaux marins extrêmes actuels seront atteints plus fréquemment qu'aujourd'hui [15]. De nouveaux territoires feront l'objet de submersions temporaires lors de tempêtes.

D'autres conséquences du changement climatique pourront avoir un impact sur la submersion temporaire : c'est le cas de possibles changements pour les vagues extrêmes [29] développé dans la fiche « vagues ».

L'impact direct du changement climatique sur les régimes de surcote n'a été quantifié qu'à travers des travaux de recherche.

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

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

### Effets sur les côtes

L'élévation du niveau de la mer au cours des 100 prochaines années, les évolutions dans la fréquence et l'intensité des tempêtes se traduiront par un accroissement de la fréquence des surcotes,

mais les effets précis sont incertains et dépendent de la nature des côtes.

### Territoires poldérisés ou protégés par des digues

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

### Zones basses non protégées par des digues

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

### Marais

Les marais littoraux peuvent s'adapter jusqu'à une valeur d'élévation du niveau de la mer de 1cm/an (soit 1 m sur 100 ans) s'ils sont dans des conditions optimales d'apports en sédiments, de salinité, de qualité des eaux et sous une pression anthropique modérée [25]. Si ces conditions ne sont pas remplies, les zones humides peuvent s'éroder et être submergées.

### Baies et golfes

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

### Estuaires

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

### Changement global et submersions

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

**Analyse partielle sur les terrains du Conservatoire du Littoral (8):**

Si la situation actuelle est préoccupante, on peut a priori estimer que l'impact de l'élévation du niveau de la mer restera assez limité sur les terrains du Conservatoire du Littoral : seuls 3 % de la superficie des terrains non endigués actuels sont exposés à la submersion, et seulement 2,6 % des acquisitions futures le seront.

En revanche, la submersion possible des vastes espaces endigués (ex. : les marais de Brouage) que le Conservatoire possède déjà ou qu'il est susceptible d'acquérir, est d'une toute autre ampleur. En effet, 7 % de la superficie des sites acquis et 17 % des acquisitions futures sont constitués de terrains situés en dessous du niveau des pleines mers actuelles.

### Les effets possibles sur les milieux, les territoires littoraux et les activités humaines

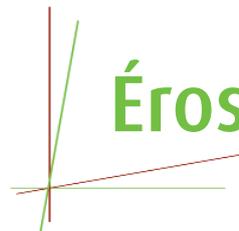
#### Impacts possibles sur les milieux et les territoires

<i>Types de territoires et milieux exposés</i>	<i>Nature des impacts</i>
Zones basses, zones endiguées, territoires poldérisés	Endommagement des infrastructures, réseaux, aménagements côtiers
Zones basses et aquifères côtiers	Salinisation des sols et des nappes phréatiques (si submersion)

#### Impacts possibles sur les activités humaines

<i>Type d'activité</i>	<i>Impacts</i>
Urbanisation	Augmentation des coûts d'entretien des défenses et des aménagements contre la submersion Réduction des surfaces disponibles pour l'habitat et les activités
Agriculture	Modification de la qualité des sols (effets sur les rendements agricoles)
Usages de l'eau	Modification de la qualité des eaux souterraines (effets sur l'approvisionnement en eau de consommation).





# Érosion – Accrétion

## Ce que l'on constate actuellement

### Définition

L'érosion est définie comme un gain d'espace de la mer sur la terre et l'accrétion comme un gain de la terre sur la mer, s'observant sur des périodes suffisamment longues [33].

### Les mouvements du trait de côte

Le littoral est un système dynamique dont la morphologie évolue à différentes échelles temporelles et spatiales [14]. Il a beaucoup évolué au cours des temps historiques, en réponse à la disponibilité sédimentaire, à l'influence des tempêtes, des vagues, des courants, du niveau marin relatif sur certains sites et aussi des activités anthropiques. Ces mouvements sont tout particulièrement importants dans les zones basses telles que les zones deltaïques, les plages de sable ou de galets, les marais côtiers et certaines falaises (meubles ou composées de roches tendres telles que la craie).

### Les évolutions de l'érosion et de l'accrétion dans le monde, en Europe et en France

D'une manière générale, les côtes mondiales subissent actuellement des phénomènes érosifs. En particulier, 70 % des plages seraient en érosion, contre seulement 10% en accrétion [34].

L'état des côtes de l'Union Européenne<sup>1</sup> montre que 20 % des côtes sont en érosion pour toute l'Union ce qui représente au total 15 km<sup>2</sup> de territoires littoraux perdus chaque année.

Pour la France (données sur la métropole et la Corse) l'érosion touche plus de 27 % des côtes. Elle se répartit différemment selon les milieux : 41,4 % des plages, 23 % des côtes rocheuses et 11,8 % des littoraux vaseux. A contrario, près de la moitié des littoraux vaseux sont en engraissement ainsi que 10 % des plages.

La part du littoral naturel en recul est très variable sur le littoral métropolitain. Elle est faible (inférieure à 10 %) en Corse et en Ile et -Vilaine. Elle est par contre très forte -supérieure à 70 %- dans le Pas de Calais, en Seine Maritime, dans le Calvados et dans le Gard.

En Aquitaine, les zones en recul représentaient, sur le littoral sableux, 51 % du linéaire côtier pour la période 1825-1966, et 70 % du linéaire entre 1966 et 1988. Les zones de recul les plus importantes depuis les relevés de 1825 laissent apparaître des reculs pouvant atteindre, sur cent cinquante ans, entre 100 et 150 mètres.

La côte rocheuse basque connaît une multiplication des risques due à l'addition de l'érosion marine aux problèmes géologiques des falaises constituées de roches friables, altérées et largement fragilisées par les infiltrations d'eau, accentuées par l'urbanisation importante [4].

Morphosédimentologie / Tendence	Côtes rocheuses		Plages		Rivages limonovaseux	
	%	km	%	km	%	km
Engraissement	NS	34 km	10,4 %	232 km	48,6 %	119 km
Stabilité	64,4 %	1216 km	45,8 %	1 022 km	35,1 %	86 km
Érosion	23 %	436 km	41,4 %	924 km	11,8 %	29 km
Pas de données	10,6 %	200 km	2,3 %	52 km	4,5 %	11 km
Total	100 %	1886 km	100 %	2 230 km	100 %	245 km

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

### Plages sableuses ou à galets

Les tendances d'évolution ne sont pas constantes dans le temps et peuvent même parfois s'inverser. La côte aquitaine montre en moyenne un recul 1 à 3 m/an depuis 1825 avec une augmentation des zones en recul dans les 40 dernières années : les zones en recul

qui concernaient 50% de la côte entre 1825 et 1996 concernaient 70 % de la côte pour la période de 1966 à 1996<sup>2</sup>. Elles sont également très variables dans l'espace : dans l'Hérault, la plage de l'Espiguette est en accrétion avec une avancée de la flèche sableuse de 2 à 3 m/an alors qu'à l'inverse à quelques km à l'ouest la plage subit une érosion de 1 à 3 m/an.

<sup>1</sup> Étudié dans le cadre du projet Eurovision [33].

<sup>2</sup> Données observatoire de la côte aquitaine ; [www.littoral.aquitaine.fr](http://www.littoral.aquitaine.fr).

## Marais côtiers

Les marais côtiers sont aujourd'hui généralement en accrétion. C'est le cas en France par exemple pour la Baie du Mont St Michel, le marais Poitevin ou Charentais. Ceci s'explique par la sédimentation verticale et latérale très rapide dont ils sont le siège. Cette sédimentation est d'origine minérale (limons et argile) et végétale (débris végétaux). Contrairement au cas des sédiments grossiers qui sont généralement en déficit, ces sédiments fins sont actuellement abondants [25].

## Côtes rocheuses

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

### Facteurs terrestres

Toutes les falaises s'érodent sous l'action de facteurs hydrométéorologiques tels que les précipitations, les cycles gel-dégel, ou sous l'action de processus hydrogéologiques et géomécaniques (ex. présence de nappes).

### Facteurs marins

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

À titre d'exemple, les falaises de craie de Haute Normandie présentent des valeurs de recul de 20 cm à 1 m/an [32]. Le processus n'est pas continu mais se produit par à coups sous forme d'effondrements pouvant provoquer des reculs importants en un seul évènement (7 m enregistrés à Criel sur Mer).

## Pour résumer

L'érosion des littoraux qui est généralement constatée aujourd'hui est liée en premier lieu à une pénurie de sédiments et à la perturbation de leur transport [25]. Dans ce contexte, les tempêtes, les vagues, les courants et la hausse relative du niveau marin sur certains sites favorisent l'érosion. En outre, les activités humaines (agriculture, aménagement des fleuves et des littoraux) ont une incidence de plus en plus importante sur le trait de côte.

## Vulnérabilité des zones côtières à l'érosion

Le Projet européen EUROSION (2002 – 2004) a réalisé une évaluation cartographique de la vulnérabilité des côtes européennes au risque d'érosion a permis de prendre conscience de l'ampleur du problème : plus de 30 % des côtes sableuses sont en érosion et depuis 1986, le «bétonnage» des côtes a progressé de 934 km dans l'Europe des 12.

Les zones urbanisées (tissu urbain, zones industrielles et commerciales, ports et voies de communication) représentent 23 % des terres situées à moins de 250 m des côtes en recul, soit près de 10 000 ha.

Les milieux naturels, surfaces en eau et zones humides occupent plus de 50 % des terres situées à moins de 250 m des côtes en recul.

En Aquitaine, les zones en recul représentaient, sur le littoral sableux, 51 % du linéaire côtier pour la période 1825-1966, et 70 % du linéaire entre 1966 et 1988. Les zones de recul les plus importantes depuis les relevés de 1825 laissent apparaître des reculs pouvant atteindre, sur cent cinquante ans, entre 100 et 150 mètres. La côte rocheuse basque connaît une multiplication des risques due à l'addition de l'érosion marine aux problèmes géologiques des falaises constituées de roches friables, altérées et largement fragilisées par les infiltrations d'eau, accentuées par l'urbanisation importante [4].

Dans un contexte où les zones côtières sont de plus en plus attractives et aménagées, la vulnérabilité des zones côtières aux risques côtiers s'est considérablement aggravée depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle.

Aujourd'hui, Un quart de la population mondiale vivrait à moins de 100 km d'une côte et en dessous de 100m d'altitude. En Europe, entre 1986 et 2003, des aménagements (habitations, tourisme, etc.) auraient été construits sur environ 950 km de côtes auparavant non bâties. En 50 ans en Europe, la population établie dans les municipalités côtières a plus que doublé pour atteindre 70 millions d'habitants en 2001. Cette tendance perdure en raison de l'attractivité des zones côtières. Cela se traduit par des coûts de plus en plus importants visant à maintenir le trait de côte dans son état actuel : en Europe entre 1986 et 2001, les dépenses publiques consacrées à la défense contre la submersion et l'érosion ont progressé de 30 % pour atteindre 3.2 milliards d'Euros en 2001.

## Limites des connaissances

L'impact de l'élévation du niveau marin sur l'érosion des côtes est mal connu : la loi de Bruun [33] utilise des paramètres géométriques d'une section de plage pour prédire son retrait en cas d'élévation du niveau marin. Bien que largement utilisée, cette loi ne peut s'appliquer dans la plupart des cas réels [34], à tel point que son auteur lui-même a dû repréciser ses conditions d'application [35] et [36]. Pour certains auteurs [37], les modélisations mathématiques de l'érosion ne peuvent répondre à la question de l'impact de l'élévation du niveau marin sur le trait de côte. Cette opinion n'est pas partagée par d'autres communautés scientifiques issues de la modélisation [38] pour qui la recherche dans ce domaine demeure pertinente.

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

## Ce qui pourrait se passer

### Les impacts du changement climatique

Le changement climatique engendre une élévation du niveau marin qui se poursuivra au 21<sup>e</sup> siècle (voir fiche 2 Élévation du niveau moyen de la mer).

Cependant, les modifications des régimes de vagues pourraient avoir un impact important sur certains bassins tels que l'Atlantique Nord (39) (cf. fiche 2 Modification des vagues à la côte).

### Les impacts possibles en France

Le Conservatoire du Littoral a lancé en 2002 [5] une analyse prévisionnelle de la submersion et de l'évolution du trait de côte (érosion /engraissement) sur la base d'une remontée du niveau moyen de la mer de 44 cm (valeur la plus probable) en 2100). Cette étude a déjà démontré plusieurs faits : des gains de terrains sont attendus dans les baies comme à Audierne ; les terrains de la façade Nord-Pas-de-Calais semblent être les plus exposés aux phénomènes d'érosion ; en Aquitaine, la plage de l'Amélie pourrait perdre 76 % de sa surface et celle de la dune du Pyla plus de 80 %.

### Effets sur les plages : une érosion accélérée

Le changement climatique engendrera une accélération consécutive de l'érosion des plages (en tout cas de celles déjà soumises à ce problème) tandis que leur reconstruction naturelle

entre les tempêtes sera freinée. Autre conséquence possible : une modification de la circulation sédimentaire et des courants littoraux pouvant priver les plages de leur alimentation régulière en sédiments.

Les secteurs soumis à un grand marnage sont particulièrement vulnérables du fait de la conjugaison possible de grandes marées et de tempêtes. L'impact des vagues et de la surcote aurait alors un effet bien plus dévastateur.

Localement et de façon actuellement imprévisible, les barres d'avant-côte [3], les dunes bordières ou les ouvrages de défense pourraient ne plus suffire à contenir les assauts de la mer. Les plages seront alors soumises à des aléas locaux d'inondation avec, en outre, une possibilité d'ensablement de l'arrière-côte due aux vents transportant le sable des plages vers l'intérieur des terres. Ce sera particulièrement le cas pour les dunes sans végétation.

Dans le monde, 70 % des plages seraient en érosion contre 20 % stables et 10 % en accrétion [34]. Avec le changement climatique, on doit s'attendre à ce que cette situation s'aggrave. L'équilibre d'une plage est lié à la disponibilité des sédiments, à des pressions telles que l'élévation du niveau marin et à des forçages tels que les tempêtes, les vagues et les courants. L'aspect du changement climatique qui cause le plus d'inquiétude est la hausse du niveau marin.

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

### Effets sur les côtes rocheuses

#### *Facteurs terrestres*

Dans le nord de la France où une augmentation de précipitations est attendue d'après les modèles de Météo-France, cela pourra induire une augmentation des éboulements et des effondrements

#### *Facteurs marins*

L'impact de l'élévation du niveau de la mer sera négligeable sur les côtes de roches dures comme les côtes granitiques en Bretagne toutefois les plages de poche situées fréquemment en pied de ces falaises auront tendance à se réduire voire à disparaître.

Pour ce qui concerne les côtes de roches tendres ou meubles, l'élévation du niveau de la mer aura les conséquences suivantes :

- lorsque la falaise est directement en contact avec la mer à marée haute, l'érosion liée aux vagues. La présence d'un platier rocheux jouera un peu moins son rôle de brise lames naturel et de protection de la falaise vis-à-vis de l'agression des vagues.
- dans le cas de falaises protégées actuellement par une plage de sable ou de galets, ces plages seront érodées voire pourront disparaître. La falaise sera alors moins protégée de l'action mécanique des vagues notamment lors de tempêtes.

Ce sont plutôt des études locales de vulnérabilité de telle ou telle falaise qui peuvent renseigner quant à sa vulnérabilité face à une élévation du niveau marin : le changement climatique aurait de manière es effets contradictoires: précipitations plus fréquentes, augmentation de la hauteur des vagues et élévation du niveau

marin allant en faveur de l'érosion, cycles gel/dégel moins fréquents allant dans le sens d'une stabilisation.

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

### Effets sur les marais côtiers

L'élévation du niveau de la mer ne représente pas un danger même s'il est difficile de prévoir leur comportement face à l'augmentation des événements extrêmes.

Les marais littoraux peuvent s'adapter jusqu'à une valeur d'élévation du niveau de la mer de 1cm/an (soit 1 m sur 100 ans) s'ils sont dans des conditions optimales d'apports en sédiments, de salinité et de qualité des eaux et sous une pression anthropique modérée (24). Cette élévation du niveau de la mer aura pour conséquence de les rendre plus sensibles à l'action de la houle. Avec la hausse du niveau marin, les processus érosifs prendraient plus d'ampleur sans que cela ne se traduise nécessairement par un basculement vers une situation d'érosion. Ainsi, en termes d'érosion marine, le changement climatique semble moins préoccupant que les pressions anthropiques.

