

	Fiche info - titre :	<u>Date :</u> 13/01/2016
	Auteur : Source : <a href="http://www.senat.fr/rap/r15-014/r15-0141.html">http://www.senat.fr/rap/r15-014/r15-0141.html</a>	

# Climat : vers un dérèglement géopolitique ?

## Repères ?

**6 octobre 2015** : Climat : vers un dérèglement géopolitique ? ( rapport d'information )

- Par M. [Cédric PERRIN](#), Mmes [Leila AÏCHI](#) et [Éliane GIRAUD](#)  
au nom de la [commission des affaires étrangères, de la défense et des forces armées](#)
- [Notice du document](#)
- Disponible en [une seule page](#) HTML (792 Koctets)
- Disponible au [format PDF](#) (3,5 Moctets)
- Tous les documents sur ces thèmes :
  - [Affaires étrangères et coopération](#)
  - [Environnement](#)

## Commander ce document

- [Sommaire](#)
- [Page précédente](#) |
- [Page suivante](#)

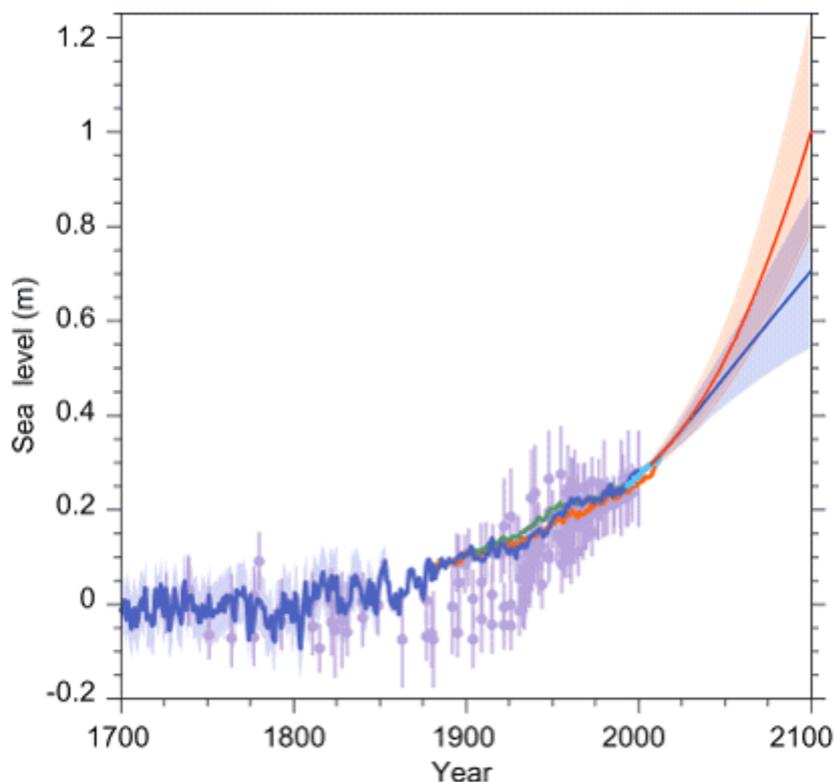
## PREMIÈRE PARTIE : LA MONTÉE DES OCÉANS FACTEUR DU DÉRÈGLEMENT GÉOPOLITIQUE

**La montée du niveau des mers et des océans est un phénomène inéluctable au moins pour les prochains siècles. Elle est réductible dans son ampleur et ses conséquences, si un effort de sensibilisation et de mobilisation est réalisé rapidement.**

### I. UN PHÉNOMÈNE INÉLUCTABLE AUX CONSÉQUENCES LOURDES

Après une phase d'augmentation depuis le minimum du dernier âge glaciaire il y a environ 21 000 ans, le taux d'élévation du niveau moyen de la mer s'est sensiblement stabilisé à environ 0,5mm/an au cours des 2-3 derniers millénaires jusqu'à la période la plus récente.

Les systèmes d'observation, réalisés par les marégraphes et par les altimètres spatiaux, ont permis d'identifier une accélération de la montée du niveau de la mer depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle **pour atteindre 1,7 mm/an (#177; 0,2) sur 1901-2011 et 3,2 mm/an (#177; 0,4) sur 1993-2014**. En moyenne sur la décennie (2001-2010), le niveau de la mer accusait une hausse d'environ 20 cm par rapport aux années 1880.

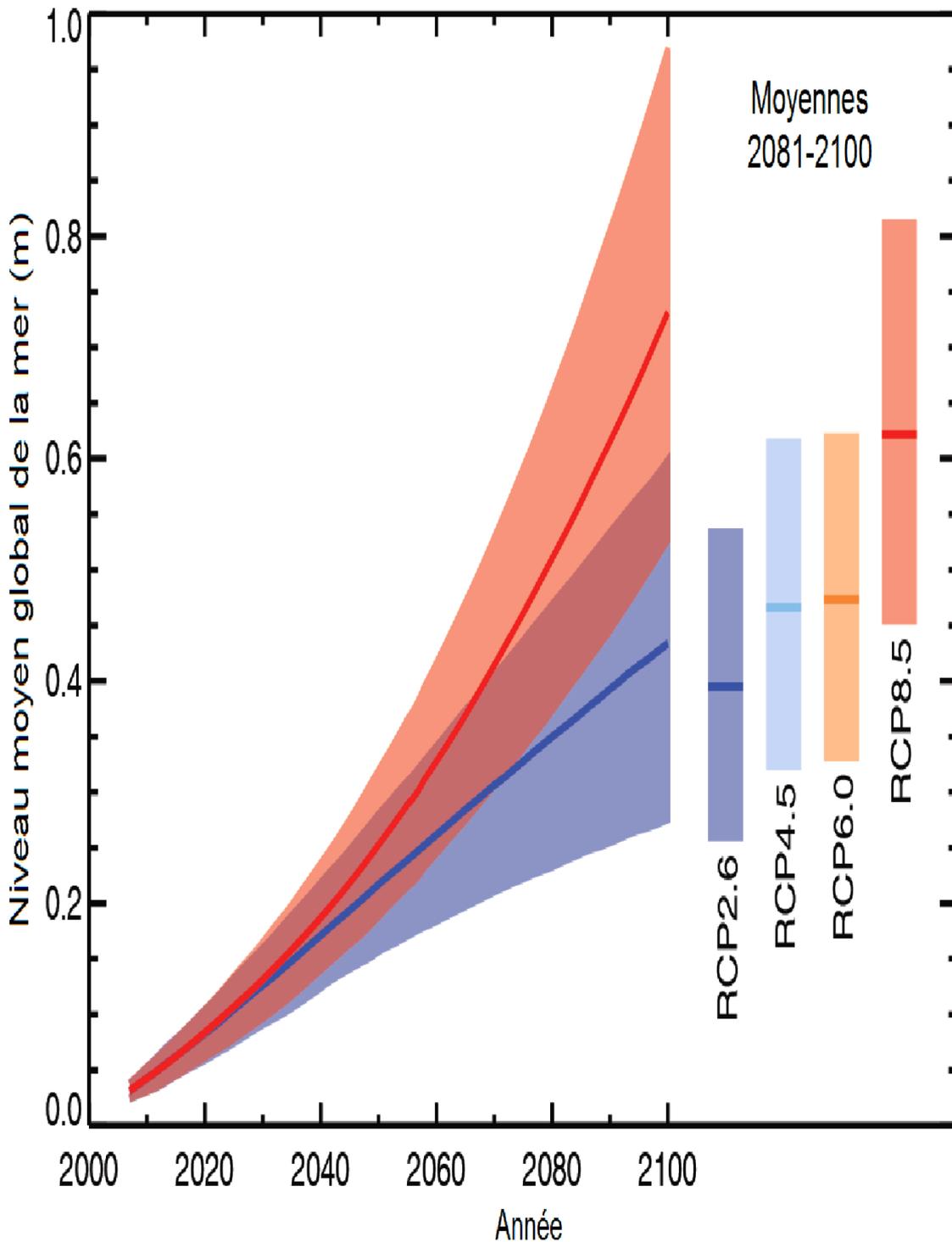


*Agrégation des données sur le niveau des mers depuis 1700. Doc IPCC, 5ème rapport, vol.1 chap.13*

**Pour les différents scénarios<sup>1(\*)</sup> du GIEC d'ici à 2100, les prévisions de montée moyenne du niveau de la mer se répartissent approximativement autour de 70 cm (de 55 à 80 cm jusqu'à 1,20 mètre).** Selon ces projections, entre les périodes 1986-2005 et 2081-2100, l'élévation probable du niveau moyen mondial de la mer serait comprise entre 26 et 55 cm pour le scénario le plus optimiste, dit « RCP2.6 » et comprise entre 45 et 82 cm pour le scénario le moins optimiste, dit « RCP8.5 ».

