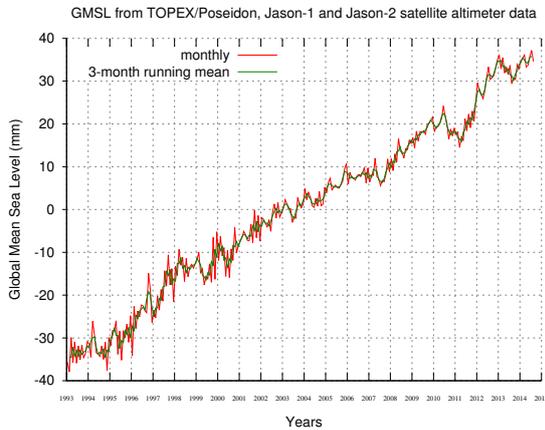
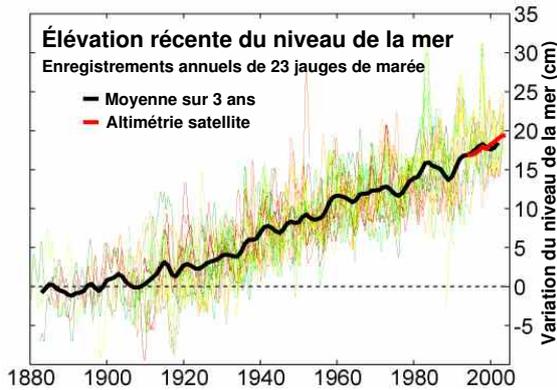


Élévation du niveau de la mer

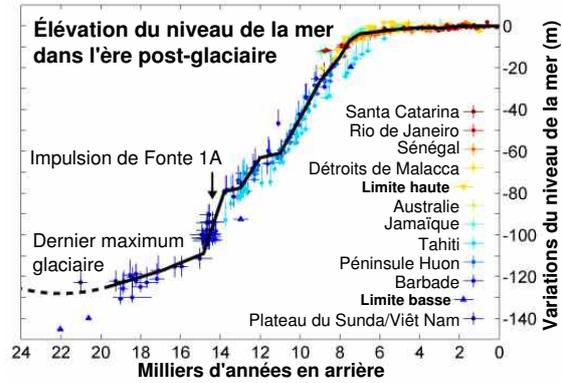


Ce graphe présente l'évolution du niveau global (moyen) de l'océan de 1992 à 2014^[1].



Les mesures du niveau de la mer à partir de 23 enregistrements de marégraphes dans des environnements géologiquement stables montrent une élévation d'environ 2 mm par an.

L'élévation du niveau de la mer est un phénomène constaté de nombreuses fois à l'échelle des temps géologiques sur l'ensemble de la Terre ; elle aboutit alors à une transgression marine. Elle peut être causée par des facteurs multiples et complexes qui résultent conjointement des effets des apports en eau (des inlandsis, des calottes glaciaires et des glaciers), de l'expansion thermique de l'eau sous l'effet de sa température, et de la répartition des masses d'eau sous l'effet des grands courants et des vents. L'élévation n'est en effet pas uniforme ; elle varie selon les régions de l'océan (selon la hauteur de la masse d'eau sous-jacente, la proximité par rapport à l'équateur, l'action des vents et grands tourbillons). Il existe aussi sur de grands pas de temps des différences régionales temporelles liées aux courants et à la configuration des fonds



Changements du niveau de la mer depuis la fin de la dernière période glaciaire.

et des côtes. Par ailleurs, les surcotes sont plus importantes dans les détroits exposés à des courants forts, en raison d'un effet « goulet d'étranglement » face à l'onde de marée.

Le niveau de la mer s'est élevé d'environ 120 mètres depuis le pic de la dernière glaciation, il y a environ 18 000 ans, principalement jusqu'à 6 000 ans avant aujourd'hui, avec une élévation moyenne de 7 millimètres par an. Depuis 3 000 ans et jusqu'au début du XIX^e siècle, le niveau marin a peu varié (+ 0,1 à 0,2 mm/an). Depuis 1900, il augmente de 1 à 3 mm par an^[2]. Depuis 1992, l'altimétrie satellite à partir de TOPEX/Poseidon indique un taux d'élévation d'environ 3 mm par an^[3].

Au XX^e siècle, la mer a monté de 17 cm^[4]. Le rapport du GIEC de 2007^[5] estimait que la mer pourrait s'élever de 18 à 42 cm d'ici 2100^[4]. Cette prévision a été portée en 2012 à 0,50 à 1 m d'ici 2100, par une étude (publiée 28 novembre 2012 pour la 18^e conférence de l'ONU sur le climat à Doha) sur le changement climatique. 3 ans plus tard, la NASA estime qu'en 20 ans, de 1990 à 2011, la mer a monté en moyenne de 3,2 mm/an (selon les données satellitaires)^[4] ; c'est 60 % de plus que les 2 mm par an anticipés par le GIEC pour son scénario moyen^[4] ; en 2013, le GIEC a revu son estimation (30 à un peu plus de 90 cm en 2100).

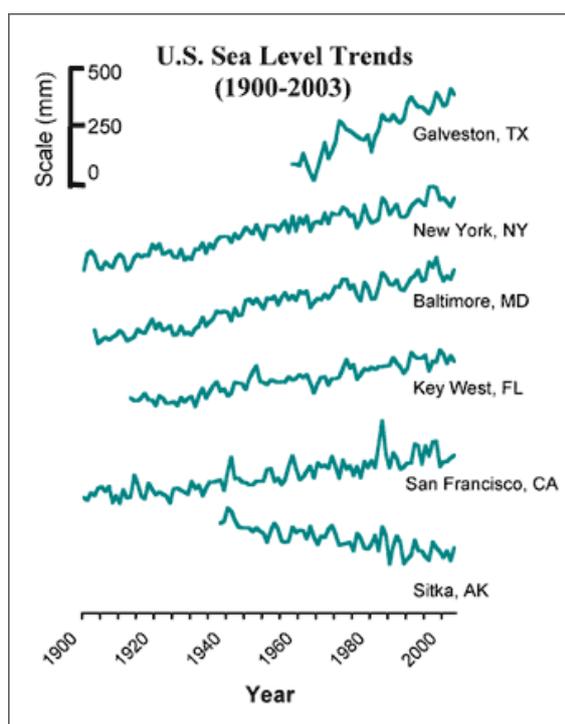
Deux ans plus tard (mi 2015) la NASA revoit encore ses estimations : le niveau marin a gagné 8 cm (en moyenne géographique) de 1992 à 2015 (et localement jusqu'à 22,9 cm), ce qui fait envisager en 2100 une hausse d'au minimum 90 cm^[6].