### Effets sur les estuaires

L'érosion des berges et la submersion dans les zones basses seront favorisées. L'érosion des rives dépendra des actions opposées exercées par l'élévation du niveau de la mer et les tempêtes, et par les apports fluviaux. Cela pourrait toucher les estuaires de la Loire et de la Gironde.

### Effets sur les baies: comblement progressif

Les baies, souvent à dominantes vaseuses et partiellement protégées des houles, verront leur comblement s'accroître, comme on le constate déjà dans le fond du Bassin d'Arcachon ou de la baie de Somme.

### Effets sur les ouvrages de défense

Les ouvrages de défense côtiers pourront être déstabilisés lors de tempêtes dans les cas où l'érosion entraînerait la disparition des plages situées en avant des ouvrages.

### Changement global et érosion

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

- les pressions anthropiques (aménagements, tourisme, etc.) qui sont des causes connues de la dégradation des zones littorales depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle ;
- le changement climatique qui deviendra probablement un facteur de changement important au 21<sup>e</sup> siècle.

## Exposition des régions européennes à l'érosion côtière

Cette carte d'exposition des régions européennes à l'érosion côtière a été établie à partir de données réunies par EUROSION. Sur cette carte, une région est considérée comme une entité administrative régionale telle qu'elle est définie par le Fonds de Développement Régional Européen. Ceci correspond à une limite administrative européenne de niveau 2 (niveau NUTS 2). Cependant, dans quelques pays cela peut correspondre à un niveau NUTS 1 (par exemple Royaume-Uni) ou NUTS 0 (par exemple au Danemark). Pour chaque région, un ensemble de 13 indicateurs – 9 indicateurs d'états et de pression (sensibilité) et 4 indicateurs d'impact ont été calculés. Les 9 indicateurs d'état et de pression (ou indicateurs de sensibilité) fournissent une évaluation quantifiée des différents facteurs qui caractérisent ou exacerbent les processus d'érosion côtière.

Ces facteurs incluent : l'évaluation du niveau de la mer, l'instabilité du trait de côte, le changement dans le type d'érosion au cours des 15 dernières années, les plus hauts niveaux marins, la croissance de l'urbanisation côtière entre 1975 et 1990 ; le déficit des sédiments fluviaux, la sensibilité à l'érosion du substratum géologique, l'altitude, l'importance des défenses frontales.

En ce qui concerne les 4 indicateurs d'impact, ils fournissent une évaluation quantifiée des biens sociétaux, économiques et écologiques localisés dans la zone d'impact de l'érosion côtière. À cause de l'échelle de la base de données EUROSION 1.100 000. Il n'est pas possible de limiter cette zone d'impact avec précision. Le concept d'influence de l'érosion côtière – défini comme l'espace terrestre limité à 500 m de la côte et à une altitude de 5 m – a été introduit pour caractériser la zone d'impact.

Les indicateurs d'impact incluent : la population vivant dans la zone d'influence de l'érosion côtière, les surfaces industrielles et urbaines, la croissance des surfaces urbanisées entre 1975 et 1990 et les espaces de grande valeur écologique dans cette même zone.

À leur tour, les indicateurs de sensibilité et les indicateurs d'impact ont été rassemblés dans des indices de sensibilité et d'impact qui définissent le risque d'érosion côtière. En fonction de cette valeur, les régions côtières ont été classées en 4 catégories différentes : (I) très haute exposition, (II) forte exposition, (III) exposition modérée, (IV) faible exposition. Des détails complémentaires sur cette méthodologie sont donnés dans le rapport final EUROSION.

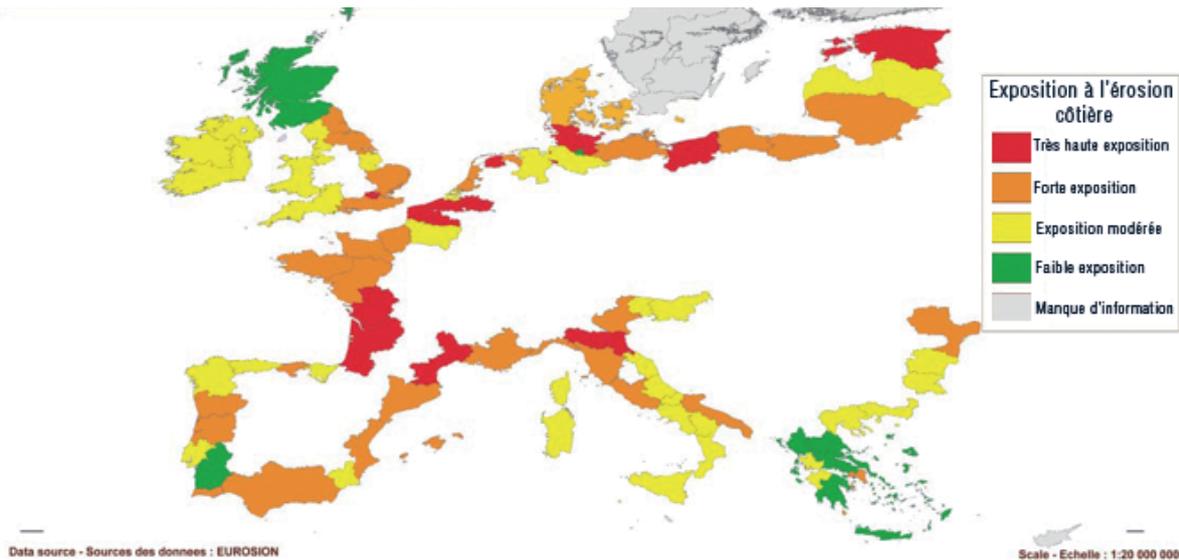


Figure 16 : Carte d'exposition des régions européennes à l'érosion côtière – Source : EuroSION – rapport 2004

## Les effets possibles sur les milieux, les territoires littoraux et les activités humaines

L'érosion induit trois types de risques :

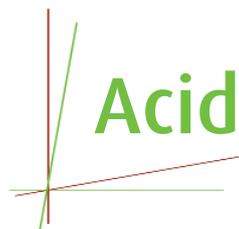
- La perte de terrain
- La fragilisation des défenses côtières naturelles (ex. dunes) ou artificielles (ex. digues) pouvant parfois entraîner une rupture et une submersion marine.
- La sape d'ouvrages de protection.

### Impacts possibles sur les milieux et les territoires

<i>Types de territoires et milieux exposés</i>	<i>Nature des impacts</i>
Zones littorales de roches meubles (falaises) et de sédiments	Perte de territoire émergé.
Plages touristiques	Érosion des plages.
Zones agricoles, urbanisées	Modification de l'usage des sols (en raison de la salinisation ou de l'aggravation des risques côtiers).

### Impacts possibles sur les activités humaines

<i>Type d'activité</i>	<i>Impacts</i>
Habitat et aménagements situés sur les zones littorales ; de roches meubles (falaises) et de sédiments	Expropriations ; perte d'activités situés sur ces zones.
Tourisme	Modification- réduction de la fréquentation touristique.
Ouvrages de défense	Fragilisation des ouvrages ; Reconsidération des politiques liées à ces ouvrages (maintien ?).



# Acidification de l'océan

## Ce que l'on constate actuellement

L'acidité de l'océan augmente au fur et à mesure de l'absorption du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) de l'atmosphère. Les mesures montrent que le pH en surface a diminué de 0,1 unité depuis 1750. La surface de l'océan a absorbé près de la moitié de l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> dues à l'utilisation des énergies fossiles ces 250 dernières années, réduisant d'autant le CO<sub>2</sub> restant dans l'atmosphère [2].

## Description du phénomène

« L'acidification de l'océan » désigne la diminution du pH de l'eau de mer (d'environ 0,1 unité dans les eaux de surface depuis 1800, début de l'ère industrielle)<sup>1</sup>, due à l'absorption du dioxyde de carbone atmosphérique. Aujourd'hui, l'océan stocke la moitié du CO<sub>2</sub> anthropique émis entre 1800 et 1994, et il a absorbé le tiers des émissions récentes [41]. En 1800, la pression partielle p(CO<sub>2</sub>) du CO<sub>2</sub> atmosphérique était de 280 ppm. Elle a atteint 330 ppm dans les années 1970 (+50 ppm en 170 ans), puis 384 ppm en 2007 (+50 ppm en 30 ans).

Au cours de la décennie 90, l'océan a piégé 2,2 ± 0,5 Pg/an<sup>5</sup> de carbone anthropique. Du fait de leur étendue et de leur température froide, ce sont les régions océaniques extratropicales de l'hémisphère sud (entre 30°S et 50°S) qui absorbent la majorité du CO<sub>2</sub> anthropique, même si c'est en Atlantique nord que les quantités piégées par unité de surface sont les plus élevées : l'Atlantique nord, avec 15 % de la superficie de l'océan mondial, contient 23 % de la totalité du CO<sub>2</sub> anthropique absorbé par l'océan.

Dans les eaux mélangées de surface, le CO<sub>2</sub> dissous est en quasi-équilibre avec le CO<sub>2</sub> atmosphérique. Il réagit avec l'eau de mer pour former de l'acide carbonique H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, qui se dissocie en ions bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), carbonate (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) et hydrogène (H<sup>+</sup>) suivant les réactions :



Dans les conditions actuelles d'équilibre thermodynamique, à pH = 8,2, la forme dominante de carbone est l'ion bicarbonate HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (~ 88 %), les autres formes (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> et CO<sub>2</sub>) étant peu présentes (11 % et 0,5 % respectivement.). Ces proportions peuvent être légèrement modifiées en fonction de la température, de la salinité et de la pression (cf. infra).

L'équilibre entre les trois formes explique le « pouvoir tampon de l'eau de mer ». L'absorption du CO<sub>2</sub> entraîne la formation de

bicarbonate à partir d'ions H<sup>+</sup> et CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, réaction qui freine la diminution du pH, mais d'autant moins que la concentration en CO<sub>2</sub> croît et que diminue la concentration en ions CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. C'est l'une des causes du maintien du pH des eaux marines superficielles entre des limites relativement étroites (pH ≈ 8,1 en moyenne), avec des fluctuations de ± 0,3 unités attribuables à plusieurs facteurs tels que la variabilité saisonnière (augmentation du pH avec la température), les conditions hydrodynamiques (*upwelling*, i.e. remontée d'eau profonde riche en CO<sub>2</sub>), ou autres conditions régionales (influence des bassins versants en domaine côtier).

Dans les eaux de surface, les valeurs les plus élevées du pH correspondent aux zones de forte productivité, où le CO<sub>2</sub> sous forme de carbone inorganique dissous (CID) est fixé par le phytoplancton. Une partie de ce carbone intégré, à la matière organique, chute vers les eaux profondes et y demeure pendant plusieurs siècles. À l'échelle de l'océan mondial, cette « pompe biologique » crée un gradient surface-fond qui mobilise une quantité de CID 3,5 fois supérieure à celle du CO<sub>2</sub> atmosphérique, d'où l'intérêt accordé à l'impact des changements du fonctionnement de la pompe biologique sur la composition de l'atmosphère.

Mais cette pompe biologique interagit avec la « pompe de solubilité ». Cette dernière est engendrée par le fait qu'à l'équilibre, la pression de vapeur saturante du CO<sub>2</sub> entre la phase liquide et la phase gazeuse ne dépend que de la température. Pour atteindre cet équilibre, la solubilité du CO<sub>2</sub> augmente quand la température décroît, d'où l'entraînement d'eaux enrichies en CO<sub>2</sub> vers le fond aux hautes latitudes, alors que la solubilité diminue aux basses latitudes, allant jusqu'à dégager du CO<sub>2</sub> dans les régions chaudes.

Globalement, la pompe de solubilité contribue aujourd'hui d'environ 30 à 40 % au gradient surface-fond du CID, les deux autres tiers de ce gradient étant attribuables à la pompe biologique.

## Modification chimique de l'environnement des organismes marins

De nombreux organismes marins élaborent des structures calcifiées en précipitant le carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) sous deux formes de structures cristallines, l'aragonite et la calcite.

On trouve la calcite par exemple chez les Coccolithophoridés (unicellulaires planctoniques photosynthétiques)<sup>3</sup>, chez les Échinodermes (i.a. oursins, étoiles de mer) et chez de nombreux Crustacés, et l'aragonite chez les coraux (tropicaux ou d'eaux froides). Les deux formes sont présentes – et souvent associées – chez la plupart des Mollusques<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Une diminution de 0,1 unité pH équivaut à une augmentation de 30 % de la concentration en ions H<sup>+</sup>.

<sup>2</sup> 1 Pg = 1 milliard de tonnes.

<sup>3</sup> La chute des aparticules de CaCO<sub>3</sub> biogénique (élaborées par le phytoplancton calcifié) diminue la concentration de CID dans les couches superficielles, et contribue à accroître la p(CO<sub>2</sub>). Ce phénomène est appelé « pompe d'alcalinité ».

<sup>4</sup> Il convient d'ajouter que plusieurs groupes d'organismes – en particulier les algues rouges coralligènes, les foraminifères benthiques, les bryozoaires et les échinodermes – élaborent de la Mg-calcite, c'est-à-dire de la calcite enrichie en ion magnésium. La solubilité de la Mg-calcite contenant une proportion significative de mgCO<sub>3</sub> est supérieure à celle de l'aragonite.

La précipitation et la dissolution du  $\text{CaCO}_3$  sont contrôlées par la concentration des ions  $\text{CO}_3^{2-}$ . Le degré de saturation de l'eau de mer en carbonates<sup>1</sup> est noté  $\Omega$ . L'eau de mer est dite sous-saturée en  $\text{CaCO}_3$  (i.e., corrosive pour les carbonates,  $\Omega < 1$ ) quand la concentration en ions  $\text{CO}_3^{2-}$  est insuffisante pour compenser la dissolution du  $\text{CaCO}_3$ , et réciproquement sursaturée en  $\text{CaCO}_3$  quand la précipitation du  $\text{CaCO}_3$  est favorisée ( $\Omega > 1$ ). La valeur  $\Omega = 1$  définit dans l'océan une frontière naturelle, appelée « horizon de saturation en carbonates ». La solubilité du  $\text{CaCO}_3$  augmentant avec la pression et diminuant avec la température, le  $\text{CaCO}_3$  se dissout au-dessous de l'horizon de saturation, qui se situe aujourd'hui entre 1 500 m et 5 000 m de profondeur pour la calcite (de 500 m à 2 500 m pour l'aragonite qui est plus soluble).

### État des connaissances

Les effets de cette acidification des océans observée sur la biosphère marine n'ont pas été documentés jusqu'à présent [28].

Malgré l'impact potentiel de l'acidification de l'océan sur les écosystèmes marins, les recherches engagées sur ce sujet n'en sont encore qu'à leur début, il s'ensuit un fort contraste entre la relative robustesse des prévisions d'évolution du pH des eaux marines d'une part, et la quasi-ignorance des effets futurs de l'acidification sur les organismes et les écosystèmes marins d'autre part.

### Ce qui pourrait se passer

Les simulations fondées sur les scénarios du RSSE prévoient une réduction du pH de surface des océans comprise entre 0,14 et 0,35 unité en moyenne mondiale au cours du 21<sup>e</sup> siècle [2].

Le processus d'acidification réduira la capacité de l'océan à capter le  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère, ce qui se traduira dans les évolutions climatiques futures, par une accélération de l'accumulation du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère.

L'accroissement de l'acidité des océans devrait avoir des impacts négatifs majeurs sur le processus de constitution de coquilles ou de squelettes d'organismes marins [42].

Évolution future du pH océanique – remontée de l'horizon de saturation des carbonates

Dans tous les scénarios envisagés par le GIEC, la pression partielle  $p(\text{CO}_2)$  continuera de croître dans les prochaines décennies : de 384 ppm en 2007, elle pourrait atteindre 700 ppm (scénario A1B) à plus de 900 ppm (scénario A1FI) en 2100.