On observera que le précédent rapport du GIEC évoquait une élévation probable comprise entre 18 et 59 cm.

### Scénarios de montée des océans



Projections de l'élévation du niveau moyen global de la mer au XXI<sup>e</sup> siècle relativement à 1986-2005 pour les deux scénarios d'émission RCP2.6 et RCP8.5. Les plages de couleur autour des courbes correspondent à l'intervalle d'un changement « probable » (67% de chance). Les barres verticales correspondent à un changement « probable » de la moyenne de la période 2081-2100 pour tous les scénarios RCP, et les barres horizontales aux valeurs médianes associées. D'après IPCC (2013), Figure SPM.9.

Cité par le rapport « Le climat de la France au XXI<sup>e</sup> siècle » produit dans le cadre de la mission confiée au climatologue Jean Jouzel, en juillet 2010, par le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie. - Volume 5 mars 2015

### Explication méthodologique

Cette augmentation du niveau de la mer résulte du réchauffement des océans, de la fonte des glaciers et de

---

celle des calottes polaires. Les incertitudes sur ces projections proviennent pour partie des scénarios d'émission de gaz à effet de serre et pour partie des incertitudes de la modélisation du niveau de la mer.

Il faut cependant noter que la contribution de l'augmentation de l'écoulement des calottes du Groenland et de l'Antarctique reste très incertaine. Une augmentation plus importante que ces fourchettes « probables » ne peut pas être exclue mais les estimations les plus fortes restent très controversées.

---

Au-delà du XXI<sup>e</sup> siècle, l'effet de dilatation thermique de l'océan se poursuivra, ainsi que l'augmentation liée à la fonte des calottes polaires.

La distribution régionale du changement du niveau de la mer est difficile à estimer car elle dépend de l'évolution locale de plusieurs paramètres : la température de l'océan, la salinité, les courants marins, la pression de surface, l'apport d'eaux continentales ou encore les changements du niveau du fond de l'océan et les mouvements du sol. Les projections disponibles à l'échelle mondiale, ne prenant en compte qu'une partie de ces processus, montrent une forte dispersion des résultats des modèles.

L'ampleur de l'élévation du niveau marin peut être plus forte ou plus faible que la moyenne selon les régions en raison des fluctuations dans les circulations océaniques. Depuis 1993, l'ampleur dans le Pacifique Ouest est plus de trois fois supérieure à la moyenne alors que dans de nombreux endroits du Pacifique Est, elle est proche de zéro ou négative.

Cela traduit une forte incertitude sur l'amplitude de l'augmentation du niveau de la mer dans une région donnée. **Les études de l'évolution du niveau de la mer au niveau local, y compris pour les côtes françaises (métropole et DOM-COM) intégrant l'ensemble des processus, y compris ceux qui influencent la morphologie des côtes, restent à réaliser.**

## A. L'ÉLÉVATION DU NIVEAU DE LA MER, UNE DES CONSÉQUENCES DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

### 1. Une conséquence directe du réchauffement climatique

Le niveau global de la mer dépend de trois paramètres : le volume des cuvettes océaniques, régi par des processus géologiques, et deux paramètres climatiques, la quantité d'eau liquide (donc la fonte ou l'accroissement des calottes de glaces) et la température de l'océan, qui contrôle sa dilatation.

Ce sont surtout les composantes climatiques qui influent sur les tendances globales multiannuelles :

- le changement en volume lié à la dilatation thermique de l'océan (effet stérique) provoquée par l'accroissement de la température associée au réchauffement climatique.
- les changements en masse des océans résultant d'échanges d'eau avec les autres réservoirs (effet massique) : atmosphère, réservoirs d'eaux continentales, glaciers de montagne, calottes polaires hors banquise (principalement, le Groenland et l'Antarctique).

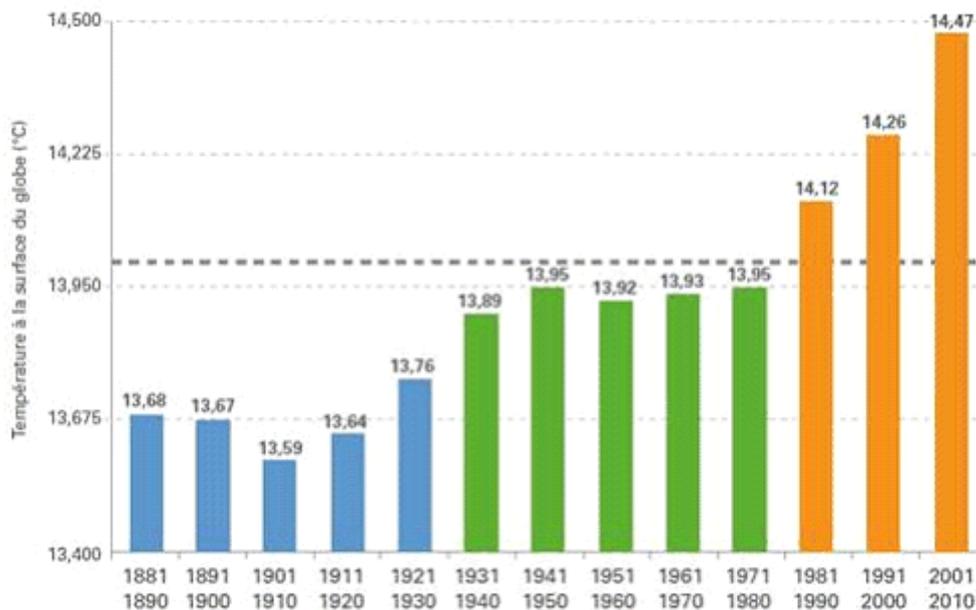
En revanche, les niveaux extrêmes sont observés à l'occasion de phénomènes récurrents (marées) et météorologiques (dépressions).

Les composantes climatiques et météorologiques sont directement influencées par le réchauffement climatique.

Le rapport<sup>2(\*)</sup> de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), « 2001-2010, une décennie d'extrêmes climatiques » révèle que « le climat s'est nettement réchauffé entre 1971 et 2010 et que le rythme décennal d'augmentation des températures sur les périodes 1991-2000 et 2001-2010 est sans précédent. Les concentrations croissantes de gaz à effet de serre, dont la spécificité est de piéger la chaleur, sont en train de

transformer notre climat, avec les bouleversements que cela suppose pour l'environnement et les océans, qui absorbent à la fois le dioxyde de carbone et la chaleur.»

### Moyenne des températures par décennie à la surface du globe



Moyenne décennale des températures à la surface du globe (terres émergées et océans confondus) (°C) obtenue à partir de trois jeux de données distincts tenus à jour respectivement par le Centre Hadley du Service météorologique national et la Section de recherche sur le climat de l'Université d'East Anglia (HadCRU) (Royaume-Uni), par le Centre national de données climatologiques (NCDC) relevant de la NOAA (États-Unis d'Amérique) et par le *Godard Institute for Space Studies* (GISS) relevant de l'Administration américaine pour l'aéronautique et l'espace (NASA). La ligne horizontale grise correspond à la normale.