L'élévation du niveau marin est une des conséquence du réchauffement climatique, via deux processus principaux : la dilatation de l'eau^[7], de la mer (puisque les

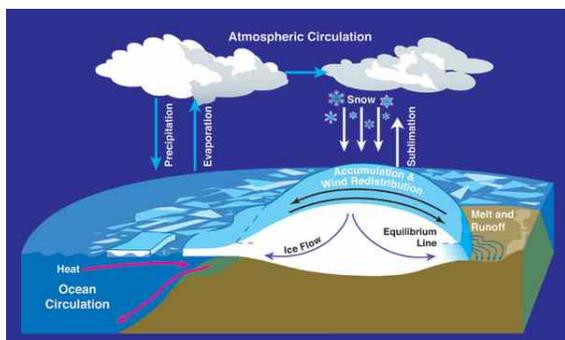
océans se réchauffent), et la fonte des glaces terrestres. On nomme **submersions marines** les « *inondations temporaires de la zone côtière par des eaux d'origine marine lors d'évènements météorologiques (tempête ou simple conjonction d'une forte dépression et d'un vent de mer^[8]) et océanographiques (houles, marée) d'ampleur très inhabituelle* »^[9].

1 Aperçu général

1.1 Niveau local, et niveau eustatique



Pour une élévation moyenne, il existe des variations dans le temps et dans l'espace (ici aux États-Unis, notamment en raison respectivement des vents, courants, subsidences ou encore de la force de Coriolis).



Cycles de l'eau entre l'océan, l'atmosphère terrestre et les glaciers.

Le Niveau Moyen Local de la Mer (NMLM) est défini comme la hauteur de la mer par rapport à un point de ré-

férence sur terre, et en moyenne sur une période de temps suffisamment longue (un mois, une année) pour que la valeur soit indépendante des fluctuations causées par les vagues et les marées. On doit également ajuster les variations du NMLM pour prendre en compte les mouvements verticaux de la terre, qui peuvent être du même ordre (quelques mm/an) que les changements du niveau de la mer. Certains mouvements de la terre se produisent à cause d'un ajustement **isostatique** du manteau dû à la fonte des **inlandsis** à la fin de la dernière **glaciation** : en effet, le poids d'un inlandsis fait baisser la terre sous-jacente et quand la glace fond, la terre remonte ou « *rebondit* » (*rebond post-glaciaire*). La pression atmosphérique, les courants océaniques et la force de Coriolis ainsi que les changements de température des océans (et donc de volume) peuvent aussi affecter le NMLM.

Les variations « eustatiques » (par opposition aux variations locales) concernent l'altération du niveau global de la mer, tels que les changements de volume de l'eau des océans et les changements de volume des bassins océaniques.

Tous ces éléments, combinés, expliquent aussi que quand le niveau moyen d'un océan (Atlantique par exemple) augmente, la montée réelle ou apparente de la mer varie géographiquement. Un océan peut même s'élever globalement, avec un niveau de hautes mers qui descendrait légèrement sur certains littoraux et augmenterait plus que la moyenne sur d'autres, même sur des zones proches comme les rivages anglais et continentaux qui lui font face^[10].

1.2 Changements à court terme et périodiques

Il y a de nombreux facteurs qui peuvent produire des changements à court terme (de quelques minutes à 14 mois) sur le niveau de la mer.

S'y ajoute un cycle plus long caractérisé par une période de 18,6 ans durant lequel le niveau moyen des pleines mers augmente de 3 % par an durant 9 ans, puis diminue de 3 % durant 9 ans, et ainsi de suite.

Ce cycle exacerbe puis diminue les effets de l'élévation du niveau de la mer induite par le réchauffement climatique^[13] Selon l'IRD, là où l'amplitude des marées est naturellement forte (ex : Baie du Mont Saint-Michel) ce cycle contribuera dans les années 2008-2015 proportionnellement plus à l'élévation du niveau de la pleine mer, ou des grandes marées hautes que le seul réchauffement climatique (jusqu'à + 50 cm, c'est-à-dire 20 fois l'expansion thermique des mers, consécutive au réchauffement climatique global). Inversement de 2015 à 2025 la phase décroissante de ce cycle devrait conduire à un ralentissement apparent du phénomène de montée de l'océan, et probablement de l'érosion du trait de côte qui lui est généralement lié.

1.2.1 Influence de la température

L'expansion thermique est le phénomène de dilatation de l'océan quand il s'échauffe. Ce phénomène explique une partie de la montée des mers^[14].

Inversement, la mesure du niveau d'élévation peut aider à évaluer la quantité de calories stockées dans l'océan. Selon des travaux publiés en 2014, cette quantité semble avoir été sous-estimée durant plusieurs décennies par les mesures in situ, notamment car les sondes de mesure - avant 2014 - n'enregistraient pas la température aux très grandes profondeurs (sous 6 000 m), la plupart des bouées ne descendant pas à moins de 2 000 m alors que la profondeur moyenne est de 3 800 m, avec des fosses à plus de 12 000 m^[14]. En 2014, des bouées dites *Deep Argo* ont commencé à faire des mesures à 6 000 m de fond^[14].