Si les émissions se poursuivaient au taux actuel, la moyenne du pH des eaux marines superficielles ( $\approx 8,1$  aujourd'hui) pourrait atteindre 7,7 vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. Les simulations indiquent que la plus forte acidification se produira en Arctique, où le pH est aujourd'hui supérieur à la moyenne globale de 0,06 unités. Au cours du 21<sup>e</sup> siècle, le pH diminuerait en Arctique de 0,23 (scénario B1) à 0,45 unités (scénario A2) [43].

L'acidification de l'océan entraînera la remontée de l'horizon de saturation [10]. Pour l'aragonite par exemple, et selon le modèle IPCC IS92a, l'horizon  $\Omega_{\text{arag}} = 1$  atteindra avant 2100 la surface de l'océan austral, où sa profondeur moyenne est aujourd'hui de 730 m. Il s'élèvera de 2 600 à 115 m dans l'Atlantique nord, et de 140 m à la surface dans plusieurs zones du Pacifique situées au

nord du parallèle 50°N : vers la fin du 21<sup>e</sup> siècle (concentration prévue du  $\text{CO}_2$  atmosphérique  $\approx 780$  ppm), l'ensemble de la surface de l'océan austral au sud du parallèle 60°S sera sous-saturée en aragonite ( $\Omega_{\text{arag}} < 1$ ), ainsi qu'une partie du Pacifique nord. En revanche, les eaux superficielles tropicales et subtropicales demeureront sursaturées en aragonite et en calcite, à des degrés moindres cependant dans les zones d'*upwelling*. Globalement, comparées à ce qu'elles sont aujourd'hui, les valeurs moyennes des concentrations  $[\text{CO}_3^{2-}]$  et des degrés de saturation  $\Omega_{\text{arag}}$  et  $\Omega_{\text{calc}}$  des eaux superficielles de l'Océan mondial auront diminué de moitié.

### Quels futurs impacts sur les organismes et les écosystèmes marins ?

L'évolution du degré de saturation en carbonates est un descripteur communément utilisé de l'acidification de l'océan. D'un point de vue physiologique, ces indicateurs sont certes utiles, mais insuffisants à révéler les mécanismes qui, *in fine*, contrôlent la biocalcification.

#### Producteurs primaires phytoplanctoniques

Responsable de la moitié de la production autotrophe<sup>2</sup> de la biosphère, et fournissant 99% de la matière organique utilisée par les réseaux trophiques marins, le phytoplancton mérite une attention particulière. La sensibilité de la photosynthèse au  $\text{CO}_2$  peut être modifiée par la température, l'énergie lumineuse incidente et la disponibilité en nutriments. Par ailleurs, la sensibilité de la photosynthèse dépend en grande partie de la RubisCO, une enzyme<sup>3</sup> peu affine pour le  $\text{CO}_2$ .

Selon les connaissances actuelles, les concentrations en  $\text{CO}_2$  des eaux marines superficielles de la fin de ce siècle ne devraient sensiblement modifier ni la photosynthèse ni la croissance de la majorité des microorganismes. Une grande part des changements sera plutôt déterminée par l'hydrologie (e.g. modification de température, renforcement de la stratification des eaux de surface entraînant une diminution de la disponibilité en nutriments, cf. *infra*).

La prise en compte des principaux facteurs qui gouvernent la production primaire océanique conduit à l'hypothèse d'une baisse de cette production dans les eaux tropicales et intertropicales, d'une augmentation sous les hautes latitudes, et d'un déplacement des grandes provinces biogéographiques vers les pôles. Au plan de la composition des communautés, des expériences de longue durée seront nécessaires pour identifier les organismes pourvus d'un potentiel adaptatif qui leur conférerait un avantage dans un environnement enrichi en  $\text{CO}_2$ .

Le basculement de l'écosystème de haute mer vers un nouvel état doit aussi être envisagé. Il serait déclenché par la réduction du flux des sels nutritifs dans la couche de surface. Dans les régions les plus productives de l'océan, il pourrait s'ensuivre une recomposition de la communauté phytoplanctonique qui aboutirait à une diminution considérable du flux de matière disponible pour les niveaux supérieurs (e.g. poissons prédateurs).

De plus, depuis les microorganismes jusqu'aux poissons, le réchauffement tend à accroître le taux du métabolisme et à favoriser la respiration, processus biologique dont le bilan est

1 Par définition :  $\Omega = [\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]/K_{\text{sp}}$ , où la constante d'équilibre  $K_{\text{sp}}$  est le produit de solubilité. Aujourd'hui, la concentration  $[\text{Ca}^{2+}]$ , essentiellement fonction de la salinité, est sensiblement constante dans l'océan. Les variations de  $\Omega$  expriment principalement celles de  $[\text{CO}_3^{2-}]$ .

2 L'autotrophie désigne la capacité de certains organismes vivants à produire de la matière organique en procédant à la réduction de matière inorganique, par exemple le carbone (le dioxyde de carbone) ou encore l'azote (sous forme de  $\text{NO}_3$  ou de  $\text{N}_2$ ). Cela s'accompagne d'un prélèvement de sels minéraux dans le milieu (ions nitrate, phosphate, ...). Les organismes autotrophes sont donc capables de se développer dans un milieu ne contenant que du carbone minéral, contrairement à un organisme hétérotrophe qui devra se procurer des molécules organiques (idem pour l'azote).

3 La Ribulose-1,5-biphosphate carboxylase/oxygénase (RubisCO) est une enzyme ancienne qui a évolué en conditions de  $p(\text{CO}_2)$  élevée et de faible concentration en oxygène, et dont la constante de demi-saturation, comprise entre 20 et 185  $\mu\text{mol/l}$ , impose des contraintes à l'assimilation du  $\text{CO}_2$  dans les eaux où il est faiblement concentré (5 à 25  $\mu\text{mol/l}$ ).

globalement « symétrique » de celui de la photosynthèse. In fine, dans les eaux superficielles plus chaudes et plus stratifiées de l'océan, des réseaux trophiques de plus faible rendement énergétique pourraient s'installer, entraînant une chute de la production des ressources vivantes (poissons, mollusques) exploitées pour la consommation humaine.

### Invertébrés et poissons marins

À la différence des cellules des organismes marins unicellulaires qui baignent dans l'eau de mer (e.g., les cellules phytoplanctoniques), les cellules des invertébrés et des poissons marins<sup>1</sup> sont au contact d'un liquide corporel extracellulaire (sang, hémolymphe, liquide coelomique) qui assure le transport convectif de diverses substances, dont les gaz dissous ( $O_2$ ,  $CO_2$ ) associés à la respiration. Ces liquides extracellulaires sont les premiers influencés par le changement des propriétés physico-chimiques de l'eau de mer. Étant donné que les performances des fonctions physiologiques dépendent de la régulation de la composition ionique et du pH de ces fluides, le pH extracellulaire ( $pH_e$ ) a été proposé comme « paramètre unificateur » dans l'étude de la réponse fonctionnelle des organismes marins, considérant que la sensibilité aux variations de  $CO_2$  (de long terme et/ou impulsives) est vraisemblablement plus élevée chez ceux dont les capacités de régulation du  $pH_e$  sont les plus faibles [44].

On considère aujourd'hui les poissons, les mollusques céphalopodes et les crabes comme le groupe dont les performances (croissance, reproduction, locomotion) seront les moins altérées<sup>2</sup> par l'excès de  $CO_2$ . En revanche, la sensibilité à l'excès de  $CO_2$  de nombreux organismes calcifiés – tels les mollusques bivalves (e.g. huîtres, moules) ou les échinodermes (e.g. oursins) – pourrait être imputée au fait qu'ils sont sessiles, de faible niveau métabolique, et que le contrôle de leur  $pH_e$  est limité [45].

Progresser dans la prévision des impacts des changements environnementaux sur les organismes marins requiert la prise en compte simultanée des principaux facteurs à l'œuvre dans le monde réel, en particulier l'occurrence conjointe de l'acidification et du réchauffement de l'océan : comprendre la réponse des organismes marins nécessite d'intégrer les effets conjugués de l'accroissement de température, de l'excès de  $CO_2$  et du déficit en oxygène, qui concourent à altérer la capacité à réguler le  $pH_e$ .

Une conséquence vraisemblable de l'acidification des eaux de surface et de la diminution de la concentration en oxygène associées au changement climatique est le « rétrécissement des habitats marins ». Par exemple l'encornet géant du Pacifique oriental (prédateur supérieur pélagique), confronté à la combinaison de l'acidification, de l'augmentation de la température et de la remontée du minimum d'oxygène, serait contraint à sensiblement réduire l'amplitude de ses migrations nyctémérales<sup>3</sup> afin de conserver ses performances fonctionnelles [46].

Il reste à acquérir de nombreuses connaissances, notamment dans la compréhension des effets biologiques et écologiques de l'acidification de l'océan, tant au niveau des individus et des populations qu'au plan des interactions entre espèces, sans omettre les capacités d'acclimatation-adaptation de ces dernières. L'identification des effets synergiques du  $CO_2$ , de la température et de l'oxygène<sup>3</sup> demeure un préalable à la production de scénarios visant à approcher l'impact du changement climatique dans l'océan de demain.

### Rétroactions (feedbacks), phénomènes à seuil et points de basculement (tipping points)

L'augmentation de la concentration du  $CO_2$  atmosphérique et l'acidification de l'océan sont deux phénomènes indissociables, en particulier liées par le fonctionnement des écosystèmes marins. Ces écosystèmes sont complexes, leurs composantes répondant de façon non linéaire à une vaste gamme de stimuli. Leur dynamique obéit à de multiples pressions, mais provoque également des effets retours qui amplifient ou atténuent les impacts, et subit parfois à des phénomènes à seuil qui entraînent un basculement irréversible vers une nouvelle dynamique. De la conjugaison de cet ensemble de phénomènes naît la difficulté d'identification et d'anticipation des changements causés par l'acidification de l'océan, comme l'attestent les quelques exemples qui suivent.

- L'accroissement de la pression partielle du  $CO_2$  atmosphérique entraîne l'augmentation de la température superficielle de l'océan, effet qui rétroagit sur la  $p(CO_2)$  atmosphérique en affaiblissant la pompe de solubilité, affaiblissement de la pompe favorisé aussi par le ralentissement de la cellule méridienne de retournement de l'Atlantique nord. D'ici à la fin du 21<sup>e</sup> siècle, la quantité de carbone piégé par l'océan pourrait ainsi être réduite de plusieurs dizaines de gigatonnes, estimation entachée par les incertitudes afférentes au rôle de puits de carbone de l'océan austral.
- Au surplus, l'augmentation de la  $p(CO_2)$  atmosphérique accroît la concentration en ions bicarbonate  $HCO_3^-$  dans les eaux de surface, d'où une diminution de la concentration en ions carbonate  $CO_3^{2-}$ . L'effet rétroactif est une réduction du « pouvoir tampon » de l'océan vis-à-vis de l'excès de  $CO_2$ . À la fin du 21<sup>e</sup> siècle, la capacité moyenne de l'eau de mer à piéger l'accroissement de  $CO_2$  atmosphérique pourrait être inférieure au tiers de ce qu'était cette capacité en 1750. Corrélativement, les degrés de saturation  $\Omega_{arag}$  et  $\Omega_{calc}$  auront globalement diminué de moitié.
- La pompe biologique subira de nombreuses pressions dont l'effet résultant est aujourd'hui quasi-impossible à inférer. Des températures en moyenne plus élevées – à cause de l'accroissement de la  $p(CO_2)$  atmosphérique – entraîneront des bouleversements des écosystèmes pélagiques. Le phytoplancton sera soumis à des effets antagonistes du réchauffement (une stratification thermique renforcée tend à le confiner dans les eaux superficielles où il bénéficie d'un maximum d'énergie lumineuse, mais elle tend aussi, en diminuant le mélange vertical, à réduire l'apport en nutriments). Selon toute vraisemblance, la variabilité spatio-temporelle de la hiérarchie des facteurs de changement engendrera des effets régionalement contrastés, selon la latitude notamment – sans exclure le risque de basculement vers des réseaux trophiques moins énergétiques, comme mentionné précédemment.
- Un seuil de basculement pourrait aussi être franchi dans les régions océaniques où les eaux superficielles deviendront corrosives pour les carbonates. D'ici deux à trois décennies, l'horizon de saturation pourrait apparaître en surface sous les hautes latitudes (en Arctique et dans l'océan austral, pendant les hivers boréal et austral respectivement), et impacter – entre autres – un mollusque pélagique de petite taille (ptéropode du genre *Limacina*) dont une partie du développement larvaire se déroule en hiver. Les *Limacina*, qui élaborent une coquille carbonatée, forment des concentrations denses d'individus et sont une espèce-clé des réseaux trophiques de l'océan austral.

<sup>1</sup> On ne traite ici ni des mammifères et reptiles marins, ni des oiseaux de mer.

<sup>2</sup> Chez certains poissons, un doublement de la  $p(CO_2)$  de l'eau de mer n'entraîne qu'une augmentation de 10% de la  $p(CO_2)$  du sang.

<sup>3</sup> Les migrations se déroulent durant un jour et une nuit pour correspondre au cycle biologique.

[16]. C'est l'une des raisons qui conduisent à s'intéresser à la viabilité de leurs populations dans des eaux acidifiées, l'autre étant leur contribution (~10 %) au flux de CaCO<sub>3</sub> exporté vers l'océan profond.

- Sous les basses latitudes, il existe un fort risque de changement d'état des écosystèmes coralliens [47], dû aux effets combinés de la diminution du degré de saturation en carbonates dans les eaux superficielles, de l'augmentation de la température, de l'amplification des phénomènes météorologiques extrêmes, de l'élévation du niveau de la mer, et de l'anthropisation des zones côtières en milieu tropical. Compte tenu de la grande variété des services écosystémiques (*sensu* Millenium Ecosystem Assessment, 2005) rendus par les écosystèmes coralliens, leur « collapsus fonctionnel » engendrerait des pertes dont l'ampleur reste difficile à évaluer aujourd'hui.

**En conclusion**, l'acidification de l'océan, couplée à d'autres moteurs de changement, entraînera de profondes perturbations, - des processus physico-chimiques (pompe de solubilité) et biogéochimiques (pompe biologique), - des réseaux trophiques marins (aux plans de la structure, des interactions entre espèces, et de la productivité), - et plus généralement du fonctionnement des écosystèmes (par exemple, les récifs coralliens).

Les écosystèmes d'un « océan acidifié » -et réchauffé- ne seront pas identiques à ceux d'aujourd'hui. Les changements sont quasi-impossibles à prévoir, compte tenu de l'état fragmentaire des connaissances afférentes à la dynamique de la biodiversité. La mosaïque des états futurs dépendra des différences de capacité d'adaptation des espèces aux modifications de leurs interactions biologiques d'une part (prédation, symbiose, parasitisme, etc.), à celles des propriétés physico-chimiques de leurs habitats d'autre part.

### Les effets possibles sur les milieux, les territoires littoraux et les activités humaines

Hormis dans le cas des territoires côtiers dont l'économie générale dépend des nombreuses macro fonctionnalités des récifs coralliens, l'impact spécifique de l'acidification sur la recomposition des communautés animales et végétales marines « locales » sera difficilement dissociable des effets d'autres facteurs (température, influences des bassins versants, etc.). L'acidification, si elle entraînait des bouleversements des réseaux trophiques marins, pourrait cependant contribuer significativement à un impact sur les activités de pêche et d'aquaculture.

#### Impacts possibles sur les milieux et les territoires

<i>Types de territoires et milieux exposés</i>	<i>Nature des impacts</i>
Océan global	Diminution possible de la productivité de l'océan sous les basses latitudes, vs. accroissement sous les hautes latitudes.  Risque de changement d'état des écosystèmes pélagiques, et diminution globale de la disponibilité en ressources alimentaires marines traditionnelles.
Territoires côtiers et insulaires de la ceinture tropicale	Altération des services d'origine écosystémique spécifiques des écosystèmes coralliens tropicaux.

#### Impacts possibles sur les activités humaines

<i>Type d'activité</i>	<i>Impacts</i>
Pêche	Disponibilité en ressources alimentaires marines.