### Une accélération de l'augmentation des températures

**La température moyenne à la surface des terres émergées et des océans pour la décennie 2001-2010 est estimée à 14,47°C, soit un écart de +0,47°C par rapport à la normale calculée pour la période 1961-1990 et de +0,21°C par rapport à la moyenne de la période 1991-2000 (avec un facteur d'incertitude de #177; 0,1°C).**

Le rythme décennal d'augmentation de la température à l'échelle du globe s'est accéléré entre 1971 et 2010, atteignant, en moyenne estimative, 0,17°C durant cette période, contre 0,062°C par décennie sur toute la période 1880-2010.

**À l'exception de 2008, chacune des années de la décennie 2001-2010 compte parmi les dix plus chaudes jamais enregistrées, le record étant détenu par 2010, qui présente une anomalie positive de la température moyenne de 0,54°C par rapport à la normale calculée pour la période de référence 1961-1990 (14,0°C), suivie de près par 2005.**

**La plupart des régions du monde ont connu des températures supérieures à la normale pendant la décennie 2001-2010, en particulier aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord. C'est au Groenland que la moyenne décennale des températures a accusé l'anomalie la plus forte - +1,71°C -, l'écart par rapport à la normale atteignant +3,2°C en 2010. En Afrique, chacune des années de la décennie a été caractérisée par des températures supérieures à la normale.**

**D'après les résultats de l'enquête menée par l'OMM, la décennie 2001-2010 est la plus chaude qu'aient**

---

**connue près de 94% des pays sondés, et aucun pays n'a signalé une moyenne décennale de la température inférieure à la normale au niveau national. C'est entre 2001 et 2010 que des records de chaleur nationaux ont été enregistrés dans environ 44% des pays sondés, et entre 1991 et 2000 dans 24% d'entre eux. À l'inverse, alors que dans près de 32% des pays sondés, les records de froid remontent à la période 1961-1970, ce pourcentage n'est plus que de 11% en ce qui concerne la décennie 2001-2010.**

Source : Organisation météorologique mondiale - communiqué de presse n° 976 - 3 juillet 2013

---

**Pour les scientifiques du GIEC, dans leur rapport d'octobre 2013 : « l'influence humaine sur le changement climatique est claire ». Ils estiment désormais « extrêmement probable » (probabilité désormais supérieure à 95 %, contre 90 % dans le précédent rapport de 2007), que l'élévation des températures constatée depuis le siècle dernier soit due à l'accumulation de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique. En cause, « la croissance économique et démographique qui est le facteur le plus important de l'augmentation des émissions due à la combustion des énergies fossiles. »**

La principale source d'émission de CO<sub>2</sub> anthropique est la combustion des énergies fossiles. Près de 80 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> proviennent de la production d'énergie, des processus industriels et du transport. L'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie émettent plus de 90 % du CO<sub>2</sub> produit industriellement dans le monde.

---

### Les émissions de gaz à effet de serre

Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, de méthane, de protoxyde d'azote et autres gaz à effet de serre augmentent régulièrement en raison des activités humaines. Selon le Bulletin de l'OMM sur les gaz à effet de serre, « la concentration atmosphérique moyennée à l'échelle du globe du dioxyde de carbone a atteint 389 ppm<sup>3(\*)</sup> en 2010 (soit une augmentation de 39 % par rapport à l'époque préindustrielle) ; celle du méthane, 1 808,0 ppb<sup>4(\*)</sup> (158 %) et celle du protoxyde d'azote, 323,2 ppb (20 %). Ces changements dans la composition de l'atmosphère entraînent une augmentation de la température moyenne à l'échelle du globe qui, à son tour, exerce une influence non négligeable sur le cycle de l'eau et provoque d'autres changements au niveau du temps et du climat. »

Les émissions de chlorofluorocarbones et autres substances chimiques liées aux activités humaines ont également eu des répercussions sur l'atmosphère en endommageant la couche d'ozone stratosphérique qui filtre les rayons ultraviolets nocifs. Heureusement, l'élimination progressive au titre du Protocole de Montréal des substances qui appauvrissent la couche d'ozone devrait permettre à celle-ci de se reformer d'ici quelques décennies (voir infra p.77).

De même les émissions de gaz réactifs (comme les oxydes d'azote et le dioxyde de soufre) et d'aérosols (comme la poussière et le carbone noir) ont aussi des répercussions sur le climat. Ils augmentent par exemple l'incidence des vagues de chaleur sur la santé.

Source : Organisation météorologique mondiale - 2001-2010

---

La deuxième grande source d'émission de CO<sub>2</sub> anthropique (environ 20 % des émissions) est la conséquence de l'évolution de l'utilisation des terres, et des forêts. Ces activités humaines ont une incidence sur ce qu'on appelle les « puits de carbone »<sup>5(\*)</sup>. L'Amérique du Sud, l'Asie et l'Afrique sont actuellement responsables de plus de 90 % de ces émissions.

**Sans doute a-t-il fallu du temps pour admettre cette réalité qui ne se concrétise pas immédiatement par des effets désastreux et convaincre les sceptiques que parmi les causes de certaines catastrophes naturelles, on observe une part croissante de causes directement ou indirectement liées au réchauffement climatique.**

« Le total des émissions de gaz à effet de serre a continué à s'accroître entre 1970 et 2010 avec une augmentation décennale plus importante à la fin de cette période. » poursuit le GIEC. **Les émissions ont augmenté de 2,2 % par an entre 2000 et 2010. La moyenne des trois décennies précédentes s'établissait à 0,4 %. Les émissions durant les quarante dernières années atteignent près de la moitié du total depuis 1750.**

## 2. Les causes climatiques de la montée du niveau moyen de la mer

Au fur et à mesure de l'élaboration des rapports du GIEC, la connaissance des causes et conséquences du changement du niveau de la mer s'est affinée. Les observations satellitaires et océaniques sont devenues plus précises. Les modèles ont mieux pris en compte la dynamique des échanges rapides océan-atmosphère et des échanges les plus lents affectant l'évolution des glaciers et leur écoulement vers les océans.

Les contributions respectives de chaque phénomène responsable de l'élévation du niveau des mers pour la période 1993-2011 se répartissent comme suit :

- Expansion thermique : 1.1 mm/an (+ ou - 0,3)
- Glaciers de montagne : 0,76mm/an (+ ou - 0,4)
- Calottes polaires : Groenland (0,33mm/an, + ou - 0,08) et Antarctique (0.27mm/an, + ou - 0,11)

Soit un total de 2,8 mm/an, en adéquation avec la mesure directe de l'élévation du niveau de la mer par altimétrie (de 3,2 mm/an), compte tenu de l'incertitude de la mesure (0,5-0,6 mm/an).

### a) L'effet de dilatation de la masse des mers et des océans

L'expansion thermique (la dilatation) représente 30 à 55 % de l'augmentation du niveau moyen de la mer du XXI<sup>e</sup> siècle. L'océan absorbe 90 % du surplus de chaleur induit par l'accroissement des gaz à effet de serre, ce qui se traduit par une dilatation importante.

Il se réchauffe davantage près de la surface : la température moyenne de la couche au-dessus de 75 m de profondeur s'est accrue de 0,11°C par décade entre 1971 et 2010. Cette hausse a débuté dès les années 1870. Il est probable que la couche entre 75 m et 2 000 m de profondeur s'est réchauffée depuis la fin des années 1950 et celle jusqu'à 3 000 m depuis les années 1990. Il est probable que ces hausses de température ont un effet sur les cycles d'évaporation et sur la salinité des différentes parties des océans.

En outre, depuis le début de l'ère industrielle, la captation par les océans du CO<sup>2</sup> a eu pour effet une acidification des eaux, le pH des eaux de surface a décliné de 0,1, ce qui correspond à un accroissement de 26 % de leur acidité.