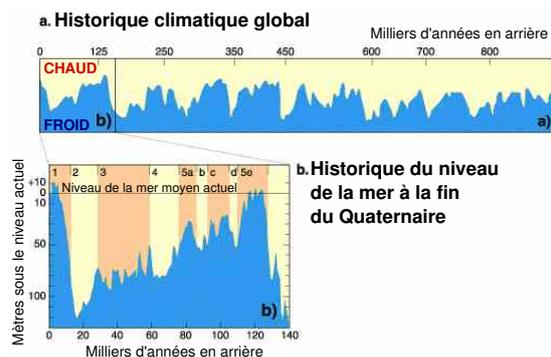
1.2.2 Influence des courants

La dynamique des grands courants tourbillonnaires ou pan-océaniques anime lentement le volume des mers, concentrant sur certaines zones des milliers de kilomètres cubes d'eau. À très long terme (centaines de millions d'années) ces courants sont modifiés par le déplacement des continents (*tectonique des plaques*) et plus périodiquement par les modifications induites par les cycles glaciaires (il y en a eu sept depuis le milieu du *Pléistocène*, il y a environ 780 000 ans avec baisse de 120 à 130 m de la mer lors des épisodes froids). Aux échelles millénaires et à plus court terme, ils dépendent de la température de la mer et donc du climat, ainsi que la hauteur des mers contrôlée par les cycles glaciaires^[15].

Dès 1992, des scientifiques ont alerté^[16] sur le fait que selon leurs modèles, une interruption de la circulation atlantique conduirait à une remontée marine de l'Atlantique Nord et à une baisse de l'Atlantique Sud bien plus rapide que ne le prévoient les modèles n'intégrant que les fontes glaciaires et l'expansion thermique de la mer (qui n'expliqueraient que quelques décimètres de différence par siècle, alors que dans le passé, la mer est parfois montée plus rapidement). Les modèles prenant en compte les courants suggèrent des différences pouvant atteindre 25 mm/an^[16], au lieu d'un à 2 mm/an. De grands événements comme un apport brutal d'eau froide polaires ont dans le passé brutalement modifié la circulation océanique nord. Aussi les courants s'inversent.

1.3 Changements à plus long terme

Des facteurs variés affectent le volume et la masse et la position des océans, menant à des changements à long terme du niveau eustatique de la mer. Les deux influences primaires sont la température (car le volume de l'eau dépend de la température, d'après les lois de la thermodynamique), et l'importance et la position de la masse des eaux « prisonnières » des terres telles que l'eau



Changements du niveau de la mer et températures relatives

douce des rivières, les lacs, les glaciers, la calotte glaciaire des pôles. Sur des échelles de temps géologiques, des changements de forme des bassins océaniques et de la distribution terres/mers affectent le niveau de la mer.

Les observations des dernières décennies donnent une élévation du niveau marin dû au réchauffement de l'eau, d'environ 1 mm/an. L'observation et les modèles de perte de masse des glaciers et de la calotte polaire indiquent une contribution de l'élévation du niveau de la mer, en moyenne sur le *XX^e* siècle, de 0,2 à 0,4 mm/an.

1.3.1 Glaciers et calottes glaciaires

Chaque année, l'équivalent d'environ 8 mm de hauteur d'eau dans les océans retombe sur l'Antarctique et sur les inlandsis du Groenland sous forme de chutes de neige. Donc si aucune glace ne retournait dans les océans, le niveau de la mer perdrait ces 8 mm par an. Bien que la même quantité d'eau, approximativement, retourne à l'océan sous forme d'icebergs et de fonte de la glace des côtes, les scientifiques ne savent pas laquelle de ces quantités d'eau - partant vers les pôles ou en revenant - est la plus grande. La différence entre la glace entrante et la glace sortante est appelée le bilan de masse et est importante car c'est elle qui cause les changements dans le niveau global de la mer.

Les barrières de glace flottant à la surface de la mer ne changent pas, quand elles fondent, le niveau de la mer. De la même manière, la fonte de la calotte glaciaire du pôle Nord, qui est constituée de glace flottante, ne contribue pas à l'augmentation du niveau des mers (plus précisément, comme c'est de l'eau douce, sa fonte cause une toute petite augmentation du niveau des mers, si petite qu'elle est en général négligée). On peut cependant affirmer que si les barrières de glace fondent, il y a de bonnes chances que les inlandsis du Groenland et de l'Antarctique fondent aussi^[réf. nécessaire].

Les scientifiques manquent d'information sur les stocks d'eau de la Terre et de leur évolution. Entre 1910 et 1990, leurs changements ont contribué à -1,1 à +0,4 mm/an. Si tous les glaciers et la calotte gla-

ciaire fondaient, l'élévation du niveau de la mer serait d'environ 0,5 m. La fonte de l'inlandsis du Groenland produirait 7,2 m d'élévation du niveau, et la fonte de l'inlandsis de l'Antarctique en produirait 61,1 m^[17]. L'effondrement du réservoir intérieur immobilisé de l'inlandsis de l'Antarctique Ouest augmenterait le niveau de 5 à 6 m^[18].

La limite des neiges éternelles est l'altitude la plus basse pour laquelle la couche de neige minimum dans l'année couvre plus de 50 % de surface. Cela varie d'environ 5 500 mètres au-dessus du niveau de la mer à l'équateur jusqu'au niveau même de la mer à 70 degrés de Latitude Nord ou Sud (selon les effets de l'amélioration régionale de la température). Le pergélisol apparaît alors au niveau de la mer et s'étend plus profondément sous la mer en direction du pôle. Comme la plupart des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique se trouvent au-dessus de la limite des neiges éternelles et/ou de la base de la zone du pergélisol, elles ne peuvent pas fondre en une période de temps inférieure à plusieurs millénaires ; par conséquent, il est probable qu'elles ne contribueront pas significativement à l'élévation du niveau de la mer dans le siècle qui vient. Elles peuvent cependant en faire par l'accélération du flux et l'augmentation du vêlage des icebergs.