# Accentuation de la salinisation des eaux souterraines littorales

## Ce que l'on constate actuellement

Les aquifères côtiers sont plus ou moins sensibles aux intrusions salines en conditions naturelles et sous influence anthropique en fonction de leur structure, leur géométrie et de l'hétérogénéité du milieu. La zone littorale est le point de rencontre entre deux types d'eau souterraine : (i) l'eau douce des nappes du continent et (ii) l'eau salée qui imprègne les terrains au voisinage des côtes ou qui pénètre les cours d'eau au niveau des estuaires et peut ainsi donner lieu à des salinisations des eaux souterraines en relation hydraulique avec les eaux de surface.

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

région. La position de l'interface eau salée/eau douce est de manière générale fonction du rapport de densité de l'eau douce et de l'eau salée, telle que définie par Ghyben Herzberg (Figure 18).

L'exploitation des aquifères littoraux influence considérablement la position et la forme de la zone de contact que constitue l'interface eau douce/eau salée. Réciproquement l'évolution de cette interface peut nuire à l'exploitation des eaux souterraines côtières, du fait de la dégradation possible (augmentation de la salinité) de la qualité de l'eau prélevée (Figure 19).

En contexte insulaire, la nappe d'eau douce se trouve sous forme de lentille d'eau douce, telle que décrite par la figure 20 selon l'approximation de Ghyben Herzberg.

Pour les aquifères multicouches côtiers, l'hétérogénéité des formations ainsi que les relations hydrauliques entre les différentes formations aquifères conditionnent la position des biseaux salés qui peuvent être multiples. Les formations aquifères en contact avec la mer peuvent être très distantes de la côte (vers le large), et lenticulaires au sein d'une masse sédimentaire de faible perméabilité où les processus de diffusion vont être prédominants. Il n'y a pas de contact hydraulique direct de type « sortie d'eau douce » au niveau de la mer, ni de biseau salé en dehors des formations du lido [49].

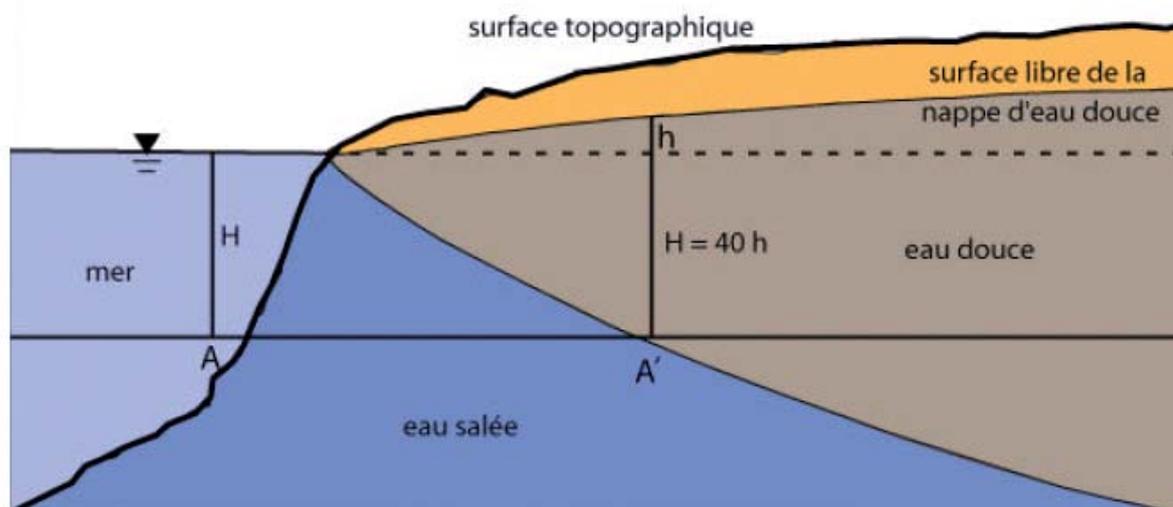


Figure 17 : Position de l'interface selon Ghyben Herzberg [48].

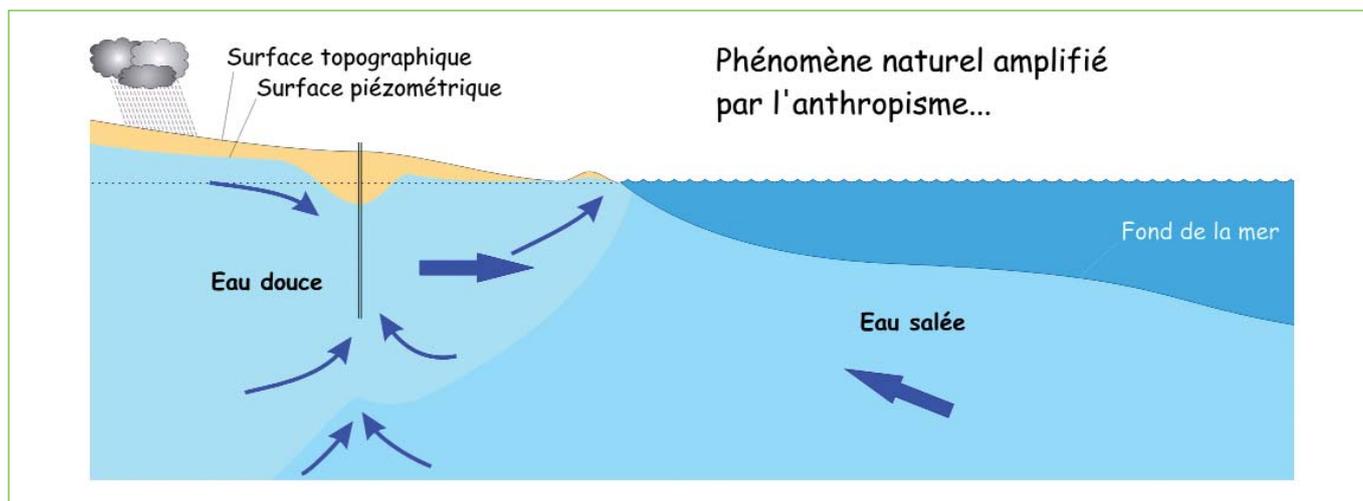


Figure 18 : Amplification de l'intrusion saline des aquifères côtiers par influence anthropique [48].

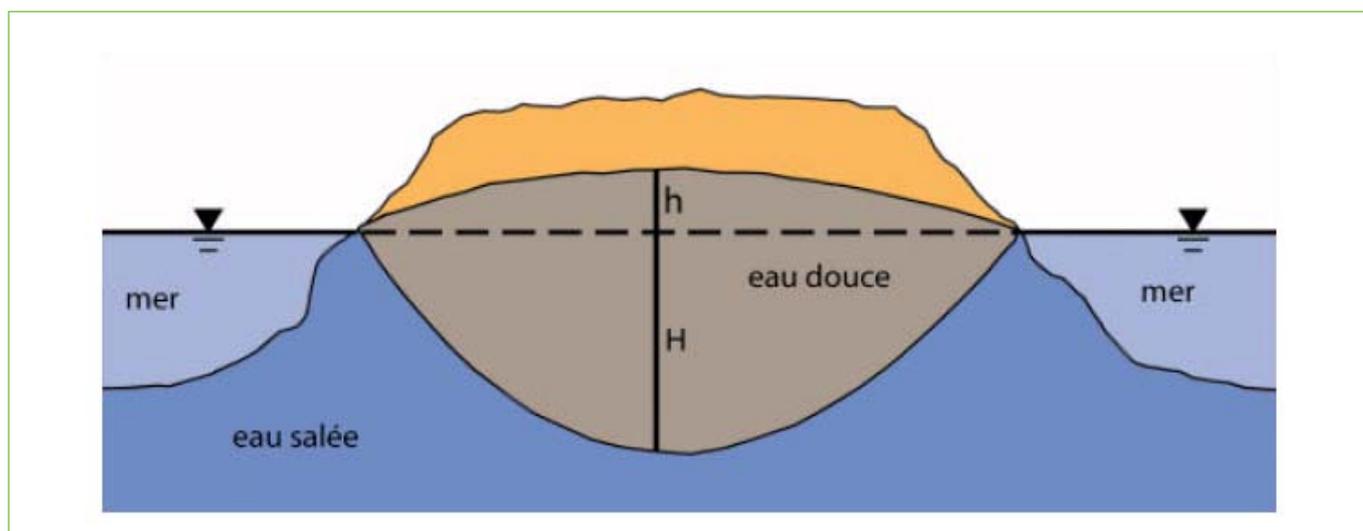


Figure 19 : Coupe perpendiculaire dans un aquifère insulaire [48].

Sur les 5 500 km de côte, on dénombre à l'échelle de la France métropolitaine, 95 aquifères superficiels et 17 aquifères profonds côtiers [50].

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

- (i) des aquifères superficielles sédimentaires particulièrement vulnérables vis-à-vis d'une salinisation en cas de surexploitation,
- (ii) des aquifères profonds où la salinisation peut provenir de la drainance des aquifères supérieurs ou par des forages mal conçus ou en mauvais état mettant en communication plusieurs aquifères,

(iii) les aquifères karstiques des formations carbonatés avec des exutoires en mer ou en zones lagunaires avec des intrusions salines complexes variables dans le temps et l'espace et

(iv) finalement des aquifères de milieu fissuré avec des intrusions localisées du fait du compartimentage possible du milieu aquifère.

Un état des lieux a été dressé en 1996 à l'échelle de la France métropolitaine [50] ; il est nécessaire de procéder à une mise à jour de ce dernier.

La salinité des aquifères côtiers peut être naturelle comme c'est le cas dans le Nord Pas de Calais et en Picardie dans des zones de très faible altitude, en Bretagne sur l'île de Noirmoutier, en Languedoc Roussillon dans les aquifères superficiels, dans les sources karstiques (ex. Port Miou (13), Fontestramar (66), La Vise (34) et en Camargue.

Les conditions de prélèvement influencent la position de l'interface eau douce/eau salée à l'aplomb des forages en exploitation.

Lorsque la salinisation est d'origine anthropique, la surexploitation des aquifères est la principale raison de la salinité. Certains secteurs à l'échelle de la France métropolitaine ont été recensés ou identifiés comme comportant un risque :

- (i) zones d'estuaires avec une extension généralisées des venues d'eau salée (ex. zones d'estuaire en Haute Normandie, zone d'estuaire de la Gironde – région de Soulac et de Rochefort),
- (ii) les plaines alluviales du littoral méditerranéen avec des invasions d'eau salée localisée (ex. nappe de la vallée de l'Hérault dans la région d'Agde, nappe de Maugio Lunel en bordure de l'étang de l'Or, nappe de la Crau région d'Arles, nappe de Gapeau (région d'Hyères), nappe de Giscle et Mole (région de Grimaud), nappe d'Argnes (région de Saint Raphaël),
- (iii) nappe côtière de Corse (région de Filitosa) (SDAGE RM&C, 2000),
- (iv) les invasions d'eau salée saisonnières dans les départements du Calvados, de la Manche et aussi dans la nappe du Lias et du Dogger à proximité du Marais Poitevin (Petit, 1996), nappe du Lamentin en Martinique (zones alluviales) [51]. La Grande Terre (Martinique) est un complexe aquifère vulnérable aux intrusions salines, mais pour lequel la position de l'interface eau douce/eau salée n'est pas connue avec exactitude [52].

À Marie Galante, l'aquifère carbonaté reposant sur un substratum volcanique est en équilibre fragile entre l'eau douce et l'eau salée sur le pourtour de l'île [53]. Les aquifères littoraux de la Réunion sont concernés également par des intrusions salines, notamment en particulier sur la partie occidentale de l'île ; les conditions d'exploitation influencent ce processus, particulièrement dans les zones où la pluviométrie est inférieure à 1 m [48].

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

## Ce qui pourrait se passer

Considérant les différents scénarii de changements climatiques ayant pour conséquence des modifications du niveau marin, des précipitations, de la température et donc de la recharge et des

débites des cours d'eau côtiers, les conditions aux limites des aquifères côtiers vont être modifiées.

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

Les impacts concerneront d'une part les marais salés et d'autre part les aquifères côtiers.

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

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

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

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

## Les effets possibles sur les milieux, les territoires littoraux et les activités humaines

### Impacts possibles sur les milieux et les territoires

<i>Types de territoires et milieux exposés</i>	<i>Nature des impacts</i>
Zones littorales	Augmentation des intrusions salines des aquifères côtiers Nouvelles lagunes et réduction de la superficie des terres Appauvrissement des sols dû à la salinisation.

### Impacts possibles sur les activités humaines

<i>Type d'activité</i>	<i>Impacts</i>
Usages de l'eau	Diminution des eaux douces souterraines pour les différents usages, nécessitant de disposer d'outil de gestion de la ressource intégrant les différents acteurs, localement, en ayant recours soit à des techniques de stockage temporaire de l'eau en aquifère, de recharge artificielle, de réutilisation d'eaux usées traitées, voir le cas échéant d'implanter des usines de dessalement pour les périodes estivales.
Marais salins	Modification des marais salins avec conséquence sur les activités humaines, notamment pour les professionnels exploitant les ressources halieutiques, agricoles, etc. de ces environnements.
Perte de terres	Réduction des terres par submersion temporaire ou permanente.

# Modification de la composition des communautés biotiques

## Ce que l'on constate actuellement

On considère, avec un degré de confiance élevé fondé sur de nouvelles preuves substantielles, que les changements observés dans les systèmes biologiques marins et d'eau douce sont associés au réchauffement des eaux, ainsi qu'aux changements associés à la couverture de glace, la salinité, les taux d'oxygène et la circulation [28].

Ceux-ci comprennent :

- des variations dans les aires de distributions ainsi que des changements dans l'abondance d'algues, de plancton et de poissons dans les océans des hautes latitudes ;
- des augmentations d'abondance d'algues et de zooplancton dans les hautes latitudes ainsi que dans les lacs de haute altitude ;
- des migrations précoces de poissons et des changements de leur aire de répartition dans les rivières.

Le climat et la pêche sont des facteurs qui présentent des synergies en termes de modification des réactions des stocks halieutiques aux perturbations. En influant sur les caractéristiques

biologiques et la structure démographique des populations de poissons, la pêche modifie indirectement les capacités de réponse de ces espèces aux variations climatiques. En conséquence, les méthodes d'expertise et de gestion doivent être adaptées à ce nouveau contexte [27].

## Ce qui pourrait se passer

Si le réchauffement moyen mondial dépasse 1,5 à 2,5°C (par rapport à 1980-1999), on estime que près de 20 à 30 % des espèces seront probablement soumises à un risque accru d'extinction (confiance moyenne). Si l'accroissement de la température moyenne mondiale dépasse 3,5°C, les modélisations suggèrent des extinctions plus significatives encore (de 40 à 70 % des espèces évaluées) sur l'ensemble du globe [2].

En matière d'aquaculture, les changements climatiques peuvent constituer un point de rupture influant sur les filières de production aquacole [28].

## Les effets possibles sur les milieux, les territoires littoraux et les activités humaines

### Impacts possibles sur les milieux et les territoires

*Types de territoires et milieux exposés*

*Nature des impacts*

Extinction / Prolifération de certaines espèces.

### Impacts possibles sur les activités humaines

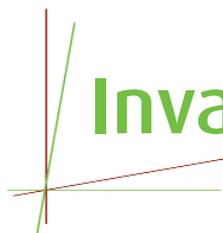
*Type d'activité*

*Impacts*

Pêche-ostréiculture-aquaculture

Modifications de l'abondance et de la nature des stocks halieutiques.





# Invasions biologiques

## Ce que l'on constate actuellement

La Convention Diversité Biologique (CBD) [54] considère les « espèces invasives<sup>1</sup> » comme un des quatre principaux vecteurs d'altérations de la biodiversité à l'échelle mondiale ce qui en fait une des top priorités (Décision VI/23). En Europe, on enregistre une prise de conscience récente de ce risque avec la mise en place notamment du règlement visant à prévenir l'introduction d'espèces invasives associées à l'aquaculture et à évaluer l'importance du phénomène et ses conséquences sur les écosystèmes.