### b) La fonte des glaciers d'eau douce

Depuis deux décennies, les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique (notamment au nord de la péninsule et dans le secteur de la mer d'Amundsen de l'Ouest de l'Antarctique) ont perdu en masse. Les glaciers ont continué à fondre. La couverture neigeuse au printemps dans l'hémisphère Nord continue de décroître. La persistance des couvertures glacières sur les lacs et les rivières en Europe a diminué de 12 jours par siècle depuis 1850. Cela reflète notamment le réchauffement des eaux des rivières et lacs européens, dont la température a augmenté de 1 à 3°C.

Si la fonte des glaciers d'eau douce (calottes polaires et glaciers des montagnes) et celles des banquises, notamment dans l'océan Arctique, ont la même cause (le réchauffement climatique), elles n'influent pas de la même manière sur la montée du niveau des mers, puisque seul l'apport en eau douce augmente la masse des océans.

La fonte des glaciers représente la deuxième contribution (entre 15 et 35 %), à la montée des océans.

Les contributions du Groenland et de l'Antarctique dépendent du bilan net de la fonte et de l'accumulation de la glace ou de la neige à la surface, mais aussi de l'écoulement de la glace vers l'océan.

Dans son rapport de 2013<sup>6(\*)</sup>, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) note que la chaleur record de la décennie 2001-2010 s'est accompagnée d'une fonte accélérée des calottes glaciaires, des glaciers, de la banquise et du pergélisol. Signe du réchauffement du climat, la fonte de la neige et de la glace se répercute sur l'approvisionnement en eau, les voies de transport, les infrastructures, les écosystèmes marins et bien d'autres choses encore.

---

### La fonte des banquises

Jusqu'aux années 60, la **banquise de l'Arctique** couvrait une superficie comprise entre 14 et 16 millions de km<sup>2</sup> à la fin de l'hiver et entre 7 et 9 millions de km<sup>2</sup> à la fin de l'été boréal. On assiste depuis lors à un recul rapide de la banquise. Les cinq années où l'étendue des glaces de mer a atteint en septembre un minimum sans précédent sont 2005, 2007, 2008, 2009 et 2010. Le minimum record de 4,28 millions de km<sup>2</sup>, soit 39 % de moins que la normale, a été observé en 2007. Ce record a été battu en 2012.

Le volume de la banquise arctique diminue lui aussi rapidement depuis 2005, atteignant en 2010 un nouveau minimum record.

Pendant ce temps, l'étendue de la **banquise de l'Antarctique** a légèrement augmenté d'une manière générale, pour des raisons que les scientifiques continuent d'analyser.

---

### La fonte des calottes glaciaires

Les deux inlandsis de la planète (nappes de glace persistante recouvrant la terre ferme) sont ceux de l'Antarctique et du Groenland. La perte de masse nette de ces deux calottes polaires s'est accélérée, et sur la période 2001-2010, 2007 et 2008 sont les années où cette perte a été la plus importante. Si la tendance se poursuit, la fonte des inlandsis sera le principal facteur de hausse du niveau de la mer au XXI<sup>e</sup> siècle.

Les glaciers de la planète ont perdu plus de masse entre 2001 et 2010 que durant n'importe quelle autre décennie depuis qu'il existe des relevés, et le manteau neigeux a fortement reculé dans l'hémisphère Nord

Les températures ne cessent d'augmenter dans les régions recouvertes de pergélisol (terres gelées), et la décennie 2001-2010 a été marquée par une augmentation de l'épaisseur de la couche de dégel saisonnier dans de nombreuses régions nordiques. Il est admis que l'étendue de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord décroît depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle de 1,6 % (0,8 à 2,4) par décennie de mars à avril, et de 11,7 % par décennie en juin, au cours de 1967 à 2012. Il est quasiment certain que les températures du pergélisol se sont accrues dans la plupart des régions de l'hémisphère Nord depuis le début des années 1980 avec des réductions en épaisseur et en étendue dans quelques régions. Cet accroissement des températures du pergélisol est la conséquence de l'augmentation de la température en surface et des changements observés de la couverture neigeuse.

*Source : OMM - Le climat dans le monde 2001-2010 : une décennie d'extrêmes climatiques - rapport de synthèse - 2013*

---

**Selon certains scénarios du GIEC, l'effondrement des parties marines de la calotte Antarctique, s'il se déclençait, pourrait entraîner une hausse significativement supérieure aux changements probables du niveau moyen de la mer.** Cependant, cette contribution ne dépasserait pas quelques dizaines de centimètres d'élévation du niveau des mers au cours du XXI<sup>e</sup> siècle.

Bien que les glaciers des Alpes européennes aient perdu près de deux tiers de leur volume depuis 1850<sup>7(\*)</sup>, ce qui a des conséquences régionales importantes, les experts considèrent qu'en dehors des calottes polaires, les

glaciers représentent une faible quantité de glace (de l'ordre de 40 cm d'équivalent élévation du niveau de la mer, si tous devaient fondre), ce qui limite leur contribution à l'élévation du niveau des océans.

**Pour l'OMM<sup>8(\*)</sup>, la surveillance de la cryosphère<sup>9(\*)</sup> dans une perspective à long terme s'impose désormais comme une priorité absolue**, tant pour la recherche sur le climat que pour la compréhension des conséquences concrètes de la fonte généralisée de la neige et de la glace. On ignore encore quelle sera exactement l'évolution future de la fonte des inlandsis. Grâce à une meilleure compréhension de la variabilité de la cryosphère, il sera également possible d'améliorer la qualité des projections relatives à l'élévation du niveau de la mer, ce qui permettra de rationaliser l'aménagement des zones côtières.

**Parallèlement à la fonte des glaces, le réchauffement du sol gelé en permanence et parfois depuis plusieurs milliers d'années (pergélisol) qui représente 25 % des terres émergées dans l'hémisphère Nord, soit l'équivalent de la superficie du Canada, affecte le plus gros réservoir continental de carbone de la planète<sup>10(\*)</sup>.** Selon certains experts<sup>11(\*)</sup>, « 1 700 milliards de tonnes de carbone d'origine végétale s'y sont accumulées depuis la dernière glaciation, soit deux fois plus de carbone que n'en contient actuellement l'atmosphère. » **En dégelant, le pergélisol libère dans l'atmosphère du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et du méthane, deux puissants gaz à effet de serre.** « Si la totalité du carbone emprisonné dans le pergélisol venait à être relâchée, cela pourrait avoir des conséquences dramatiques pour le réchauffement climatique », soit une augmentation de 5 à 8°C.<sup>12(\*)</sup>

### 3. Les causes géologiques de la montée du niveau moyen de la mer

La précision des balises GPS rend possible la mesure des ajustements géologiques de la hauteur de la côte, depuis la marée journalière jusqu'aux mouvements plus lents de la tectonique : surrection ou enfoncement, jeux de failles superficielles, dérives des plaques volcaniques et tremblement de terre associés.

---

#### Isostasie

La croûte terrestre répond par des mouvements verticaux « viscoélastiques » aux surcharges ou allègements divers, que ce soient la mise en eau d'un barrage, la montée de la lave sous un volcan, l'accumulation de sédiments dans un delta, la submersion des plateaux continentaux lors de la déglaciation ou encore l'accumulation ou la fonte des calottes de glace. Quand les déformations excèdent les possibilités de réponse élastique instantanée de la croûte, le rééquilibrage se traduit par des transferts de roche fluide en profondeur, au niveau de l'asthénosphère. Ces processus s'étalent sur des milliers d'années et peuvent conduire à des changements d'altitude de grande amplitude.