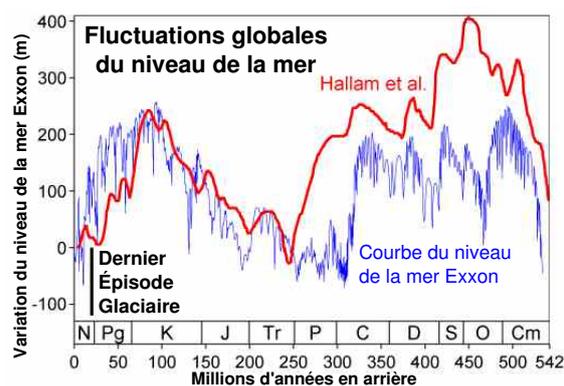
Les changements de climat du XX^e siècle, à partir des modèles étudiés, contribueraient de -0,2 et 0,0 mm/an pour l'Antarctique (résultat de l'augmentation des précipitations) et de 0,0 à 0,1 mm/an pour le Groenland (du fait du changement aussi bien des précipitations que du trop-plein). Les estimations suggèrent que le Groenland et l'Antarctique ont contribué à une élévation de 0,0 à 0,5 mm/an pendant le XX^e siècle et que ce serait le résultat d'un ajustement à long terme depuis la fin de la dernière glaciation.

La montée de la mer observée par les marégraphes, d'environ 1,8 mm/an, se situe dans l'intervalle d'estimation correspondant aux facteurs cités ci-dessus^[19] mais des recherches actives continuent dans ce domaine. L'incertitude en termes de stocks d'eau terrestres est encore importante.

Depuis 1992, les programmes satellites TOPEX et JASON ont fourni des mesures du changement du niveau de la mer. Les données courantes sont disponibles^[20]. Ces données montrent une élévation moyenne de $2,9 \pm 0,4$ mm/an. Cependant, à cause de la grande variabilité à court terme du niveau de la mer, cette augmentation récente ne signifie pas forcément une accélération à long terme.

1.3.2 Influences géologiques

À certaines époques de la longue histoire de la Terre, la dérive des continents avait disposé les terres suivant des configurations très différentes de celle d'aujourd'hui. Quand une grande partie de la croûte terrestre était près des pôles, l'étude des roches montrait, pendant les



Comparaison de deux reconstructions de niveaux de mer pendant les 500 derniers millions d'années. L'échelle des changements durant la dernière transition glaciaire/interglaciaire est indiquée par la barre verticale noire. Pendant la plus grande partie de l'histoire géologique, le niveau moyen à long terme de la mer était significativement plus haut qu'aujourd'hui.

âges glaciaires, des niveaux de mer inhabituellement bas, parce qu'il y avait beaucoup de terres polaires sur lesquelles la neige et la glace pouvaient s'accumuler. À l'inverse, pendant les périodes où les terres émergées se regroupaient autour de l'équateur, les âges glaciaires avaient beaucoup moins d'effet sur le niveau de la mer. Cependant, pendant la plus grande partie du temps géologique, le niveau à long terme de la mer était plus haut qu'aujourd'hui (voir le graphique ci-contre). C'est seulement à la frontière du Permien et du Trias, il y a environ 250 millions d'années, que le niveau à long terme de la mer était plus bas qu'aujourd'hui.

Une hypothèse basée sur la tectonique des plaques pourrait expliquer des fluctuations du niveau des océans de grande amplitude sur le très long terme. En effet, on sait que la lithosphère continentale (qui se forme au niveau des zones de subduction) s'accroît depuis l'origine des temps géologiques à cause de sa faible densité qui ne lui permet pas de disparaître dans les profondeurs de l'asthénosphère. Ainsi, les continents s'accroissant, les surfaces océaniques s'amenuisent, ce qui tend à augmenter le niveau des océans depuis le début de l'histoire de la Terre. D'autre part, lorsqu'il se produit une orogénèse (par collision), l'encombrement continental se réduit car la lithosphère continentale se retrouve comprimée (en s'élevant), et non étalée. Cela amène logiquement à l'extension des surfaces océaniques, donc à une régression marine généralisée. Par la suite, une fois l'orogénèse achevée (fin de collision de plaques), c'est l'érosion qui devient prépondérante. La matière continentale arrachée aux nouvelles montagnes est alors entraînée au fond des océans, provoquant la lente montée du niveau de ceux-ci et l'invasion des surfaces continentales littorales (transgression marine généralisée).

Cette hypothèse permettrait d'expliquer les cycles sédimentaires de grande durée qui se sont produits au niveau de bassins sédimentaires situés actuellement à une alti-

tude trop élevée (> 100 m) pour être due à des causes climatiques. On peut prendre en exemple le bassin parisien dont l'essentiel de la sédimentation s'est produite au Mésozoïque, entre l'orogénèse hercynienne (frontière Permien / Trias) et l'orogénèse alpine. Dans le cadre de cette hypothèse, chaque orogénèse (précambrienne, calédonienne, cadomienne, hercynienne et alpine) correspondant à des collisions de plaques aurait entraîné des regroupements compressifs continentaux et, par voie de conséquence, la baisse du niveau océanique et des régressions marines généralisées, alors que les périodes intermédiaires (correspondant à des fractionnements de plaques) auraient permis aux phénomènes érosifs d'entraîner de grandes quantités de matière continentale au fond des océans, provoquant la montée de leur niveau et des transgressions marines généralisées. Ces dernières auraient alors permis les cycles sédimentaires observés dans les bassins situés actuellement à des altitudes très supérieures à 100 m.

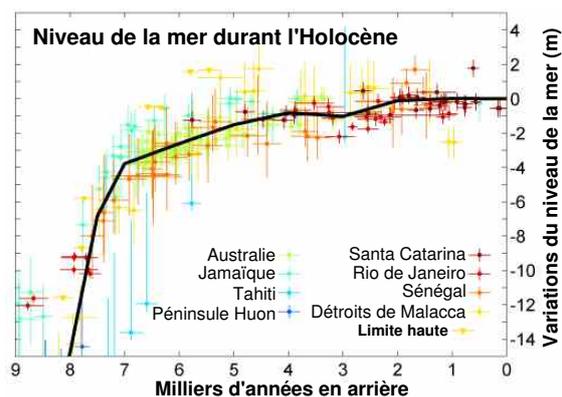
Pendant les cycles glaciaires/interglaciaires sur les quelques millions d'années avant le présent, le niveau de la mer a varié d'à peu près cent mètres. Cela est dû principalement à la croissance et à la décroissance des inlandsis (majoritairement dans l'hémisphère nord) alimentés par l'eau évaporée de la mer. Le dégel des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique conduisait à une élévation du niveau de la mer d'environ 70 mètres^[17].