Bien que la directive cadre sur la stratégie en milieu marin aborde ce point, la législation européenne reste éclatée dans ce domaine, ce qui conduit la Commission à l'élaboration d'une stratégie communautaire pour 2010. Malgré plusieurs guides et recommandations (FAO, CBD, CIEM), la réponse en terme de réglementation et de gestion à l'échelle nationale comme européenne n'est donc pas encore opérationnelle et il n'existe pas de stratégie commune à ce jour pour limiter les effets indésirables des espèces invasives.

Dans des environnements sensibles, les conséquences possibles des invasions biologiques peuvent être très significatives d'un point de vue écologique, économique et social. Le cas des eaux et sédiments de ballasts déversés par le transport maritime dans les ports de commerce est à ce titre exemplaire. Ainsi, les espèces phytoplanctoniques toxiques pour la santé humaine introduites au niveau des étangs du Sud de la France impactent fortement les économies locales. Cette question est encore plus critique dans certains territoires en outre mer.

Alors qu'une première convention internationale, signée au niveau de l'organisation maritime internationale (OMI) en 2004, reste encore préliminaire et à ce jour non appliquée (signée par l'État français), les prises de décisions nationales apparaissent comme extrêmement hétérogènes et ne permettent pas d'aboutir à une efficacité réelle des dispositifs au niveau mondial et les actions de prévention indispensables restent limitées.

Les moyens de lutte contre les espèces invasives en milieu marin sont très largement inefficaces (*i.e.*, seuls 3 à 4 succès d'éradication sont notables à l'échelle mondiale) comme les dispositifs d'observation et de prévention actuellement très insuffisants. En parallèle, les évaluations économiques directes et indirectes (*e.g.* pertes de biodiversité) ne sont pas encore assez développées bien que le projet européen DAISIE ait déjà effectué une première estimation à l'échelle européenne.

Les modifications environnementales en cours comme les changements globaux interagissent directement avec la question « espèces invasives », nécessitant l'élaboration de nouvelles

approches et de modalités de gestion-gouvernance de l'échelle mondiale à nationale.

Le premier inventaire des espèces exotiques, réalisé en 2002 pour la façade atlantique, identifie 104 espèces exotiques. Depuis, environ 4-5 espèces exotiques nouvelles sont décrites annuellement (160 sp en 2006) démontrant ainsi que le rythme d'introductions reste significatif. Parmi ces espèces, environ 10 % posent de réelles difficultés liées à leur caractère invasif.

Les invasions les plus significatives sont corrélées aux modifications thermiques qui ont eu lieu à la fin des années 90s et qui semblent avoir permis le dépassement de seuils critiques : l'huître japonaise du Pacifique *Crassostrea gigas* introduite dans les années 1970 se reproduisait uniquement en sud Loire jusqu'aux années 1990. Depuis, des colonisations massives se déroulent le long des côtes jusqu'en Normandie, interagissant avec la biodiversité locale et les usages littoraux (*e.g.* pêche récréative, usage récréatif de la bande littorale), mais aussi à l'origine de nouvelles activités économiques (*e.g.* captage d'huître professionnel en rade de Brest). Cette espèce se retrouve de nos jours jusqu'en Norvège.

Des espèces exotiques ont proliféré de façon concomitante, leur expansion étant facilitée par des pratiques professionnelles de transferts de cheptels : le gastéropode prédateur de l'huître *Ocenebrellus inornatus*, introduit très probablement avec les stocks d'huîtres dans les années 1970, n'a été détecté que dans les années 1990, voyant sa prolifération impacter les élevages professionnels.

Des espèces subtropicales phytoplanctoniques sont découvertes maintenant régulièrement, y compris certaines pouvant poser des problèmes de santé publique.

Les changements d'aires de répartition dus aux changements globaux dont climatique sont très significatifs (remontée de 10°Nord pour certaines) modifiant ainsi le fonctionnement des écosystèmes, les chaînes trophiques et les services écosystémiques rendus (*e.g.* pêcheries). Les écosystèmes méditerranéens sont de bons exemples des conséquences conjointes de l'introduction d'espèces invasives (*via* le Canal de Suez) et de l'impact du changement climatique. En effet, ces espèces ont lentement migré vers le nord puis vers l'est. Certaines d'entre elles ont remplacé les espèces autochtones. L'introduction de *Caulerpa taxifolia*, à partir des rejets d'un aquarium est un autre exemple significatif. Sa prolifération en Méditerranée occidentale a profondément affecté la survie et le développement de la Posidonie et de l'écosystème qu'elle hébergeait. Le même phénomène est observé avec *Taxifolia racemosa* originaire d'Australie occidentale. Or le taux de croissance de ces espèces est directement corrélé à la température de l'océan.

<sup>1</sup> Les espèces invasives sont des espèces exotiques et envahissantes. Les espèces envahissantes sont les espèces endémiques proliférantes.

## Ce qui pourrait se passer

Le changement climatique devrait faciliter les changements d'aires de répartition des espèces de façon beaucoup plus significatives que sur le milieu terrestre, et engendrer des modifications sur le fonctionnement des écosystèmes, les chaînes trophiques et les services écosystémiques rendus.

L'extension de proliférations comme la crépidule (*C. fornicata*) impactant la biodiversité peut s'avérer lourde de conséquence. L'apparition de nouvelles espèces phytoplanctoniques subtropicales pouvant poser des problèmes de santé publique est probable et les conditions environnementales devenir plus favorables à des espèces – exotiques et/ou endémiques – à fort potentiel d'expansion.

Le rythme d'introduction d'espèces exotiques et leur survie devraient croître si aucune mesure de prévention n'est rapidement mis en place (e.g., traitement des eaux de ballast, précautions lors des transferts d'espèces aquacoles).

Les modifications environnementales indirectes comme la réduction des débits des fleuves et des étiages plus marqués devraient accroître les probabilités de survie d'espèces marines exotiques au niveau de ports situés en zone de transition du fait de la marinsation des estuaires. Certaines espèces exotiques, actuellement non invasives, pourraient le devenir par le

dépassement de seuils physiologiques thermiques (e.g. *O. inornatus*) et plusieurs espèces endémiques pourraient présenter un caractère invasif à l'avenir.

Les impacts environnementaux pourraient porter sur des modifications locales de biodiversité, des changements d'habitat (e.g. espèce ingénier créatrice d'habitat comme l'huître creuse construisant des récifs), avec des effets induits comme la modification de la courantologie, de la sédimentation, des perturbations et modifications au niveau de la chaîne alimentaire (e.g. prolifération de filtreurs, émergence de proies pour l'avifaune).

Les activités économiques (e.g. pêche à pied, aquaculture, tourisme) pourraient évoluer en parallèle et de nouvelles activités apparaître (exploitation de nouvelles espèces et/ou valeur ajoutée sur exploitation).

L'émergence de nouveaux parasites pathogènes opportunistes n'est pas exclue, impactant la biodiversité et les ressources exploitées.

De plus, les stratégies développées en matière de protection et conservation de la biodiversité marine à valeur patrimoniale seront probablement altérées et nécessiteront une stratégie d'adaptation (e.g. réseau d'aires marines protégées, Natura 2000 mer, Parcs marins).

### Impacts possibles sur les milieux, les territoires littoraux et les activités humaines

#### Impacts possibles sur les milieux et les territoires

<i>Types de territoires et milieux exposés</i>	<i>Nature des impacts</i>
Littoral – estuaires – intertidal & subtidal	Altération des habitats et de la biodiversité
Niches écologiques (e.g. estuaires)	Perte de biodiversité spécifique (y compris à valeur patrimoniale) Isolement spécifique
Colonne d'eau – interface eau - sédiment	Modifications des chaînes trophiques
Tout environnement	Modifications physico-chimiques - morpho sédimentaires (courantologie, sédimentation) – anoxies... Modifications des relations proie-prédateur Changements d'aires de répartition Émergences de parasites/pathogènes.

#### Impacts possibles sur les activités humaines

<i>Type d'activité</i>	<i>Impacts</i>
Tourisme, activités récréatives (pêche de loisir, navigation de plaisance)	réduction de l'accès au littoral liée à l'émergence d'espèces invasives
Pêche, aquaculture	Les changements d'aires de répartition peuvent impacter la disponibilité des ressources exploitées de façon directe (e.g. migration de l'espèce), ou indirecte (e.g. diminution de l'espèce proie – modification des relations proie-prédateur, émergence de parasites), et de fait les rendements économiques de ces services. e.g. cas de la pêcherie de palourde japonaise
Santé publique	L'apparition d'espèces invasives et/ou envahissantes peut induire des coûts de santé publique et de surveillance préventive (e.g., espèces à phycotoxines – <i>Ostreopsis</i> sp.)
Gestion et d'entretien de l'espace littoral pour limiter les proliférations	les coûts induits de gestion et d'entretien de l'espace littoral pour limiter les proliférations – essais d'éradications – et de maintenance des fonctionnalités des espaces peuvent devenir très significatifs pour la communauté que cela soit en lien direct avec le changement climatique (e.g. huîtres creuses), ou indirectement par des effets d'origine anthropique (e.g. algues vertes).

# Nouvelles toxicités pour l'homme

## Ce que l'on constate actuellement

Les nouvelles toxicités pour l'homme considérées dans ce document sont des toxicités microbiologiques d'origine marine, susceptibles d'advenir en métropole. Ne sont pas traitées ici les toxicités dues aux médicaments ou aux nanotechnologies.

Les agents pathogènes principaux sont strictement marins comme les vibrions qui sont des bactéries d'eaux marines et saumâtres et certaines espèces de phytoplancton qui produisent des toxines affectant la faune et la flore marine ou des toxines nuisibles à la santé des consommateurs de coquillages.

Les *Vibrio parahaemolyticus* et *Vibrio vulnificus* sont à surveiller plus particulièrement en périodes de températures élevées et dans les masses d'eaux réchauffées (comme dans les panaches de centrales électriques).

Le risque cholérique est émergent en Méditerranée.

De nombreuses toxines phytoplanctoniques impactent régulièrement les côtes françaises et européennes

Elles sont surveillées régulièrement selon des procédures harmonisées à l'échelon européen. Les espèces responsables sont clairement identifiées et toute nouvelle espèce suspecte est rapportée. Depuis trois ans, une nouvelle espèce benthique *Ostreopsis* sp. est étroitement surveillée en Méditerranée. Cette espèce n'est pas, à proprement parler, une espèce importée mais elle présente un préférendum pour les températures élevées. Dans l'étang de Thau, les étés caniculaires pendant lesquels les températures de l'eau dépassent 26°C, favorisent la dominance de cyanobactéries [55]. À l'heure actuelle, aucune toxicité n'a été rapportée.

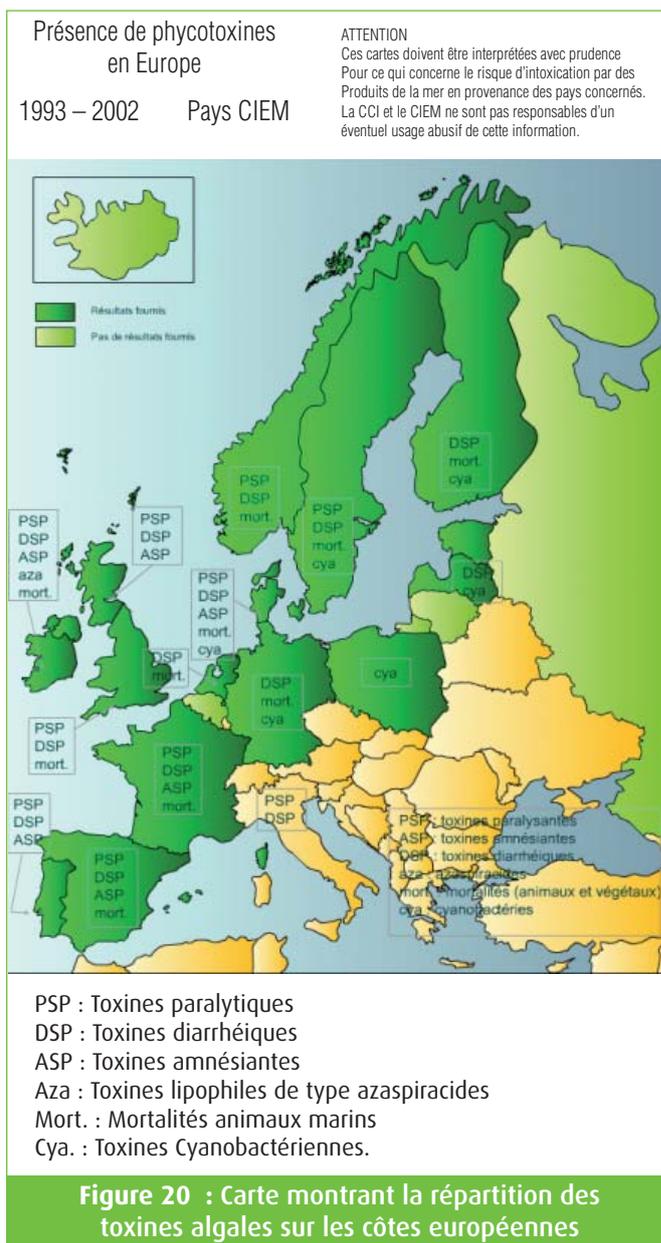
## Ce qui pourrait se passer

### Élévation du niveau de la mer

L'élévation du niveau des mers entrainera des modifications locales profondes de la circulation côtière avec disparition de certaines lagunes (ex : Étang de Thau) et l'apparition de nouvelles zones de rétention hydrodynamiques favorisant le développement d'espèces pathogènes quelles soient de type vibron ou phytoplancton.

### Élévation de la température de surface

Les températures plus élevées peuvent faciliter l'introduction ou l'expansion géographique d'espèces toxiques présentes dans les zones équatoriales et tropicales. Ainsi, des espèces de flagellés tropicaux produisant des toxines à l'origine des syndromes du type ciguatérique, syndrome restreint pour l'instant à la ceinture tropicale, ont été observés en Méditerranée et aux Canaries. Un



dinoflagellé très virulent en termes de toxicité paralytique (*Pyrodinium bahamense*) a été observé en Ria de Vigo (Espagne). Jusqu'à présent, cette espèce était confinée à la ceinture tropicale.

La plupart des espèces phytoplanctoniques toxiques sont des flagellés qui sont en général favorisés par des températures accrues. De nombreuses espèces présentent une phase de dormance ou enkystée et une phase de croissance active ou végétative. La transition entre les deux phases est largement dépendante de la température : la durée annuelle de la période de

croissance, et donc la phase toxique active risque donc de s'allonger.

L'élévation des températures peut favoriser l'émergence de cyanobactéries marines avec les risques toxiques associés (PSP, BMAA).

Les vibrions pathogènes (*V. parahaemolyticus*, *vulnificus* et *cholerae*) sont d'autant plus abondants que la température est élevée. Des études dans les panaches de centrales nucléaires l'ont montré pour *V. parahaemolyticus* et le risque cholérique peut émerger en Méditerranée.

### Stratification et stabilité des masses d'eaux fluviales

Le changement prévisible du régime des fleuves conduira à des modifications importantes de l'extension des panaches. Ces panaches stabilisent les masses d'eaux, ce qui favorise la croissance de nombreux flagellés potentiellement toxiques [56]. C'est le cas en zone Atlantique d'une espèce comme *Karenia mikimotoi*, toxique pour la faune et la flore marines. Cette espèce a un impact fort sur le recrutement d'espèces de poissons et coquillages. D'autres espèces comme *Dinophysis*, responsable des intoxications diarrhéiques bénéficient aussi de la stabilité des masses d'eaux. L'extension de la période stratifiée et donc de la saison des efflorescences du printemps à l'automne peut avoir un impact important sur l'aquaculture et les pêcheries, cet impact se traduisant par des mortalités d'adultes et des défauts de recrutement ainsi que des problèmes de commercialisation.

### Évolution des premiers maillons de la chaîne alimentaire

Outre la modification des communautés planctoniques dont l'évolution reste difficile à documenter, la simple évolution de la production primaire peut occasionner des changements importants des zones à risque. *Vibrio cholera*, (ainsi que vraisemblablement

d'autres vibrions) utilise le zooplancton comme hôte-réservoir de niches dans lesquelles il peut maintenir ses propriétés pathogènes même après un très long séjour dans l'environnement. Des bouffées de production planctoniques sont associées à des épidémies de choléra. Les phénomènes globaux climatiques (tel el Niño) peuvent initier des épidémies à des endroits très distants.