Les anciennes lignes de côtes des régions scandinaves et nord-canadiennes en période glaciaire se retrouvent maintenant à plusieurs centaines de mètres d'altitude, et elles continuent à monter (à des vitesses dépassant par endroits le centimètre par an), bien que la fonte des glaces soit terminée pour l'essentiel depuis plus de 10 000 ans<sup>13(\*)</sup>.

Dans la zone périphérique, la croûte au contraire descend à des vitesses de l'ordre de 1 mm/an pour la Bretagne-Sud<sup>14(\*)</sup>, à 5 mm/an par exemple pour la côte Est américaine (New Jersey). Ces mouvements verticaux transitoires de la croûte terrestre, liés à un rééquilibrage des masses entre la lithosphère et l'asthénosphère plus ou moins fluide, sont regroupés sous le terme d'isostasie. C'est l'isostasie qui influe sur le niveau global des mers en changeant le volume des bassins quand c'est le plancher océanique qui monte, ou en changeant l'altitude de la côte par rapport à la surface de la mer quand c'est la croûte continentale qui est affectée.

Source : Laurent LABEYRIE « Submersion : comment gérer la montée du niveau des mers » Odile Jacob Sciences, mars 2015, p. 30

---

La fonte des glaces continentales produit indirectement une partie de la variabilité régionale du niveau de la mer. La déformation de la croûte terrestre, sous l'effet des redistributions de masse de glace et d'eau, modifie légèrement le contour et la profondeur des bassins océaniques et en conséquence, le niveau de la mer à l'échelle régionale. Le rebond postglaciaire contribue aussi à la variabilité régionale de la mer. Ces effets d'ajustement isostatique sont désormais pris en compte dans les projections régionales de la mer (en particulier dans le 5<sup>e</sup> rapport du GIEC).

L'ensemble de ces paramètres géologiques est important pour les effets régionaux ou locaux du changement du niveau de la mer, mais relativement faible par rapport aux facteurs climatiques.

De même, les séismes peuvent provoquer des raz-de-marée ou tsunامي qui se traduisent par la formation d'une vague qui déferle sur les côtes avec une hauteur d'eau et une violence plus ou moins forte selon l'ampleur du séisme, la morphologie de la croûte terrestre et la distance de la côte, notamment.

#### **4. Les causes météorologiques des surcotes exceptionnelles**

Le niveau des eaux est également affecté par des phénomènes récurrents de vagues et de houles provoquées par les vents. Ceux-ci peuvent entraîner des vagues de grande hauteur, notamment par réflexion aux abords des côtes ou de haut-fond.

Or, le réchauffement climatique affecte aussi une série de facteurs à action rapide, la pression atmosphérique et la pression des vents, avec des conséquences pour les hauteurs, périodes, directions des vagues, les surcotes extrêmes, et donc les submersions marines.

**Au-delà de l'élévation du niveau moyen, les risques accrus de surcotes exceptionnelles liées aux baisses de pression atmosphérique lors des tempêtes, et aux effets additionnels en bordure de côtes, doivent être pris en considération.** Ces surcotes peuvent atteindre localement jusqu'à un mètre. La houle, suivant l'exposition des côtes aux fortes tempêtes, ajoute une hauteur dangereuse pouvant dépasser à titre exceptionnel 5 mètres sur les rivages les plus exposés.

Cependant, les experts considèrent habituellement que ces effets ont un ordre de grandeur inférieur aux conséquences de l'élévation du niveau marin<sup>15(\*)</sup>.

Enfin l'énergie des vagues, fonction de leur masse et de leur vitesse, provoque des chocs au contact des côtes, dont les effets érosifs et destructeurs sont importants.

a) Le réchauffement climatique pourrait avoir un effet sur l'intensité, la fréquence et les zones d'activité des tempêtes et des ouragans.

Comme le décrit dans son ouvrage<sup>16(\*)</sup> M. Laurent Labeyrie, « *La surface de la Terre reçoit sa chaleur par le rayonnement solaire visible et renvoie l'essentiel par rayonnement infrarouge, une partie servant à réchauffer les enveloppes fluides et la surface des continents. Un léger surplus d'énergie conduit la Terre à se réchauffer depuis un siècle. Les circulations atmosphérique et océanique redistribuent vers les hautes latitudes l'excès de chaleur reçu aux basses latitudes. Courants, mélanges et diffusion transportent une partie du surplus de chaleur vers les couches profondes de l'océan.*

« *Les masses d'air chauffées au voisinage de la surface terrestre, moins denses, montent progressivement vers la haute atmosphère en se refroidissant. Sous ces bulles d'air chaud, les dépressions s'organisent en gyres cycloniques pouvant dépasser plusieurs centaines de kilomètres de diamètre. L'air refroidi sous la limite de la stratosphère redescend jusqu'aux basses couches de l'atmosphère en formant des cellules de haute pression, anticyclonique.*

« *Plus il y a d'énergie accumulée dans les océans et dans l'atmosphère, plus les structures cycloniques et anticycloniques sont accentuées, ainsi que les gradients de pression entre ces systèmes. Le transport atmosphérique en est d'autant plus fort, conduisant aux tempêtes.*

« Les ouragans tropicaux, d'amplitude beaucoup plus forte, sont quant à eux centrés autour d'une grande cellule dépressionnaire isolée, au contraire des lignes de front des tempêtes, longeant la bordure nord de l'anticyclone tropical. Les ouragans ne se déclenchent que si la température des couches superficielles de l'océan dépasse 27°C en moyenne sur au moins 60 mètres de profondeur. Alors la chaîne de mécanisme - évaporation en surface et ascendance de l'air, condensation de vapeur d'eau, libération de l'énergie, ascendance - peut prendre une tournure catastrophique avec des vents au sol dépassant les 150 à 200 km/h. La quantité d'énergie associée à un ouragan de forte intensité, et d'un diamètre de 600 à 800 km s'approche de la quantité d'électricité consommée sur la terre en un an ! La pression sous l'oeil de l'ouragan peut descendre jusqu'en dessous de 900 millibars. La montée du niveau de la mer associée dépasse 1 mètre et à proximité des côtes, une houle de 10 mètres d'amplitude n'est pas rare. »

Il indique également qu'il pourrait renforcer les effets de phénomènes comme El Nina et El Nino dans le Pacifique. En effet, l'activité des alizés poussant vers l'Ouest les eaux équatoriales chauffées par le soleil conduisent à une élévation du niveau de la mer dans cette partie équatoriale de l'océan de l'ordre de 12 cm, compensée à l'Est par une baisse du niveau moyen de 10 à 20 cm. Cette situation se renforce lors des épisodes dits de la Nina avec des écarts pouvant atteindre 80 cm entre les deux parties du Pacifique équatorial, entraînant ouragans et fortes pluies entre le Nord de l'Australie, l'océan Indien et les Philippines et au contraire des sécheresses en Californie et au Pérou.

Ce phénomène s'inverse après plusieurs années (phénomène dits El Nino) qui provoque de fortes précipitations et une montée du niveau de la mer sur les côtes américaines et des périodes plus sèches à l'Ouest du Pacifique.

b) Une décennie d'extrêmes climatiques (2001-2010)

Un rapport de l'OMM<sup>17(\*)</sup> de 2013 montre un accroissement des phénomènes météorologiques extrêmes sur la décennie 2001-2010.

---

### **L'accroissement des épisodes climatiques extrêmes**

Entre 2001 et 2010, on recense 27 tempêtes baptisées, dont 15 ont atteint la force d'un ouragan et sept celle d'un ouragan majeur (catégorie 3 ou plus). *Katrina*, ouragan le plus dévastateur de la décennie classé dans la catégorie 5, s'est abattu en août 2005 sur le sud des États-Unis d'Amérique.

Dans d'autres régions, l'activité cyclonique se situait généralement dans la moyenne ou en deçà de la moyenne.