La croissance graduelle du bassin méditerranéen, ainsi que du bassin Néotéthys (un des océans issus du démantèlement de la Pangée, qui longeait l'ensemble de la bordure nord du continent Africain et des plaques Arabe, indienne et australienne), commencée pendant le Jurassique, n'a pas affecté les niveaux des océans. Pendant que la Méditerranée était en train de se former, durant les 100 derniers millions d'années, le niveau moyen des océans était en général de 200 mètres au-dessus du niveau actuel. Cependant, le plus grand exemple connu d'inondation marine a été quand l'Atlantique a ouvert la brèche du détroit de Gibraltar à la fin de la crise de salinité du Messinien il y a environ 5,2 millions d'années. Cela a restauré les niveaux de la Méditerranée, mettant une fin soudaine à une période d'assèchement. Cette brèche s'est apparemment ouverte à cause de forces géologiques dans la zone du détroit.

2 Changements du niveau de la mer dans le passé

2.1 Trace des sédimentations

Depuis des générations, les géologues essaient d'expliquer pourquoi les dépôts sédimentaires observés partout sont indéniablement cycliques. La théorie prédominante est que cet aspect cyclique représente principalement la réponse des processus de déposition à l'élévation et à la



Changements du niveau de la mer pendant les 9 000 dernières années.

baisse du niveau de la mer. Sur les roches, les géologues voient l'enregistrement des époques où le niveau de la mer était étonnamment bas, alternant avec des époques où il était bien plus haut qu'aujourd'hui, et ces anomalies apparaissent partout sur la terre. Par exemple, à la dernière glaciation, il y a 18 000 ans, quand les centaines de milliers de kilomètres cubes de glace étaient empilés sur les continents en formant des glaciers, le niveau de la mer était 120 m plus bas ; les endroits qui, aujourd'hui, supportent des récifs de corail, étaient en hauteur et secs, et le littoral était à des kilomètres plus loin dans les bassins, par rapport à aujourd'hui. C'était durant cette période de niveau très bas de la mer qu'il était possible de passer à pied sec de l'Asie à l'Alaska, ce qu'on pense que les humains ont fait pour migrer en Amérique (voir Bérिंगie).

Cependant, pendant les 6 000 ans passés (bien avant que l'humanité ait commencé à garder des traces écrites), le niveau de la mer s'est approché graduellement de celui qu'il a actuellement. À l'époque interglaciaire précédente, il y a environ 120 000 ans, le niveau de la mer a été pendant peu de temps 6 mètres plus haut (environ) qu'aujourd'hui, comme le montrent à l'évidence les entailles faites par les vagues le long des falaises dans les Bahamas. Il y a aussi les récifs coralliens du Pléistocène isolés à 3 mètres au-dessus du niveau actuel de la mer le long du littoral sud-ouest de l'île de West Caicos dans les Antilles. Ces récifs, qui ont été submergés une fois, et les dépôts à proximité des plages paléolithiques sont des témoins silencieux que la mer a passé suffisamment de temps à un niveau plus élevé pour permettre à ces récifs de croître (il n'a pas encore été déterminé d'où, exactement, cette eau supplémentaire venait, de l'Antarctique ou du Groenland). Des preuves similaires des positions des niveaux de la mer, géologiquement récentes, sont abondantes partout dans le monde.

La dernière invasion marine marquée en Europe date d'un *petit réchauffement climatique*. Il a été maximal vers l'an 800 ap. J.-C., à l'époque de Charlemagne, alors que des arbres et de la végétation poussaient en limite du Groenland. Une grande partie des Pays-Bas, de la Belgique et

une partie de l'actuel nord de la France étaient alors submergées sous la mer. Le suivi des niveaux enregistrés en Baltique depuis 1774 montre que la variabilité interannuelle des niveaux marins de la Baltique a considérablement diminué (98 %) de la fin des années 1700 au début des années 1900, puis qu'il a considérablement augmenté (95 %) à nouveau, avec une modification des vents dominants en hiver, peut être lié à un changement à long terme dans l'oscillation nord-atlantique^[21].

2.2 Évaluations

Le Troisième Rapport d'Évaluation (TRE) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC ; en anglais : IPCC TAR), figure 11.4, montre un graphique des changements du niveau de la mer à travers les 140 000 dernières années^[22].

Les évaluations de l'élévation du niveau de la mer à partir de l'altimétrie par satellite depuis 1992, donnent environ 2,8 mm/an. Elles excèdent celles obtenues par les marégraphes. On ne sait pas si cela représente une augmentation sur les dernières décennies, si c'est de la variabilité normale, ou bien, s'il y a des problèmes d'étalement des satellites. En 2001, le TRE déclarait que les mesures avaient détecté une accélération non significative de la vitesse actuelle d'élévation du niveau de la mer. Des travaux plus récents peuvent remettre cela en question ; par exemple Church et White, 2006^[23].

Basé sur les données obtenues par les marégraphes, la vitesse de l'élévation du niveau de la mer moyen global pendant le XX^e siècle se trouve dans une fourchette qui va de 0,8 à 3,3 mm/an, avec une vitesse moyenne de 1,8 mm/an^[24]. Des études récentes des puits romains à Caesarea et des *piscinae* romaines en Italie indiquent^[réf. nécessaire] que le niveau de la mer était resté assez constant depuis quelques centaines d'années avant notre ère jusqu'à il y a quelques centaines d'années.

Basé sur des données géologiques, le niveau moyen global de la mer peut avoir augmenté avec une vitesse moyenne d'environ 0,5 mm/an pendant les 6 000 dernières années et avec une vitesse moyenne de 0,1 à 0,2 mm/an pendant les 3 000 dernières années. Depuis le dernier maximum glaciaire, il y a environ 20 000 ans, le niveau de la mer s'est élevé de 120 mètres (avec une moyenne de 6 mm/an) résultant de la fonte d'importants inlandsis. Une augmentation rapide a eu lieu entre 15 000 et 6 000 ans avant le présent à une vitesse moyenne de 10 mm/an qui a causé une augmentation de 90 m ; par conséquent, dans la période depuis 20 000 ans avant le présent (en excluant l'augmentation rapide entre 15 et 6 000 ans), la vitesse moyenne était de 3 mm/an.