### L'acidification des océans

L'évaluation des conséquences de ce processus sur les communautés planctoniques est loin d'être achevée. Des concentrations accrues en CO<sub>2</sub> influenceront directement les maillons les plus sensibles de la chaîne alimentaire avec des conséquences en cascade qui sont difficiles à évaluer. Les groupes présentant une faible affinité pour le CO<sub>2</sub> seront favorisés par un accroissement du CO<sub>2</sub>.

### L'impact du changement global sur la toxicité algale

Les paramètres environnementaux comme la température, le pH, les apports en éléments nutritifs, la turbulence à petite échelle influencent non seulement la croissance des algues toxiques mais aussi leur toxicité. Cependant, en l'état des connaissances, il est difficile d'établir des extrapolations du fait de la diversité des espèces de phytoplancton toxique.

### L'effet de la perte de biodiversité sur l'émergence de risques [57], [58]

Un lien étroit entre la perte de biodiversité et l'accroissement des risques sanitaires est fortement documenté par des équipes de l'Environmental Protection Agency (USA). Il pourrait être utile de vérifier le rôle que pourrait jouer le milieu marin dans cette « transition épidémiologique ».

## Impacts possibles sur les milieux, les territoires littoraux et les activités humaines

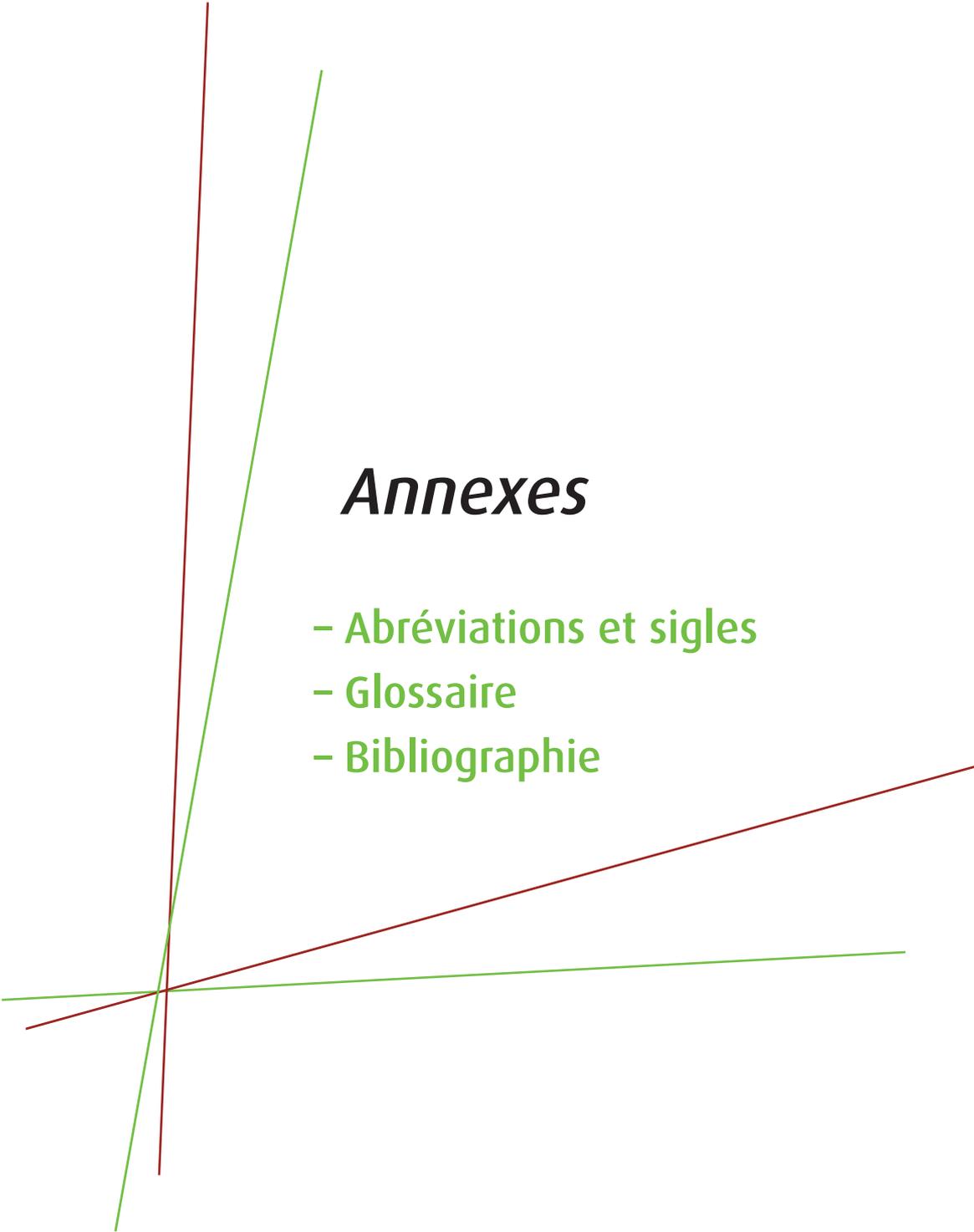
Les aléas climatiques (crues majeures, tempêtes) dont beaucoup d'études s'accordent à dire qu'ils seront plus fréquents et extrêmes auront des effets notables sur les risques biologiques toxiques. L'effet de ces aléas sur les populations toxiques concernées étant très hautement non linéaire [4], il faudrait pouvoir tester des scénarios statistiques type d'évolution du climat qui font défaut actuellement.

### Impacts possibles sur les milieux et les territoires

Types de territoires et milieux exposés	Nature des impacts
Écosystèmes marins (espèces cultivées – huîtres & nurseries de poissons)	Impact sur la chaîne alimentaire (algues ichtyotoxiques).

### Impacts possibles sur les activités humaines

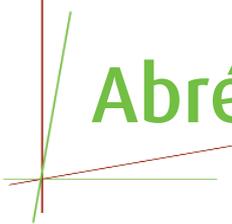
Type d'activité	Impacts
conchyliculture	Les risques sanitaires ont un impact primordial sur les activités humaines en milieu littoral. Ces activités comme la conchyliculture ont un effet structurant du paysage et leur disparition éventuelle pour des raisons sanitaires pourrait avoir un effet majeur sur les milieux littoraux (envasement ou érosion accélérée ; eutrophisation accrue et hypoxies associées) avec pour conséquences des modifications profondes de l'économie locale.



# *Annexes*

- Abréviations et sigles
- Glossaire
- Bibliographie

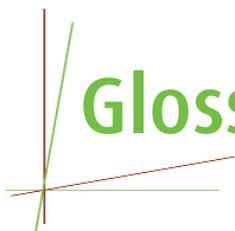




# Abréviations et sigles

AEE (EEA en anglais)	Agence européenne de l'environnement	COI	Commission océanographique internationale
Acacia	Projet européen sur les impacts du changement climatique	CSTB	Centre scientifique et technique du bâtiment
Acmad	African center of meteorological applications for development	CdP (CoP, en anglais)	Conférence des Parties de la CCNUCC
Ademe	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie	CoP, cf. CdP	
ADF	Association des départements de France	CRPM	Conférence des régions périphériques maritimes
AFFSA	Agence française de sécurité sanitaire des aliments	DATAR	Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale
AFFSSAPS	Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé	DEFRA	Department for environment, food and rural affairs (Royaume-Uni)
AFSSE	Agence française de sécurité sanitaire environnementale	DPPR	Direction de la prévention de la pollution et des risques du MEDD
AMF	Association des maires de France	EEA cf. AEE	
Aosis	Association of small island states	FNE	France nature environnement
ARF	Association des régions de France	GCOS (SMOC en français)	Global climate observing system
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières	GICC	Gestion et impacts du changement climatique (programme de recherche du MEDD)
CCNUCC (UNFCCC, en anglais)	Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques	GIEC (IPCC, en anglais)	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
CCR	Caisse centrale de réassurance	GMES	Global monitoring for environment and security
CCR (JRC, en anglais)	Centre commun de recherches de la Commission européenne	IDDRI	Institut du développement durable et des relations internationales
Cemagref	Centre d'étude du machinisme agricole, du génie rural et des eaux et forêts	Ifen	Institut français de l'environnement
Cesbio	Centre d'études spatiales de la biosphère	IFN	Inventaire forestier national
CIADT	Commission interministérielle de l'aménagement du territoire	Ifremer	Institut français de recherche et d'exploitation de la mer
Cirad	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement	IFRTIP	Institut français pour la recherche et la technologie polaire
CLIVAR	Programme de l'OMM. sur la variabilité du climat	IGBP (PIGB, en français)	International geosphere biosphere programme
CNA	Conseil national de l'air	IMFREX	Impacts des changements anthropiques sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent, de température et de précipitations (projet du GICC)
Cnes	Centre national d'études spatiales	Ined	Institut national d'études démographiques
CNRM	Centre national d'études et de recherches météorologiques		
CNRS	Centre national de la recherche scientifique		

Inra	Institut national de recherches agronomiques		Recherche
Inserm	Institut national de la santé et de la recherche médicale	PIGB (IGBP, en anglais)	Programme international géosphère biosphère
Insu	Institut national des sciences de l'univers du CNRS	PIK	Potsdam Institut für Klimafolgen-Forschung
IOC (COI, en français)	International Oceanographic Commission	PNEDC	Programme national d'étude de la dynamique du climat
IPCC, cf. GIEC		Pnud développement	Programme des Nations unies pour le
IGBP, cf. PIGB		Pnue	Programme des Nations unies pour l'environnement
IPSL	Institut Pierre-Simon-Laplace	PPR	Plan de prévention des risques
IRD	Institut de recherches sur le développement	Renecofor	Réseau d'observation des principales essences d'arbres en métropole
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire	RIVM	Rijksinstituut voor volksgezondheit en milieu (Pays-Bas)
JRC (CCR, en français)	Joint research center, centre de recherche commun de la Commission européenne	SBI	Subsidiary body for implementation de la CCNUCC
LPO	Ligue de protection des oiseaux	SBSTA	Subsidiary body for scientific and technological advice de la CCNUCC
MATE	Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement (devenu MEDD en 2002)	SDPRM	Sous-direction de la prévention des risques majeurs de la DPPR
MEDD	Ministère de l'Écologie et du Développement durable (antérieurement MATE)	SMOC (GCOS, en anglais)	Système mondial d'observation du climat
MISILL	Ministère de l'Intérieur, de la Sécurité intérieure et des Libertés locales	SPM	Summary for policymakers (employé à propos des résumés des rapports du Giec)
MNHN	Muséum national d'histoire naturelle	SRP	Service de la recherche et de la prospective du MEDD
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques	UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
OMI	Organisation maritime internationale	UKCIP	UK climate impacts programme
OMM (WMO, en anglais)	Organisation météorologique mondiale	UKMO	United Kingdom Meteorological Office
ONG	Organisation non gouvernementale	UNFCCC cf. CCNUCC	
OOE	Observatoire opérationnel de l'environnement du MEDD	WMO (OMM, en français)	World meteorological organization
ORE	Observatoire de recherche sur l'environnement du ministère de la	WWF	World Wild Fund (Fonds mondial pour la nature)



# Glossaire

## A

**Accrétion** • Processus d'agglomération d'éléments matériels quelconques

**Aquifère** • Couche de roche perméable contenant de l'eau. Un aquifère libre est réalimenté directement par les précipitations locales, les rivières et les lacs; la vitesse de réalimentation est influencée par la perméabilité des roches et sols supérieurs. Un aquifère non libre est caractérisé par une couche supérieure imperméable et, dans ce cas, les précipitations locales sont sans effet sur l'aquifère.

**Autotrophe** • L'autotrophie désigne la capacité de certains organismes vivants à produire de la matière organique en procédant à la réduction de matière inorganique, par exemple le carbone (le dioxyde de carbone) ou encore l'azote (sous forme de NO<sub>3</sub> ou de N<sub>2</sub>). Cela s'accompagne d'un prélèvement de sels minéraux dans le milieu (ions nitrate, phosphate, ...). Les organismes autotrophes sont donc capables de se développer dans un milieu ne contenant que du carbone minéral, contrairement à un organisme hétérotrophe qui devra se procurer des molécules organiques (idem pour l'azote).

## C

**Circulation générale** • Mouvements à grande échelle de l'atmosphère et des océans à la suite du réchauffement différentiel sur une terre en rotation, visant à restaurer l'équilibre énergétique du système par le transfert thermique et l'effet de mouvement.

**Circulation thermohaline** • Circulation à grande échelle régie par la densité dans les océans causée par des différences de température et de salinité. Dans l'Atlantique Nord, les eaux de surface chaudes circulent vers le nord et les eaux profondes froides circulent vers le sud, ce qui produit un transfert thermique net vers les pôles. Les eaux de surface descendent dans les profondeurs dans des zones océaniques très délimitées situées à des latitudes élevées.

**Climat** • Au sens étroit du terme, climat désigne en général le « temps moyen », ou plus précisément une description statistique en termes de moyennes et de variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes allant de quelques mois à des milliers ou des millions d'années. La période type est de 30 ans, d'après la définition de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Ces quantités pertinentes sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, les précipitations et le vent. Au sens large du terme, climat désigne l'état du système climatique, y compris une description statistique de celui-ci.

**Changements climatiques** (selon la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) Changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables.

Changements climatiques (selon le GIEC) Les changements climatiques signalés dans les relevés climatologiques sont attribuables aux variations internes du système climatique ou des interactions entre ses composantes, ou aux modifications du forçage externe d'origine naturelle ou anthropique. Il n'est généralement pas possible d'établir clairement les causes. Dans les projections qu'il établit sur l'évolution du climat, le GIEC ne tient généralement compte que de l'influence sur le climat de l'augmentation des gaz à effet de serre imputable aux activités humaines et d'autres facteurs liés à l'homme.

**Cryosphère** • Masses totales de neige, de glace et de pergélisol dans le monde.

## F

**Forçage radiatif** • Mesure simple de l'importance d'un mécanisme pouvant conduire à un changement climatique. Le forçage radiatif est la perturbation du bilan énergétique du système Terre-atmosphère (en W m<sup>-2</sup>) à la suite, par exemple, d'une modification de la concentration de dioxyde de carbone ou d'une variation du débit solaire. Le système climatique réagit au forçage radiatif de façon à rétablir l'équilibre énergétique. Un forçage radiatif positif a tendance à réchauffer la surface du globe tandis qu'un forçage radiatif négatif a tendance à la refroidir. Le forçage radiatif est généralement exprimé à l'aide d'une valeur annuelle moyennée à l'échelle du globe. Dans les rapports du GIEC, le forçage radiatif est défini de façon plus précise : il s'agit de la perturbation subie par le bilan énergétique du système surface-troposphère une fois que la stratosphère a retrouvé un état d'équilibre radiatif moyen mondial (voir le chapitre 4 de GIEC - 1994). On parle parfois de « forçage climatique ».

## G

**Gaz à effet de serre** • Les gaz à effet de serre sont les composants gazeux de l'atmosphère, naturels et anthropiques, qui absorbent et émettent des radiations à des longueurs d'ondes spécifiques dans le spectre du rayonnement infrarouge émis par la surface de la terre, l'atmosphère, et les nuages. Cette propriété cause l'effet de serre. La vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), l'oxyde d'azote (N<sub>2</sub>O), le méthane (CH<sub>4</sub>), et l'ozone (O<sub>3</sub>) sont les principaux gaz à effet de serre dans l'atmosphère de la terre. Il existe également des gaz à effet de serre résultant uniquement des

activités humaines, tels que les *halocarbures* et autres substances contenant du chlore et du bromure, qui sont réglementés par le *Protocole de Montréal*. Outre CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, et CH<sub>4</sub>, le *Protocole de Kyoto* réglemente l'*hexafluorure de soufre* (SF<sub>6</sub>), les *hydrofluorocarbures* (HFC), et les *perfluorocarbures* (PFC), qui sont eux aussi des gaz à effet de serre.