Dans le bassin du Pacifique Nord-Est, un total de 139 tempêtes baptisées a été observé durant la décennie, dont 65 classées dans la catégorie des ouragans, soit une activité cyclonique légèrement inférieure à la moyenne. La majorité de ces systèmes dépressionnaires n'ont pas atteint les côtes et n'ont donc pas fait de gros dégâts.

L'activité cyclonique a été légèrement inférieure à la moyenne dans le bassin du Pacifique Nord-Ouest également (230 tempêtes au total), où le cyclone le plus destructeur, *Durian*, a frappé les Philippines en 2006, touchant 1,5 million de personnes et faisant plus d'un millier de victimes.

Dans le nord de l'océan Indien, *Nargis*, qui s'est abattu sur le Myanmar en 2008, a été le cyclone tropical le plus meurtrier de la décennie : plus de 138 000 personnes ont été tuées ou portées disparues et 8 millions de personnes ont été sinistrées.

Les tempêtes extratropicales peuvent aussi se muer en catastrophes naturelles dévastatrices, surtout aux moyennes latitudes. Trois grandes tempêtes de ce type ont durement frappé l'Europe : *Kyrill*, qui a balayé plusieurs régions d'Europe centrale en 2007, *Klaus*, qui a touché l'Europe méridionale en 2009 et *Xynthia*, qui a frappé le nord-ouest de l'Europe en 2010. Elles ont causé la mort de près de 100 personnes et provoqué

---

---

des dommages estimés à plusieurs milliards de dollars.

D'après le Centre national de données climatologiques de l'administration américaine pour les océans et l'atmosphère, la décennie 2001-2010 est celle où l'activité cyclonique dans le bassin de l'Atlantique Nord a été la plus marquée depuis 1855. La moyenne annuelle de tempêtes baptisées s'établit à 15 pour cette décennie, contre 12 pour la période 1981-2010.

Selon les analyses effectuées par la compagnie d'assurance Munich Re, les tempêtes hivernales qui ont balayé les États-Unis et le Canada en 2007 et 2008 font partie des dix tempêtes les plus coûteuses survenues depuis 1980 si l'on considère le montant des pertes assurées.

---

c) Un effort de recherche est nécessaire pour corroborer ces hypothèses

Dans un rapport spécial publié en 2012, le GIEC résumait l'état des connaissances actuelles concernant le changement climatique de la façon suivante : « *Le changement climatique conduit à des changements dans la fréquence, l'intensité, l'expansion de la localisation, la durée et la vitesse des événements météorologiques et climatiques et il peut en résulter des phénomènes extrêmes sans précédent* ».

L'OMM<sup>18(\*)</sup> présente néanmoins, sans doute par rigueur scientifique, des conclusions plus prudentes, « *même s'il peut être démontré que la fréquence et l'intensité de certains phénomènes extrêmes s'accroissent, il demeure difficile d'évaluer l'influence que peut avoir le changement climatique d'origine anthropique sur des phénomènes isolés. La variabilité naturelle du climat joue sans conteste un rôle important, mais il s'avère aussi que la probabilité que surviennent certains phénomènes comme la vague de chaleur qui a déferlé sur l'Europe en 2003 augmente considérablement sous l'effet des activités humaines. Des méthodes scientifiques sont mises au point pour déterminer de façon plus fiable l'influence que peut avoir le changement climatique sur les phénomènes extrêmes.*

« *Aucune tendance nette ne s'est dégagée à l'échelle mondiale en ce qui concerne les cyclones tropicaux et extratropicaux. Il convient de constituer des ensembles de données exhaustifs si l'on veut pouvoir effectuer des analyses fiables de l'évolution de la fréquence et de l'intensité de ces phénomènes.*

« *Pour faire la part entre la variabilité naturelle du climat et les changements climatiques d'origine anthropique, il faudra également constituer des ensembles de données plus complets portant sur de plus longues périodes. Or pour détecter une évolution des températures, l'échelle de temps la plus courte reste la décennie. La période considérée doit être encore plus longue si l'on veut pouvoir analyser l'évolution des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, dont la fréquence est faible, par définition.*

« *La Commission de climatologie de l'OMM étudie la possibilité d'appliquer de nouvelles méthodes permettant de mieux caractériser, évaluer et surveiller ces phénomènes. En outre, de nouveaux travaux de recherche prometteurs visant à définir les causes des phénomènes extrêmes isolés en fonction des données d'observation et de modélisation commencent à voir le jour. »*

Deux scientifiques, Erich Fischer et Reto Knutti, de l'Institut des sciences du climat et de l'atmosphère de Zurich, ont comparé, à l'aide de simulations et de modèles, des phénomènes météo extrêmes de l'ère préindustrielle et de l'ère moderne. Selon leurs conclusions, publiées en avril 2015 dans la revue *Nature Climate Change*<sup>19(\*)</sup>, l'impact du réchauffement planétaire sur les phénomènes météo est considérable. Ainsi 18 % des « *précipitations extrêmes* » actuelles résultent du changement climatique. Si ce réchauffement atteint 2°C, il sera responsable de 40 % de ces précipitations extrêmes.

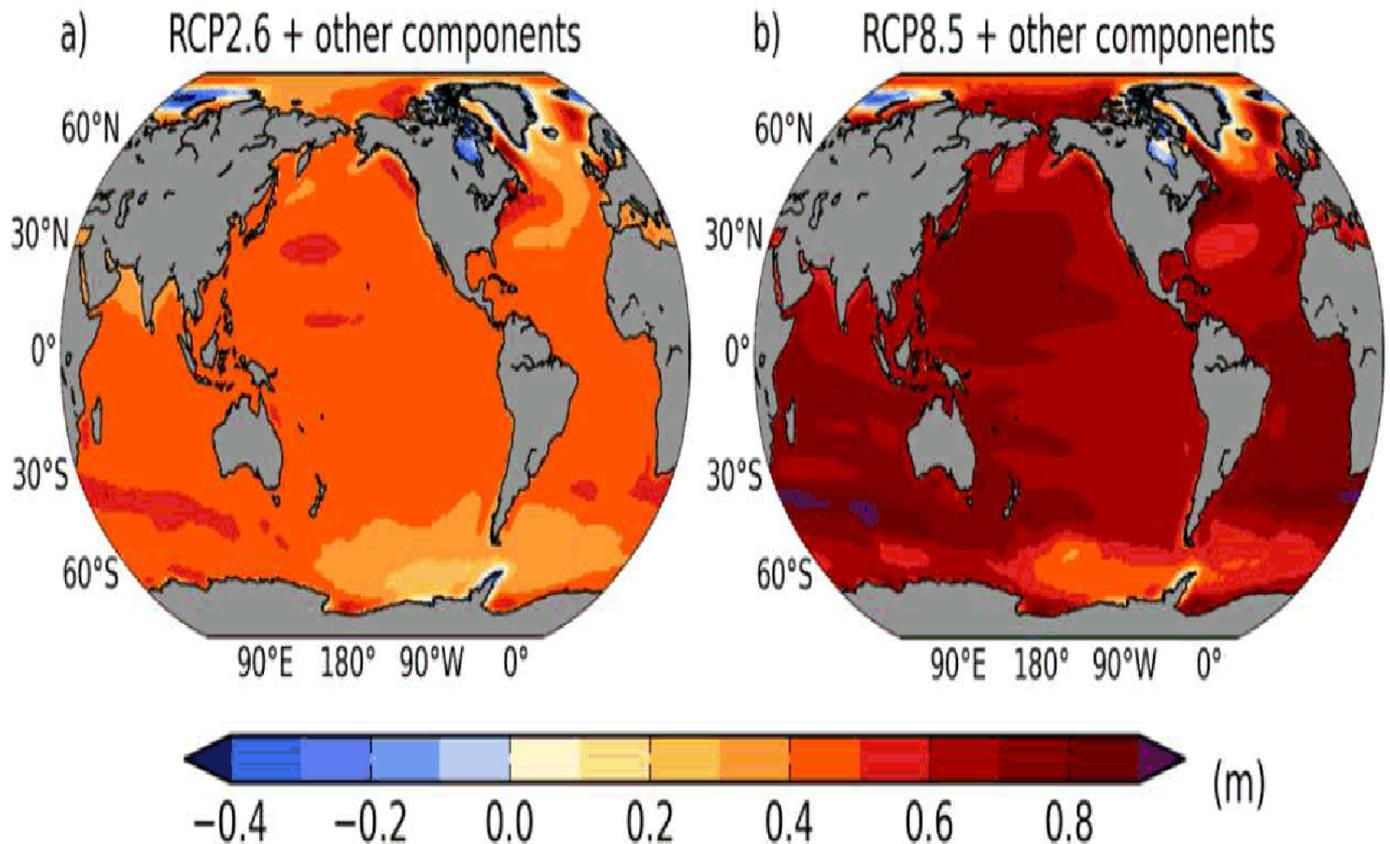
Pour le secteur des assurances<sup>20(\*)</sup>, qui suit attentivement l'évolution des événements climatiques et météorologiques, « *il y a une évidence nouvelle et certaine, que l'ensemble des océans se sont réchauffés de façon significative. Ainsi ce supplément d'énergie produit par les océans est le facteur explicatif clef de la*