Un événement significatif a été l'impulsion de fonte 1A, quand le niveau de la mer a augmenté de 20 m sur 500 ans il y a environ 14 200 ans. C'est une vitesse de 40 mm/an. Des études récentes suggèrent que la source principale de la glace fondue était l'Antarctique, et c'est peut-être ce

qui a causé l'impulsion de froid sud → nord marquée par le *Huelmo/Mascardi Cold Reversal* (en) de l'hémisphère sud, qui a précédé le *Dryas récent* de l'hémisphère nord. L'élévation relative du niveau de la mer à des endroits spécifiques est souvent de 1 à 2 mm/an supérieure ou inférieure à la moyenne globale. Le long des côtes américaines mi-atlantiques et du Golfe, par exemple, le niveau de la mer s'élève d'approximativement 3 mm/an.

3 Élévation future du niveau marin

- En 2001, le Troisième Rapport d'Évaluation du GIEC prédisait, tablant sur un scénario moyen, que le réchauffement climatique conduirait à une élévation du niveau de la mer de 9 à 88 cm en 2100 (pouvant se poursuivre ensuite). La courbe des émissions de CO₂ et d'élévation moyenne des mers ont continué à croître au XX^e siècle, mais sans accélération significative détectée de la vitesse d'élévation du niveau marin^[25]. Par la suite, J. A. Church et N. J. White ont trouvé une accélération de $0,013 \pm 0,006$ mm/an^[23].
- En 2007 le GIEC, sans prendre en compte la fonte des glaces, faute de modèle prédictif satisfaisant indiquait une augmentation de 20 à 60 centimètres en 2100. Cependant, la même année, des scientifiques alertent sur une fonte plus rapide que prévue^[26], ce qui sera confirmé en 2009, y compris pour l'antarctique^[27].
- En 2011, un rapport^[28] sur la neige, l'eau, la glace et le permafrost dans l'arctique publiée par l'Arctic Monitoring and Assessment Programme (programme consacré à la surveillance de l'Arctique par le Canada, le Danemark, les États-Unis, la Finlande, l'Islande, la Norvège, la Russie et la Suède) sur la base de données de terrain récoltées en arctique (quadruplement de la régression des glaciers groenlandais entre 2004 et 2009 par rapport à 1995-2000 ; diminution de l'inlandsis groenlandais passée de 50 gigatonnes/an entre 1995 et 2000 à plus de 200 gigatonnes entre 2004 et 2008) conclut que le GIEC sous-estimé la gravité de la fonte de l'Arctique. Selon l'Amap au rythme des années 1995-2000 l'augmentation des mer à cause de la fonte de l'Arctique atteindrait plutôt de 60 cm à 1,60 mètres d'ici 2100.
- De plus, dans la revue *Science* en mai 2011, des climatologues comme Stefan Rahmstorf constataient que les courbes de températures et du niveau marin continuaient à suivre les hautes et très hautes limites des projections du GIEC 2001, c'est-à-dire le scénario le plus pessimiste, cependant la durée étudiée (environ 15 ans) ne permet pas de différencier une tendance à long terme de la variabilité naturelle du climat^[29].

- Peu après (mai 2011), Jim Hansen (NASA) estimait^[30] que l'approche semi-empirique^[31] de Rahmstorf sous-estime lui-même encore le phénomène, car dans les interglaciaires précédents des traces de montées de plusieurs mètres par siècle ont été enregistrées par la géologie^[32]. Si la vitesse de fonte de pôle nord était stabilisée, c'est une élévation marine d'environ 5 m qu'il faut attendre en 2100^[33]. Il estime aussi que plus on attend pour réduire les émissions de CO₂, bien pire sera la situation en 2100, et que les scientifiques s'auto-sensurent parce qu'ils n'ont pas encore toutes les preuves^[30].
- De plus, la montée des eaux ne s'arrêtera pas en 2100. Selon le P^r Kenneth G. Miller^[34] (Université de Rutgers), si l'on compare la situation de la terre du XXI^e siècle à celle du Pliocène (période marquée par une eustasie importante^[35]), ce sont 12 à 22 m de hauteur d'eaux marines qui auront recouvert les terres les plus basses au tout début du prochain millénaire, si la température moyenne de la terre n'augmente effectivement pas de plus de 2 °C (scenario optimiste retenu par la communauté internationale). À cause de la fonte des glaces et de l'expansion thermique des mers, les océans engloutiraient alors les terres aujourd'hui (2010) occupées par environ 70 % de la population humaine. Il se base notamment sur des données paléoenvironnementales collectées en Virginie, dans l'Océan Pacifique et en Nouvelle-Zélande (Le taux de CO₂ atmosphérique actuel (2012) tend à s'approcher de celui du Pliocène (- 3 millions d'années), or il était à cette époque associée à un climat moyen plus chaud de 2 °C, et à un niveau marin plus élevé de 12 à 22 mètres qu'aujourd'hui.
« Cette montée des océans inondera les côtes du monde entier et affectera environ 70 % de la population mondiale » dit H. Richard Lane (Directeur de programme à la division Géologie de la National Science Foundation, financeur de cette recherche). Shanghai, Le Caire, Londres ou La Nouvelle-Orléans seraient alors totalement englouties sous les eaux, et le Bangladesh, le Cambodge ou les Pays-Bas, une grande partie de la Belgique et du nord de la France effacée des cartes. La réalisation de ce scénario (qui, avec + 2 °C n'est pas le plus alarmant) obligerait l'humanité à densifier ses populations sur des territoires toujours plus petits.
- Pour l'instant l'arctique fond plus vite que l'antarctique. Les glaciers continentaux pourraient apporter assez d'eau pour faire monter les mers d'environ 40 cm. La fonte du Groenland apporterait assez d'eau pour élever la mer de 6 à 8 mètres (tout en privant les terres d'eau douce). L'Antarctique-Ouest (qui s'érode aussi^[36]) contient assez d'eau pour une élévation de 5-6 m, alors que l'Antarctique-Est s'il fondait élèverait la mer de 70 mètres supplémentaire. Les modèles ne permettent

pas encore de prédire à quelles vitesses et dans quelle proportion ces fontes se feront. Les courbes ont été relativement linéaires au XX^e siècle, mais des effets d'albédo et de libération massives de méthane pourraient accélérer le réchauffement, et donc la montée des mers^[37].