## M

**MOC (Meridional Overturning Circulation)** • voir Cellule méridienne de Retournement de circulation

## N

**Niveau marin moyen** • Le Niveau moyen de la mer (NMM) est normalement défini comme le *niveau de la mer relatif moyen* pendant une période donnée (un mois ou une année, par exemple), suffisamment longue pour permettre de faire une moyenne des phénomènes transitoires (vagues, par exemple). Voir également *Élévation du niveau de la mer*.

**Niveau de la mer relatif** • Niveau de la mer mesuré par un marégraphe par rapport à la terre sur laquelle il est situé. Voir également *Niveau moyen de la mer*.

**Élévation du niveau de la mer** • Augmentation du niveau moyen de l'océan. On qualifie d'eustatique toute montée ou baisse du niveau marin lorsqu'elle a la même amplitude dans toutes les régions du globe. Une élévation du *niveau de la mer relative* se produit lorsqu'il y a une augmentation nette du niveau de l'océan par rapport aux mouvements terrestres locaux. Les évaluations des modélisateurs en climatologie portent principalement sur le changement eustatique du niveau de la mer, alors que les spécialistes des *incidences* étudient plus particulièrement le changement du niveau de la mer relatif.

## O

**Oscillation de l'Atlantique Nord (OAN)** • L'Oscillation de l'Atlantique Nord est une anomalie récurrente et de grande échelle des champs de pression en Atlantique Nord. Elle comporte deux modes consistant en des variations opposées de la pression barométrique près de l'Islande et près des Açores. En d'autres termes: en moyenne, un courant de l'ouest, entre la zone de basse pression de l'Islande et la zone de haute pression des Açores, pousse des cyclones et leurs systèmes frontaux associés vers l'Europe. Cependant, la différence de pression entre l'Islande et les Açores fluctue sur des *échelles temporelles* allant de jours à des décennies, et peut quelquefois être inversée. Cette fluctuation est une manifestation physique observable de la NAO. La NAO est le mode dominant de *variabilité climatique hivernale* dans la région de l'Atlantique Nord, allant du centre de l'Amérique du Nord à l'Europe.

## R

**Résilience** • Résilience côtière : EUROSION définit la résilience côtière comme la capacité inhérente à la côte de répondre aux changements induits par la montée du niveau de la mer, aux événements extrêmes et aux impacts humains occasionnels, tout en conservant les fonctions du système côtier à long terme.

## S

**Submersions marines** • Élévation du niveau de l'eau par rapport à la terre, de sorte que des régions de terre ferme deviennent inondées ; résulte d'un affaissement terrestre ou d'une élévation du niveau de l'eau, pouvant être temporaire, récurrente ou permanente.

## T

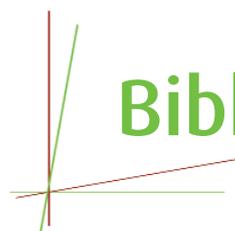
**Température moyenne à la surface de la Terre** • La température mondiale à la surface est la moyenne mondiale pondérée de l'aire de (i) la température à la surface des océans (c'est-à-dire, la température moyenne sous la surface dans les premiers mètres de l'océan), et (ii) la température de l'air à la surface au-dessus de la terre à 1,5 m au-dessus du sol.

**Thermocline** • Zone des océans, située en général à une profondeur de 1 km, où la température décroît rapidement avec la profondeur et qui marque la limite entre les eaux de surface et les eaux profondes.

## V

**Vulnérabilité** •

1. Degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur, et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité, et de sa capacité d'adaptation.
2. On entend par vulnérabilité l'état de relative fragilité d'un territoire, d'une population, qui résulte de la rencontre entre des aléas naturels (plus ou moins récurrents, plus ou moins intenses) et des conditions anthropiques spécifiques (densités de population plus ou moins fortes, plus ou moins de bâtiments résistants, des populations en plus ou moins bonne santé, des politiques de gestion des risques plus ou moins efficaces...).



# Bibliographie

- [1] OMM, *Bulletin sur les gaz à effet de serre*, 4 octobre 2008.
- [2] GIEC, *4<sup>ème</sup> rapport du GIEC – Bilan 2007 des changements climatiques – rapport de synthèse – résumé à l'intention des décideurs (version française non officielle)*, 2007.
- [3] METEO FRANCE, *Réchauffement climatique : le constat, la cause et le climat du futur (2100)*, octobre 2008.  
[http://climat.meteofrance.com/chgt\\_climat/rechauffement/rechauffement](http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/rechauffement/rechauffement).
- [4] MEDAD, *Changement climatique et prévention du risque sur le littoral – Séminaire sur la prévention des risques naturels majeurs du 19 septembre 2007*, Paris, MEDAD, 2007, 70 p.
- [5] DANDIN, Météo-France, 2007.
- [6] CONSERVATOIRE DU LITTORAL, *Impact du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du littoral : scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100 – Synthèse*, 2005, 44 p.
- [7] CAZENAVE A., NEREM R.S., "Present-day sea level change: observations and causes", *Rev. Geophys.*, vol. 42, n° 3, RG3001, 2004.
- [8] CHURCH J.A., WHITE N.J. "A 20th century acceleration in global sea-level rise", *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, n° 1, 2006, L01602, doi.
- [9] JEVREJEVA S., GRINSTED A., MOORE J.C., HOLGATE S., "Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records", *Geophys. Res. C*, vol. 111, n° 9, 2006, C09012.
- [10] WOODWORTH P.L., HOLGATE S.J., "Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s", *Geophys. Res. Lett.*, vol. 31, 2004, L07305.
- [11] RIGNOT E., et al., "Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling", *Nature Geoscience*, n°1, 2008, pp. 106-110, doi.
- [12] CAZENAVE A., DOMINH K., GUINEHUT S., BERTHIER E., LLOVEL W., RAMILLIEN G., ABLAIN M., LARNICOL G., "Sea level budget over 2003-2008: a reevaluation from GRACE space gravimetry, satellite altimetry and Argo", *Global and Planetary Change*, vol. 65, n° 1-2, 2009, pp. 83-88.
- [13] LOMBARD A., GARRIC G., PENDUFF T., MOLINES J.M., "Regional variability of sea level change using a global ocean model at 1/4° resolution, in revision", *Ocean Dyn.*, 2009.
- [14] JANSEN E., OVERPECK J., BRIFFA K. R., DUPLESSY J.-C., JOOS F., MASSON-DELMOTTE V., OLAGO D., OTTO-BLIESNER B., PELTIER W.R., RAHMSTORF S., RAMESH R., RAYNAUD D., RIND D., SOLOMINA O., VILLALBA R., ZHANG D., "Palaeoclimate" in : *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / sous la direction de Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L., Cambridge, Cambridge University Press, 2007.
- [15] NICHOLLS R.J., WONG P.P., BURKETT V.R., CODIGNOTTO J.O., HAY J.E., MCLEAN R.F., RAGOONADEN S., WOODROFFE C.D., "Coastal systems and low-lying areas" 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* / sous la direction de Canziani O.F., Palutikof J.P., Van der Linden P.J., Hanson C.E., Parry M.L., Cambridge, Cambridge University Press, 2007, pp. 315-356.
- [16] MORTON R., *Historical Changes in the Mississippi-Alabama Barrier Islands and the Roles of Extreme Storms, Sea Level, and Human Activities*, s.l., USGS Open-File Report, report 2007-1161, 2007, 42 p.  
<http://pubs.usgs.gov/of/2007/1161/OFR-2007-1161-screen.pdf>
- [17] KRINNER G., JULIEN N., "High-resolution simulation of the surface mass balance of Greenland at the end of this century", *The Cryosphere Discuss.*, vol. 1, 2007, pp. 351-383.
- [18] MEEHL G.A., STOCKER T.F., COLLINS W.D., FRIEDLINGSTEIN P., GAYE A.T., GREGORY J.M., KITO H., KNUTTI R., MURPHY J.M., NODA A., RAPER S.C.B., WATTERSON I.G., WEAVER A.J. AND ZHAO Z.-C., "Global Climate Projections" in : *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / sous la direction de Solomon S., Qin S.D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L., Cambridge, Cambridge University Press, 2007.
- [19] TSIMPLIS M., MARCOS M., SOMOT S., "21st century Mediterranean sea level rise : Steric and atmospheric pressure contributions from a regional model", *Global and Planetary Change*, vol. 63, n° 2-3, 2008, pp. 105-111.
- [20] ALLEY R.B., SPENCER M.K., ANANDAKRISHNAN S., "Ice sheet mass balance, assessment, attribution and prognosis", *Annals Glaciology A*, vol. 46, 2007, pp. 1-7.
- [21] RAHMSTORF S., "A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise", *Science*, vol. 315, n° 5810, 2007, pp. 368-370.
- [22] GRINSTED A., MOORE J.C., JEVREJEVA S., "Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD", *Climate Dynamics*, vol. 34, n°4, 2010, pp. 461-472.
- [23] HANSEN J.E., "Scientific reticence and sea level rise", *Environmental research letter*, vol. 2, n°2, 2007.

- [24] GARCIN M., DESPRATS J.F., FONTAINE M., PEDREROS R., ATTANAYAKE N., FERNANDO S., SIRIWARDANA C.H.E.R., DE SILVA U., POISSON B., "Integrated approach for coastal hazards and risks in Sri Lanka", *Natural Hazards and Earth Systems science*, n° 8, 2008, pp. 577-586.
- [25] LENOTRE N., PEDREROS R., "Impact du changement climatique sur le littoral", *Géosciences*, n° 3, 2006, pp. 36-43.
- [26] PASKOFF R., *L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers*, Paris, Institut océanographique, 2001, 191 p.
- [27] IFREMER, *Impact côtier du changement climatique*, 2008. Pas d'étude IFREMER avec ce titre
- [28] GIEC, Contribution du Groupe de travail II au 4<sup>ème</sup> rapport d'évaluation du GIEC, *Bilan 2007 des changements climatiques, résumé à l'intention des décideurs, version en français non officielle*, 2007.
- [29] WANG X.L., SWAIL V.R., "Historical and possible future changes of wave heights in northern hemisphere oceans", in : *Atmosphere Ocean Interactions Volume 2* / Perrie W., Southampton, Wessex Institute of Technology Press, 2004.
- [30] TEISSON C., *Surélévation future du niveau de la mer. Conséquences et stratégies dans l'aménagement du littoral*, CETMEF, 1992.
- [31] VIOLEAU D., *Analyse des impacts possibles de l'effet de serre sur l'environnement maritime. Etude statistique succincte sur le littoral français*, s.l., CETMEF, 2001.
- [32] MATE/METL, *Guide méthodologique Plan de Prévention des Risques Littoraux*, 1997, 54 p.
- [33] EUROSION, *Programme européen EuroSION*, 2004.
- [34] BIRD, E.C.F., *Coastline changes: a global review*, John Wiley and Sons, Chichester, 1985, 219 p.
- [35] COSTA S., DELAHAYE D., FREIRE-DIAZ R., DAVIDSON R., BERARD P.G., BES Y., LAIGNEL B., DI NOCERA, "Quantification par analyse photogrammétrique du recul des falaises et des apports de galets corrélatifs (Haute Normandie, France)" in : *Symposium Geomorphology : from expert opinion to modelling* / sous la direction de Delahaye D., Levoy F., Maquaire O., Strasbourg : 2002, pp. 205-214.
- [36] BRUUN P., "Sea level rise as a cause of shore erosion", *Journal Waterw. Harb.*, vol. 88, pp. 117-130.
- [37] COOPER J.A.G., PILKEY O.H., "Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule", *Glob. Planet.*, vol. 43, n° 3-4, 2004, pp. 157-171.
- [38] BRUUN P., Review of conditions for use of the Bruun Rule of erosion", *Coastal Engineering*, n° 7, 1983, pp. 77-89.
- [39] BRUUN P., "The Bruun Rule of erosion by sea-level rise: a discussion of large-scale two- and three-dimensional usages", *Journal of Coastal Research*, n° 4, 1988, pp. 627-648.
- [40] COOPER J.A.G., PILKEY O.H., "Alternatives to the mathematical modeling of beaches", *Journal of Coastal Research*, vol. 20, n°3, 2004, pp. 641-644.
- [41] COWELL P.J., THOM B.G., ROBERT A.J., CRAIG H.E., Reply to: Pilkey, O.H. and Cooper, J.A.G., 2006, Discussions of Cowell et al., "Management of uncertainty in predicting climate change impacts on beaches", *Journal of Coastal Research*, vol. 22, n°1, 2006, pp. 232-245.
- [42] SABINE C.L., FEELY R.A., GRUBER N., KEY R.M., LEE K., BULLISTER J.L., WANNINKHOF R., WONG C.S., WALLACE D.W.R., TILBROOK B., MILLERO F.J., PENG T.H., KOZYR A., ONO T., RIOS A.F., "The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub>", *Science*, vol. 305, n° 5682, 2004, pp. 367-371.
- [43] MARINE CLIMATE CHANGE IMPACTS PARTENSHIP – MCCIP, *Marine climate change impacts – Annual report card 2007-2008*, 2008. [www.mccip.org.uk/arc](http://www.mccip.org.uk/arc)
- [44] STEINACHER M., JOOS F., FRÖLICHER T.L., PLATTNER G.K., DONEY S.C., "Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model", *Biogeosciences*, n°6, 2009, pp. 515-533.
- [45] PÖRTNER H.O., "Ecosystem effects of ocean acidification in times of ocean warming: a physiologist's view", *Mar Ecol Prog Ser.*, vol. 373, 2008, pp. 203-217.
- [46] MELZNER F., GUTOWSKA M.A., LANGENBUCH M., DUPONT S., LUCASSEN M., THORNDYKE M.C., BLEICH M., PÖRTNER H.O., "Physiological basis for high CO<sub>2</sub> tolerance in marine ectothermic animals : pre-adaptation through lifestyle and ontogeny?", *Biogeosciences*, n°6, 2009, pp. 2313-2331.
- [47] ROSA R., SEIBEL B.A., "Synergistic effects of climate-related variables suggest future physiological impairment in a top oceanic", *PNAS*, vol. 105, n°52, 2008, pp. 20776-20780.
- [48] HOEGH-GULDBERG O., MUMBY P.J., HOOTEN A.J., STENECK R.S., GREENFIELD P., GOMEZ E., HARVELL C.D., SALE P.F., EDWARDS A.J., CALDEIRA K., KNOWLTON N., EAKIN C.M., IGLESIAS-PRIETO R., MUTHIGA N., BRADBURY R.H., DUBI A., HATZIOLOS M.E., "Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification", *Science*, vol. 318, n° 5857, 2007, pp. 1737-1742.
- [49] AUNAY B., *Apport de la stratigraphie séquentielle à la gestion et à la modélisation des ressources en eau des aquifères côtiers*, Th.: Université Montpellier II, 2007, 414 p. Thèse Université.
- [50] PETIT V., *Les aquifères littoraux de France métropolitaine*, BRGM, 1996, 120 p., RP-39298-FR.
- [51] VITTECOQ B., BRUGERON A., LACHASSAGNE P., MATHIEU F., *Localisation du biseau salé sur la nappe du Lamentin : apport de la méthode géophysique par panneau électrique*, BRGM, 2007, 77 p., RP-55554-FR.
- [52] HAMM V., THIERY D., AMRAOUI N., BEZELGUES-COURTADE S., *Modélisation hydrodynamique diphasique des écoulements souterrains de Grande-Terre*, BRGM, 2007, 128 p., RP-55039-FR.
- [53] BEZELGUES S., PETIT V., GOURDOL L., *Modélisation des écoulements souterrains de Marie-Galante en régime transitoire (Guadeloupe)*. BRGM, 2003, 80 p., RP-52675-FR.
- [54] FRISSANT N., RENE-CORAIL C., *Le phénomène d'intrusion saline à la Réunion : état des connaissances et synthèses des données disponibles*, BRGM, 2005, 64 p., RP-54330-FR.
- [55] *Convention Diversité Biologique*, Nations-Unies, 1992. <http://www.cbd.int/doc/legal/cbd-fr.pdf>
- [56] COLLOS Y., BEC B., JAUZEIN C., ABADIE E., LAUGIER T., LAUTIER J., PASTOUREAUD A., SOUCHU P., VAQUER A., "Oligotrophication and emergence of picocyanobacteria and a toxic dinoflagellate in Thau lagoon, southern France", *Journal of Sea Research*. 2009, vol. 61, n° 1-2, pp. 68-75.
- [57] GENTIAN P., LUNVEN M., LAZURE P., YOUENOU A., CRASSOUS M.P., "Motility and autotoxicity in *Karenia mikimotoi* (Dinophyceae)", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 362, n° 1487, 2007, pp. 1937-1946.
- [58] ROMAN J., PONGSIRI M.J., "Examining the links between biodiversity and human health: an interdisciplinary research initiative at the US Environmental Protection Agency". *Ecohealth*. 2007, vol.4, n°1, pp. 82-85.