survenance d'évènements extrêmes. Le réchauffement des océans a provoqué un déplacement du nombre des catastrophes couvertes par les systèmes d'assurance à un « nouveau niveau moyen ». Ce niveau atteint est quasiment irréversible ».

**Les efforts de recherche pour comprendre, mesurer et prévoir les effets du réchauffement climatique sur les phénomènes météorologiques doivent être poursuivis.**

5. La montée du niveau de la mer présentera d'importantes disparités régionales

#### Différents scénarios d'élévation du niveau de la mer



*Élévation du niveau de la mer pour la période 2081-2100 par rapport à 1986-2005. Les calculs prennent en compte les changements de température, salinité et courants simulés par 21 modèles du GIEC forcés avec les scénarios (a) RCP2.6 et (b) RCP8.5. Les figures incluent aussi les effets sur le niveau de la mer des variations régionales de la pression atmosphérique, de l'ajustement isostatique glaciaire et les échanges d'eau avec les terres émergées. D'après IPCC (2013), Figure TS.23.*

Comme c'est déjà le cas aujourd'hui, et comme le montrent les cartes ci-dessus, les disparités d'élévation du niveau de la mer résultent de différents facteurs. Le facteur dominant est dû à la distribution non uniforme de la température de l'océan et de la salinité (en lien avec la fonte de la banquise et des glaces continentales, et avec les variations du cycle hydrologique). Les variations géographiques de la pression atmosphérique jouent aussi un rôle, mais plus faible. Les ajustements isostatiques sont variables également selon les régions.

Les modèles montrent que la fonte future des calottes polaires causera une amplification de l'élévation de la mer dans les océans tropicaux de 20 % à 30 % par rapport à la hausse moyenne globale. Le phénomène de rebond post glaciaire a quant à lui des effets importants dans les régions des hautes latitudes, en particulier une hausse (relative) de la mer très supérieure à la moyenne globale le long de la côte est de l'Amérique du

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

Pour autant, cette élévation globale présentera d'importantes disparités régionales.

#### 6. L'élévation du niveau de la mer continuera pendant plusieurs siècles

La **dilatation thermique de l'océan se poursuivra pendant des siècles**, même après que la concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre aura été stabilisée, à cause de la lenteur du transfert de chaleur de la surface aux profondeurs de l'océan.

---

### **Le transfert de chaleur de la surface avec les profondeurs de l'océan**

Le refroidissement hivernal des eaux de surface aux latitudes polaires (et l'augmentation parallèle de densité) renouvelle et ventile les eaux profondes de l'ensemble des océans, avec des zones de plongée en bordure de la mer de Norvège, en mer du Labrador et autour de l'Antarctique. Ce processus est facilité par la formation de glace de mer en surface, de faible salinité, et l'accumulation parallèle des saumures, qui contribuent à augmenter la densité des eaux qui plongent. Ces eaux se répandent en profondeur à travers les océans, au niveau correspondant à leur densité relative, et remontent progressivement à mesure qu'elles se réchauffent par diffusion de chaleur et se mélangent avec des eaux moins profondes. A terme, ces eaux sont reprises par la circulation de surface entraînées par les vents. Wally Broecker a montré par l'étude du carbone 14 de masses d'eau que le renouvellement des eaux profondes met plus de 1 000 ans en moyenne. C'est le fameux schéma du « tapis roulant ». Tous les changements actuels de l'océan profond auront donc des conséquences pour plusieurs siècles.

Le processus de plongée n'est pas limité aux latitudes polaires. A toute latitude, en particulier près des côtes, le refroidissement hivernal augmente la densité de l'eau et provoque une plongée, plus ou moins profonde suivant le refroidissement et la salinité (les deux facteurs qui augmentent la densité).

---

C'est ainsi que s'acquièrent les caractéristiques des eaux dites « intermédiaires » qui s'accumulent entre 100 et 2 000 mètres de profondeur selon les latitudes et les océans. C'est surtout par ce mécanisme que l'excès de chaleur actuel pénètre en profondeur : avec un hiver doux, l'eau plonge un peu moins profondément, mais est beaucoup plus chaude. La chaleur ainsi stockée y restera pour des dizaines voire des centaines d'années.

*Laurent LABEYRIE « Submersion : comment gérer la montée du niveau des mers » Odile Jacob Sciences mars 2015 p. 30*

---

L'élévation finale atteinte, après plusieurs siècles ou millénaires selon la date de la stabilisation, dépendra en particulier de la rapidité avec laquelle l'homme réagira aux conséquences de son usage des énergies fossiles et de la façon dont il réaménagera les terres émergées. **Les simulations donnant les réchauffements les plus modestes (2°C d'augmentation au XX<sup>e</sup> siècle) partent de l'hypothèse que notre économie est capable d'arrêter de développer sa consommation d'énergie fossile dans les toutes prochaines années. Ce n'est pas certain.**

Les simulations des modèles climatiques suggèrent une augmentation du niveau moyen de la mer de 0,2 à 0,6 m par degré Celsius de réchauffement global par rapport au climat actuel du seul fait de l'expansion thermique. Sur la base de quelques modèles climatiques simulant le climat au-delà de 2100, des scénarios de basses émissions conduiraient à une augmentation du niveau moyen global de la mer de moins de 1 m en 2300 par rapport à son niveau préindustriel et de 1 m à plus de 3 m pour un scénario de fortes émissions.

**À plus long terme, l'inquiétude majeure réside dans les calottes antarctique et groenlandaise.** Les simulations des modèles indiquent **qu'au-delà d'un certain seuil de réchauffement**, la fonte en surface de

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

**Les modèles plus simples dits semi-empiriques**, auxquels le GIEC n'accorde qu'un niveau de confiance faible selon sa grille d'évaluation, basés sur les études paléoclimatiques<sup>21(\*)</sup> des derniers interglaciaires<sup>22(\*)</sup>, qui intègrent donc une fonte partielle des calottes polaires et les tendances observées depuis un siècle, indiqueraient une montée plus importante de l'ordre de 1 mètre ou plus. Les prédictions ont été prolongées jusqu'en 2500 pour mieux prendre en compte l'inertie des calottes de glace. **Le niveau moyen des mers augmente alors de 2 à 7 m pour les scénarios prévoyant une stabilisation du CO<sub>2</sub><sup>23(\*)</sup>.** Faut d'une réaction rapide, les hypothèses les plus fortes (6,5 à 8°C) ne sont pas à exclure avant la fin du siècle. Une augmentation de 5°C ou plus ramènerait probablement à terme à la situation qui existait il y a dix millions d'années, avec un niveau de la mer supérieur de 20 m à l'actuel.