- Enfin, les prédictions régionales sont rendues difficiles par le caractère non uniforme de l'élévation marine^[38] (détails ci-dessous). Certaines régions subissent une élévation plus importante que la moyenne (souvent, plus que deux fois la moyenne), et d'autres une chute^[39]. Les modèles divergent encore quant aux probabilités de changement du niveau marin^[40].

3.1 2016 : publication de données et de modèles plus précis

En février 2016, quatre études nouvelles publiées (dans PNAS) aboutissent à des estimations pour 2100 proches de celles du GIEC ; elles confirment que les calottes glaciaires semblent « vulnérables à des changements relativement faibles de CO₂ ». Ces études se basent sur jusqu'à 6 millions d'années de données climatiques réunies sur 24 sites (à partir des foraminifères fossiles notamment) pour affiner les modélisations des interactions entre climat, glaces polaires et océans^[41].

Selon ces données :

- la montée de la mer au XX^e siècle a été « plus rapide que tout ce que nous avons vu dans les deux millénaires précédents » (il ne s'agit pas ici de modèles, mais de données)^[41] ;
- des hausses et baisses spectaculaires du niveau marin peuvent advenir plus rapidement que ce qu'on pensait jusqu'alors^[41] ;
- Dans les 3 derniers millénaires, de faibles variations de température moyenne ont entraîné des changements mesurables du niveau des mers (une baisse planétaire de 0,2 °C entre 1000 et 1400 C.E., a par exemple diminué le niveau marin moyen d'environ 8 cm, mais il a grimpé de 14 cm environ durant le XX^e siècle et au moins la moitié de cette hausse ne peut s'expliquer que par des causes humaines^{[42],[43]}. Si cette tendance se poursuit, la mer montera de 0,24 à 1,3 mètre durant le XXI^e siècle^[41] ;
- L'étude d'un forage de 1,1 km de profondeur fait en Antarctique, « éclaire le flux et le reflux des calottes glaciaires du continent en remontant bien plus loin dans le passé (jusqu'à il y a entre -14 millions et -20 millions d'années), quand le taux de CO₂ de l'air a légèrement dépassé les taux actuels ». Les microfossiles de ce carottage confirment que le volume des calottes glaciaires a été corrélés avec les changements du taux de CO₂ atmosphérique. Quand le

CO₂ était au plus bas, les calottes glaciaires s'éten-
daient si loin dans l'océan arctique qu'elles en ont lo-
calement creusé le fond marin. Au contraire quand
le CO₂ était au plus haut les glaces se sont retirées
assez loin pour que des pétoncles et du pollen de
plantes côtière soient retrouvés dans le sédiment ca-
rotté (ceci correspond à des époques où le taux de
CO₂ était probablement d'un peu plus 500 ppm, soit
environ 100 ppm de plus qu'aujourd'hui)^{[44], [41]}.

Ces résultats ont été mis en ligne avec une nouvelle si-
mulation informatique^[45] présentant la manière dont la
calottes antarctique grandit ou se réduit, qui pourrait
résoudre les problèmes contrariaints les modèles semi-
empiriques précédents (qui ne s'étaient pas montré ré-
troactivement capable d'expliquer les évènements géolo-
giques enregistrés dans les carottes de sédiments antarc-
tiques). Ce modèle, comme les études du GIEC, invite à
penser que le niveau marin va continuer à s'élever, et plus
vite que ne le prévoient les modèles précédents.

3.2 Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

Article détaillé : Groupe d'experts intergouvernemental
sur l'évolution du climat.

Les résultats du chapitre sur le niveau de la mer du
Troisième Rapport d'Évaluation du GIEC (TRE) (auteurs
John A. Church (en) et Jonathan M. Gregory (en)) sont
donnés ci-dessous.

La somme de ces composants indique une vitesse
d'élévation du niveau eustatique de la mer (correspon-
dant à un changement du volume de l'océan) depuis 1910
jusqu'en 1990 qui va de -0,8 à 2,2 mm/an, avec une
valeur centrale de 0,7 mm/an. La borne supérieure est
proche de la borne supérieure observée (2,0 mm/an),
mais la valeur centrale est plus petite que celle observée
(1,0 mm/an), c'est-à-dire que la somme des composants
est biaisée vers le bas en comparaison avec les évalua-
tions observationnelles. La somme des composants indi-
que une accélération de seulement 0,2 (mm/an)/siècle,
dans une fourchette de -1,1 à +0,7 (mm/an)/siècle, en ac-
cord avec la conclusion observationnelle de la non accélé-
ration de l'élévation du niveau de la mer pendant le XX^e
siècle. La vitesse estimée de cette élévation du fait des
changements climatiques anthropogéniques depuis 1910
jusqu'en 1990 (à partir d'études de modèles d'expansion
thermale, de glaciers et des inlandsis) va de 0,3 à 0,8
mm/an. Il est très probable que le réchauffement du XX^e
siècle contribue significativement à l'élévation observée,
à travers l'expansion thermique de l'eau de la mer et la perte
considérable des glaces des terres^[29].