## Autres éléments bibliographiques

- ARISTAGHES C., ARISTAGHES P., *Théorie de la houle. Houle réelle. Propagation de la houle*, s.l., CETMEF, 1985.
- BACHELET G., DE MONTAUDOUIN X., DESCLAUX C., MAIRESSE G., RAIGNE H., RANDRIAMBAO K., GARCIA MEUNIER P., MARTEL C., PASCAL P.Y., SAURIAU P.G., SIMON-BOUHET B., ROBERT S., GEAIROU P., GOULLETQUER P.H., *Les mollusques invasifs des bassins conchylicoles du littoral Manche-Atlantique : diversité et structure génétiques des populations invasives, compétition avec les taxons indigènes, gestion du risque pour les écosystèmes et la conchyliculture*, Moliets (Landes) : s.n., 2006. Colloque de Restitution – Programme de recherche Invasions Biologiques Actes du colloque, 17-19 octobre 2006. pp. 193-200.
- BACHELET G., SIMON BOUHET B., DESCLAUX C., GARCIA MEUNIER P., MAIRESSE G., DE MONTAUDOUIN X., RAIGNE H., RANDRIAMBAO K., SAURIAU P.G., VIARD F., "Invasion of the eastern Bay of Biscay by the nassariid gastropod *Cylope neritea* : origin and effects on resident fauna", *Marine ecology progress*, vol. 276, 2004, pp. 147-159.
- BLANCHARD M., PECHENIK J., GIUDICELLI E., CONAN J.P., ROBERT R., "Competition for food in the larvae of two marine mollusks *Crepidula fornicata* and *Crassostrea gigas*", *Aquatic Liv. Res.*, vol. 21, n°2, 2008, pp. 197-205.
- BONY S., BOPP L., BRACONNOT P., CADULE P., *Étude des scénarios climatiques réalisés par l'IPSL & Météo-France - synthèse des analyses réalisées*. Livre blanc ESCRIME, 2007.
- BOE J., *Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France*. Université de Toulouse Paul Sabatiers. Toulouse : Université de Toulouse Paul Sabatiers, 2007. p. 273, Thèse Université de Toulouse Paul Sabatiers.
- BOULET T., VIOLEAU D., *Projet Discobole. Contribution à la tâche 1 : constitution d'une base de données numériques de surcotes sur le littoral français, rapport*, EDF R&D, 2005.
- BRGM, *MISEEVA Vulnérabilité de la zone côtière à l'aléa de submersion marine, dans le cadre du changement global : Projet de recherche pour l'Agence nationale de la Recherche*, 2008.
- BRGM, *VULSACO Vulnérabilité de plages sableuses face aux changements climatiques et aux pressions anthropiques : Projet de recherche pour l'ANR*, 2008.
- CARIOLET J.M., SUANEZ S., " Approche méthodologique pour une cartographie du risque de submersion des côtes basses ", *La Houille Blanche*, n°2, mai 2009, pp. 52-58.
- *Changes in surface CO<sub>2</sub> and ocean pH in ICES shelf sea ecosystems*. Copenhague, International Council for the Exploration of the Sea, 2008, 35 p.
- CIRIA, CUR, CETMEF, *Guide Enrochements*, 2009.
- CLAUZON G., "Restitution de l'évolution géodynamique néogène du bassin du Roussillon et de l'unité adjacente des Corbières d'après les données écostratigraphiques et paléogéographiques", *Paléobiologie continentale*, vol. XVII, 1990, pp. 125-155.
- CLUS-AUBY C., PASKOFF R., VERGER F., *Impact du changement climatique sur le patrimoine du Conservatoire du littoral. Scénarios d'érosion et de submersion à l'horizon 2100*, Conservatoire du littoral, 2004, 43 p.
- DE'ATH G., LOUGH J.M., FABRICIUS K.E., "Declining coral calcification of the Great Barrier Reef", *Science*, vol. 323, 2009, pp. 116-119.
- DEVAUX E., *Analyse des Seiches à partir de l'exploitation de données marégraphiques - Exploitation graphique, analyse fréquentielle et recherche d'éléments déclencheurs, France, ENTPE*, 2009. Travail de Fin d'Études.
- DONEY S.C., FABRY V.J., FEELY R.A., KLEYPAS J.A., "Ocean acidification: the other CO<sub>2</sub> problem", *Annu Rev Mar Sci.*, n°1, 2009, pp. 69-92 .
- "Effects of ocean acidification on marine ecosystems", *Marine ecology Progress Series*, vol. 373, 2008, pp. 199-309.
- EUROPEAN PARLIAMENT POLICY DEPARTMENT ECONOMIC AND SCIENTIFIC POLICY, *Climate Change - Induced water stress and its impact on natural and managed ecosystems*, European Parliament, 2008.
- GARCIA MEUNIER P., MARTEL C., PIGEOT J., CHEVALIER G., GOULLETQUER P., SAURIAU P.G., *Human impact and marine bioinvasions : Setting genetic analysis of the Japanese drill, *Ocenebrellus inornatus* (Récluz, 1851), recently introduced into the French Atlantic coasts*, New Orléans, s.n., April 2001, Second International Conference on Marine Bioinvasions.
- GARRY G., GRASZK E., TOULEMONT M., LEVOY F., *Plan de prévention des risques littoraux (PPR), Guide méthodologique*, Paris, La documentation française, 1997.
- GOASGUEN G., *Projet Discobole. Contribution à la tâche 3 : Analyse statistique de tendances passées sur les houles et les surcotes extrêmes. rapport*, s.l., CETMEF/DELCE, 2005.
- GOULLETQUER P., BACHELET G., SAURIAU P.G., NOEL P., *Open Atlantic coast of Europe – A century of introduced species into French waters*. [éd.] S. Gollasch & S. Olenin E. Leppäkoski. *Invasive aquatic species of Europe. Distribution, impacts and management*, s.l., Kluwer Academic Publishers, 2002, pp. 276-290.
- GOULLETQUER P., *Key problematic invasive species and the associated management in French waters*. Bergen : s.n., May 27-29, 2009. International Workshop "indicator based methods to assess and map biological pollution in the coastal waters of Norway".
- HALLEGATTE S., *Les impacts du changement climatique se feront sentir en Europe - Entretien avec Stéphane Hallegatte, économiste et ingénieur à Météo-France*. 2008. [Citation : 10 octobre 2008.] [http://climat.meteofrance.com/chgt\\_climat/resultat/impact](http://climat.meteofrance.com/chgt_climat/resultat/impact).
- HOLLGATE S.J., WOODWORTH P.L., "Evidence for enhanced coastal sea level rise during the 1990s" *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31. "Simulation du climat récent et futur par les modèles du CNRM et de l'IPS", *La Météorologie*, n°55, 2006.
- LOMBARD., CAZENAVE A., "Present-day sea level rise: a synthesis", *Geosciences*, 2008.
- MCNEIL B.I., MATEAR R.J., "Southern Ocean acidification: A tipping point at 450-ppm atmospheric CO<sub>2</sub>" vol. 105, n°48, *PNAS*, pp. 18860-18864.
- METEO-France, *Les nouveaux scénarios climatiques français*. 16 octobre 2008. *Projet ESCRIME (étude des Scénarios Climatiques Réalisés par l'IPSL et Météo-France)* regroupant la communauté des chercheurs français (Météo-France, CERFACS, CNRS/ IPSL, LGGE, autour de la simulation de scénarios recommandés par le GIEC. [http://climat.meteofrance.com/chgt\\_climat2/presentation/travail\\_x\\_recherche/scenarios?page\\_id=13606](http://climat.meteofrance.com/chgt_climat2/presentation/travail_x_recherche/scenarios?page_id=13606)
- MIES, *Synthèse du 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC*, 2007.
- MIOSSEC L., JOLY J.P., GOULLETQUER P., ROHFRIETSCH A., LAPÈGUE S., SAURIAU P.G., *Positive and negative impacts following introduction of the Pacific Oyster *Crassostrea gigas* into France*, Italy, s.n., 2008, MALIAEF Conference.
- MIOSSEC L., LE DEUFF R.M., GOULLETQUER P., *Alien species alert: *Crassostrea gigas* (Pacific oyster)*. ICES Cooperative Research . s.l., ICES Cooperative Research, 2009. p. 42, ICES Cooperative Research report, n°299.

- MONTAUDOUIN X. (DE), SAURIAU P.G., NAULEAU P., LABARRAQUE D., GIRAUD K., TIOZZO J., *La Crépidule : identifier les mécanismes de sa prolifération et caractériser ses effets sur le milieu pour envisager sa gestion : chantier: bassin d'Arcachon*, LITEAU 1ère tranche, 2002, p. 42, rapport final.
- ONERC, *1<sup>er</sup> rapport de l'ONERC*. 2005. Définition d'une stratégie d'adaptation à la dérive du climat. Ce ne semble pas être le titre exact du rapport
- ORR J.C., FABRY V.J., AUMONT O., BOPP L., DONEY S.C., FEELY R.A., GNANADESIKAN A., GRUBER N., ISHIDA A., JOOS F., KEY R.M., LINDSAY K., MAIER-REIMER E., MATEAR R., MONFRAY P., MOUCHET A., NAJJAR R.G., PLATTNER G.K., RODGERS K.B., SABINE C.L., SARMIENTO J.L., SCHLITZER R., SLATER R.D., "Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms", *Nature*, vol. 437, 2005, pp. 681-686.
- PEDREROS R., *Quantification et modélisation du transport éolien au niveau des zones côtières - application au littoral girondin*. Bordeaux : s.n., 2000. Thèse.
- PERHERIN C., *Contribution à l'analyse des phénomènes de surcotes et de submersions marines*, ENTPE, 2007. Travail de Fin d'Études.
- PIELKE JR R.A., LANDSEA C., MAYFIELD M., LAYER J., PASCH R., "Hurricanes and global warming", *B. Am. Meteorol. Soc.*, n°86, août 2005, pp. 1571-1575.
- PONGSIRI M., ROMAN J., EZENWA V., GOLDBERG T., KOREN H., NEWBOLD S., OSTFELD R., PATTANAYAK S., SALKELD D., "Biodiversity Loss Affects Global Disease Ecology", *BioScience*. 2009, vol. 59, n°11, pp. 945-954.
- PÖRTNER H.O., FARELL A.P., "Physiology and climate change", *Science*, vol. 322, n°5902, 2008, pp. 690-692.
- RAYSSAC G.L., *L'enjeu climatique : support et outil d'amélioration de la gouvernance*, Paris, 2007. séminaire Prospective Info de la DIACT "Changement climatique, biodiversité et paysages : un défi pour la gestion des territoires". Allocution prononcée lors de la séance d'ouverture du séminaire Prospective Info de la DIACT "Changement climatique, biodiversité et paysages : un défi pour la gestion des territoires", Paris.
- RIEBESELL U., KÖRTZINGER A., OSCHLIES A., "Sensitivities of marine carbon fluxes to ocean changes", *PNAS*, vol. 106, n°49, 2009, pp. 20602-20609.
- ROST. B., ZONDERVAN I., WOLF-GLADROW D., "Sensitivity of phytoplankton to future changes in ocean carbonate chemistry: current knowledge, contradictions and research directions" *Mar Ecol Prog Ser.*, vol. 373, 2008, pp. 227-237.
- SAURIAU P.G., PIGEOT J., ROBERT S., GARCIA-MEUNIER P., MARTEL C., CHEVALIER G., BOUCHET V., LAVESQUE N., MONTAUDOUIN X. (DE), BLANCHARD G., GOULLETQUER P., *Occurrence of the Japanese oyster drill *Ocenebrellus inornatus* (Récluz, 1851) originating from the Pacific ocean in North-Eastern Europe : a new oyster drill in French oyster farming bays, Minorca, Spain, s.n., July 2001*. 28th EMBS Conference.
- SMITH C.R., DE LEO F.C., BERNARDINO A.F., SWEETMAN A.K., MARTINEZ ARBIZU P., "Abyssal food limitation, ecosystem structure and climate change" *Trends Ecol Evol.*, vol. 23, n°9, 2008, pp. 518-528.
- THE ROYAL SOCIETY, *Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide*, Policy document 12/05, 58 p. juin 2005. <http://royalsociety.org/document.asp?tip=0&id=3249>.
- TRMAL C., LEBRETON P., "Évaluation de l'impact du changement climatique sur le dimensionnement des digues à talus", *La Houille Blanche*, n°2, mai 2009, pp. 45-51.
- ULLMAN A., *Surcotes dans le Golfe du Lion et conditions atmosphériques : variabilité contemporaine et future (1905-2100)*, 2008. thèse de doctorat. Université de Provence-Aix-Marseille, V. Moron (dir.)
- VALLET C., DAUVIN J.C., HAMON D., DUPUY C., "Effect of the introduced common slipper shell on the suprabenthic biodiversity of the subtidal communities of the Bay of St Brieuc", *Conservation Biology*, vol 15, n°6, 2001, pp. 1686-1690.
- WITTWER C., *Risques hydrologiques et catastrophes naturelles : le point des connaissances*, 2007. Manque l'éditeur et le lieu d'édition
- WOPPELMANN G., MARTIN MIGUEZ B., BOUIN M.N., ALTAMIMI Z., "Geocentric sea level trend estimates from GPS analyses at relevant tide gauges worldwide", *Global Planet.*, 2007, n° 57, pp. 396-406.



## Impacts du changement climatique sur le littoral métropolitain

*Commencer à intégrer la variable climatique dans la prospective territoriale, c'est la perspective dans laquelle se situe le présent ouvrage et à laquelle il apporte une contribution à ce stade très modeste : faire un état des lieux des savoirs scientifiques sur les risques naturels auxquels sont exposés les espaces littoraux et sur les conséquences physiques attendues liées au changement climatique.*

*Les risques pour le littoral sont d'autant plus difficiles à prévoir que les phénomènes sont interdépendants et leurs effets se combinent. La conjugaison de ces menaces induira des impacts sur les milieux marins et littoraux, sur les ressources (eau, espace, biodiversité,...), et enfin sur les activités humaines qui en dépendent.*

*C'est pourquoi, le développement d'une prospective territoriale comme approche systémique des risques climatiques va s'imposer de plus en plus comme une nécessité : quels phénomènes surviendront ? Avec quels effets sur les territoires littoraux en général, et sur les plus vulnérables en particulier ?*

*L'originalité de cet ouvrage est de croiser le regard de plusieurs disciplines et d'assurer les résultats de travaux menés souvent de manière cloisonnée par différents organismes de recherche publique français : BRGM, IFREMER, CETMEF, METEO-France, IDDRI.*

*Ainsi, une quinzaine de fiches font le point des connaissances liées aux phénomènes climatiques et physiques généraux (température, régime des tempêtes, précipitations, stratification marine) ; aux effets physiques induits possibles (élévation du niveau de la mer, courants marins, vagues et surcotes, régime des fleuves et des apports sédimentaires) susceptibles d'avoir un impact sur le littoral et aux effets induits sur les milieux marins, côtiers et littoraux (submersions marines, érosion-accrétion, acidification, salinisation, invasions biologiques, nouvelles toxicités).*

*Chaque fiche expose ce que l'on constate actuellement, ce qui pourrait se passer, les effets possibles sur les milieux et les impacts majeurs sur les territoires littoraux et les activités humaines.*

*Cependant, la complexité des mécanismes impose beaucoup de prudence dans la prévision des impacts à attendre du changement climatique aux échelles locales. Elle sous-entend également une multitude d'effets indirects, dont seuls quelques exemples seront succinctement présentés pour certaines fiches.*