Pour le secteur des assurances<sup>24(\*)</sup>, le nouveau niveau de nombre des catastrophes atteint *« est quasiment irréversible, même si les émissions de gaz à effet de serre s'arrêtent complètement demain, la température des océans continuera de croître. »*

## 7. En résumé

**La montée du niveau de la mer induite par le réchauffement climatique est de mieux en mieux évaluée par les modèles du GIEC, mais elle comporte encore des incertitudes quant à son ampleur réelle, que le perfectionnement des modèles permettra de réduire dans l'avenir. Il est important de poursuivre l'effort de recherche dans les différents domaines. Mais on constatera que d'un rapport à l'autre, la tendance est à l'aggravation des conséquences du changement climatique et notamment de la montée du niveau de la mer. Les prévisions les plus pessimistes du GIEC ne doivent pas être considérées à la légère, mais comme des scénarios réalistes.**

**Même si les occurrences restent faibles, des catastrophes climatiques à grande échelle ne sont plus exclues des scénarios<sup>25(\*)</sup>.** La paléoclimatologie a montré des situations où le climat a connu des transitions très brutales. Parmi les phénomènes aux conséquences importantes et largement réparties à l'échelle de la planète, le GIEC en cite régulièrement trois : une interruption potentielle des courants marins à grande échelle dans l'Atlantique Nord, la fonte d'une partie des glaces du Groenland et de l'ouest de l'Antarctique et le relargage massif dans l'atmosphère des gaz à effet de serre contenus dans le pergélisol.

**Il faut insister sur le caractère durable (multiséculaire) du phénomène et sur les risques d'aggravation par le cumul des effets immédiats du réchauffement climatique avec les impacts à plus long terme, le réchauffement des mers entraînant un réchauffement du climat. Les mesures de limitation du réchauffement par les stratégies d'atténuation des émissions de CO<sub>2</sub> devront inclure les effets de l'accumulation des décennies passées.**

Les études sont en mesure de définir un niveau moyen d'élévation mais il est plus difficile de localiser les variations selon les différentes régions du monde.

La combinaison des phénomènes climatiques et météorologiques influent sur les niveaux extrêmes mesurés dans les différentes parties du monde.

Les études de l'évolution du niveau de la mer au niveau local, y compris pour les côtes françaises (métropole et DOM-COM) intégrant l'ensemble des processus, y compris ceux qui influencent la morphologie des côtes, restent à réaliser.

La vulnérabilité des territoires et des populations apparaîtra par séquence : les catastrophes naturelles, plus fréquentes et plus intenses, seront les précurseurs d'évolutions plus lointaines induites par la montée des eaux. Les premières ont un impact désastreux par les destructions qu'elles entraînent et un coût élevé de reconstruction, les secondes ont un impact durable soit par la submersion permanente du territoire, soit par l'accroissement de la fréquence des submersions occasionnelles, soit par les investissements de protection qu'elles requièrent.

---

\* <sup>1</sup> Afin de dresser des projections des incidences futures, le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC a élaboré quatre profils représentatifs d'évolution des concentrations (Representative Concentration Pathways, RCP) basés sur un nombre plus élevé de modèles climatiques plus sophistiqués que ceux utilisés dans les précédentes évaluations : **un scénario d'atténuation avec émissions faibles (RCP2.6)**, représentant un profil d'évolution par lequel on pourra probablement éviter un réchauffement global supérieur à 2°C par rapport aux niveaux préindustriels ; **deux scénarios intermédiaires (RCP4.5 et RCP6.0)** et **un scénario avec émissions de gaz à effet de serre très élevées (RCP8.5)**.

\* <sup>2</sup> OMM - « 2001-2010, une décennie d'extrêmes climatiques » -2013

\* <sup>3</sup> Parties par million

\* <sup>4</sup> Parties par milliard

\* <sup>5</sup> Les forêts, par exemple, sont un des principaux "puits de carbone" (le plus grand étant constitué par les océans) en ce qu'elles absorbent beaucoup plus de carbone qu'elles n'en rejettent. Au cours des siècles derniers, sous l'action de l'homme, l'étendue des forêts s'est considérablement réduite sur la planète. Lorsque des forêts sont rasées, la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère augmente.

\* <sup>6</sup> OMM - Le climat dans le monde 2001-2010 : une décennie d'extrêmes climatiques - rapport de synthèse - 2013

\* <sup>7</sup> Ce qui localement, notamment pour l'approvisionnement en eau douce de certaines régions (au Pérou par exemple où les glaciers jouent un rôle de réservoirs pour les populations concentrées sur la bande côtière au climat aride en été), n'est pas sans conséquence.

\* <sup>8</sup> OMM - Le climat dans le monde 2001-2010 : une décennie d'extrêmes climatiques - rapport de synthèse - 2013

\* <sup>9</sup> La cryosphère désigne l'ensemble des surfaces de la Terre où l'eau est présente à l'état solide. Elle inclut les banquises, les lacs et rivières gelés, les régions couvertes de neige, les glaciers, les inlandsis et les sols gelés de façon temporaire ou permanente (pergélisol).

\* <sup>10</sup> Devant les réserves de combustible fossile (charbon pétrole, gaz).

\* <sup>11</sup> En particulier M. Florent Dominé, chercheur au laboratoire franco-canadien Takuvik qui a initié un vaste projet de recherche sur le pergélisol, le projet APT (Acceleration of Permafrost Thaw by Snow-Vegetation Interaction), réunissant pas moins de huit laboratoires français et canadiens.

\* <sup>12</sup> Laure Cailloce « Pergélisol : le piège climatique » CNRS, *Le Journal*, hiver 2015 n°279

\* <sup>13</sup> Phénomène dit du «rebond postglaciaire».

\* <sup>14</sup> En Bretagne-Nord le sol a tendance à se soulever progressivement de 1 à 2mm/an. La montée moyenne du niveau de la mer est grosso modo compensée par ce mouvement ; en outre, la quantité de sable accumulé, érodé par les glaciers nord-européens, permet la reconstitution rapide des dunes, érodées après chaque tempête. En revanche, en Bretagne-Sud, le socle a tendance à s'enfoncer et les stocks de sable disponible ne compense pas l'érosion dunaire. Les dunes sont fragilisées et constamment reprises par les grandes tempêtes.

\* <sup>15</sup> Nicholls, R. J., S. E. Hanson, J. A. Lowe, R. A. Warrick, X. Lu, and A. J. Long, 2014 : «Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(1), 129-150.

\* <sup>16</sup> Laurent Labeyrie « Submersion : comment gérer la montée du niveau des mers » *Odile Jacob Sciences mars 2015*

\* <sup>17</sup>

---

OMM « Le climat dans le monde 2001-2010 : Une décennie d'extrêmes climatiques » 2013

---

\* <sup>18</sup> OMM « Le climat dans le monde 2001-2010 : Une décennie d'extrêmes climatiques » 2013

\* <sup>19</sup> <http://www.nature.com/nclimate/journal/v5/n6/full/nclimate2617.html>

\* <sup>20</sup> Falk Niehörster et autres - Geneva Association Report « Le réchauffement des océans et ses implications pour le secteur de la réassurance » juin 2013

\* <sup>21</sup> La paléoclimatologie est la science qui étudie les climats passés et leurs variations

\* <sup>22</sup> Période séparant deux glaciations et durant laquelle la température est relativement élevée

\* <sup>23</sup> Ces amplitudes sont de l'ordre de celles observées pour les précédents interglaciaires, il y a 120 000 ans. Elles correspondent à une fonte approximative de 50% des calottes du Groenland et de l'Antarctique Ouest.

\* <sup>24</sup> Falk Niehorster et autres - Geneva Association Report « Le réchauffement des océans et ses implications pour le secteur de la réassurance» juin 2013

\* <sup>25</sup> National research Council - Abrupt climate change : =inevitable surprises National Academy Pree Washington DC