Une perception commune est que la vitesse d'élévation du
niveau de la mer aurait dû s'accroître pendant la dernière
moitié du XX^e siècle, mais les données des marégraphes

ne montrent cependant pas d'accélération significative.
Nous avons obtenu des évaluations basées sur le **Modèle
global du climat** pour les éléments directement reliés
au changement anthropogénique du climat pendant le
XX^e siècle, c'est-à-dire l'expansion thermique, les inland-
sis, les glaciers et les calottes glaciaires... L'élévation
totale calculée^[3] indique une accélération de seulement
0,2 (mm/an)/siècle, avec une variation de -1,1 à +0,7
(mm/an)/siècle, en accord avec la conclusion observa-
tionnelle de non accélération de l'élévation du niveau de la
mer pendant le XX^e siècle. La somme des éléments non
reliés au récent changement climatique est de -1,1 à +0,9
mm/an (c'est-à-dire en excluant l'expansion thermique, les
glaciers et les calottes glaciaires, ainsi que les change-
ments des inlandsis dus au changement du climat du XX^e
siècle). Cet intervalle est inférieur à la borne inférieure
observée de l'élévation du niveau de la mer. Donc, il est
très probable que ces éléments seuls sont une explication
insuffisante, ce qui implique que le changement du climat
du XX^e siècle a effectivement contribué à l'élévation du
niveau de la mer du XX^e siècle^[19].

3.2.1 Incertitudes et critiques concernant les résul- tats du GIEC

L'enregistrement du niveau marin (+ 180 mm/siècle à
partir du XIX^e siècle ne montre pas d'accélération me-
surable au XIX^e siècle ni dans la première moitié du XX^e
siècle. Le GIEC attribue environ 60 mm/siècle à la fonte
des glaces et autres processus eustatiques, laissant un ré-
sidu de 120 mm à prendre en compte pour le XX^e siècle.
Les températures globales des océans, selon Levitus et
autres, sont en accord avec les modélisations couplées
océan/atmosphère de l'effet de serre, avec un changement
de 30 mm dû à la chaleur. La fonte des inlandsis polaires
à la limite supérieure des évaluations du GIEC pourrait
combler le vide, mais de sévères limites sont imposées
par les perturbations observées de la rotation de la Terre.
(Munk 2002)

En 2001, le Troisième Rapport d'Évaluation (TRE) du
GIEC, conserve pour l'attribution des changements du ni-
veau de la mer un grand vide inexplicé entre les estima-
tions directes et les estimations indirectes de l'élévation
globale du niveau marin. La plupart des évaluations di-
rectes (marégraphes), donnaient 1,5-2,0 mm/an, tandis
que les évaluations indirectes fondées sur les deux pro-
cessus responsables de l'élévation du niveau de la mer,
en l'occurrence le changement de volume et de masse,
étaient très significativement en dessous de cet intervalle.
Des évaluations de l'augmentation du volume due au ré-
chauffement de l'océan donnaient une vitesse d'environ
0,5 mm/an et la vitesse due à l'augmentation de la masse,
provenant principalement de la fonte de la glace conti-
nentale, était encore plus petite. Une étude a confirmé
que les données des marégraphes étaient correctes, et a
conclu qu'il devait y avoir une source continentale d'eau
douce de 1,4 mm/an. (Miller 2004)

Selon Douglas (2002) : « Dans les douze dernières années, les valeurs publiées de l'élévation du niveau global de la mer du XX^e siècle étaient entre 1,0 et 2,4 mm/an. Dans son TRE, le GIEC examine longuement cette absence de consensus et prend soin de ne pas présenter de meilleure estimation de l'élévation du niveau global de la mer du XX^e siècle. Le panel présente à dessein un instantané des analyses publiées pendant la décennie précédente, et interprète le large intervalle des évaluations comme reflétant l'incertitude de nos connaissances sur l'élévation du niveau global de la mer. Nous ne sommes pas d'accord avec l'interprétation du GIEC. Selon nous, les valeurs qui sont très en deçà des 2 mm/an ne cadrent pas avec les observations régionales de l'élévation du niveau de la mer ni avec la réponse physique continue de la Terre depuis le plus récent épisode de déglaciation. »

Le *El Niño* puissant de 1997-1998 a causé des variations régionales et globales du niveau de la mer, dont une augmentation temporaire globale de peut-être 20 mm. L'examen du TRE du GIEC concernant les tendances données par les satellites est le suivant : « l'oscillation méridionale du puissant *El Niño* de 1997/98 pourrait biaiser les évaluations ci-dessus de l'élévation du niveau de la mer et aussi indiquer la difficulté de séparer les tendances à long terme de la variabilité climatique^[3] ».

Depuis la publication du troisième rapport du GIEC, des études de plus en plus nombreuses tendent à réviser à la hausse les prévisions, avec la prise en compte de nouveaux paramètres tels que :

- la dynamique d'écoulements de glacier au Groenland en accélérant la fonte ;
- le dégagement de méthane du permafrost de Sibérie ;
- la diminution de la fixation du carbone par les organismes marins ;
- la perte de carbone contenu dans les sols du fait de la déforestation et de l'épuisement des sols cultivés ;
- l'exploitation des schistes bitumineux et la non réduction de la consommation de charbon.

Des prévisions de 150 cm à 10 m d'élévation du niveau des mers pour la fin du XXI^e siècle sont avancés d'une façon non officielle par des organismes indépendants^[47].

Conséquences : une telle élévation causerait le déplacement de 600 millions à 2 milliards de personnes, avec un coût économique de dizaines de milliers de milliards de dollars.

4 Mesures d'adaptation

Certains pays (Allemagne, Belgique, Danemark, Pays-Bas, Royaume-Uni) ont produit des plans préparant le pays à limiter les risques et/ou à s'y adapter.

L'Union européenne a produit une directive^[48] sur les inondations, incluant la préparation à l'aléa submersion marine (« inondations par la mer des zones côtières »).

5 Contribution des glaciers

Il est bien connu que les glaciers sont sujets à des surtensions dans leur vitesse de mouvement, avec des fontes conséquentes quand ils atteignent les altitudes plus basses et/ou la mer. Les contributeurs à Ann. Glac. 36 (2003) ont énormément discuté au sujet de ce phénomène et il apparaît que cette avance lente et ce recul rapide persistent depuis le milieu de l'*Holocène* chez presque tous les glaciers de l'Alaska. Des rapports historiques d'apparition de surtensions dans les glaciers d'Islande remontent à plusieurs siècles. Par conséquent, le recul rapide peut avoir d'autres causes que l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère.

Les résultats de Dyurgerov montrent une nette augmentation de la contribution des montagnes et des glaciers subpolaires à l'élévation du niveau de la mer depuis 1996 (0,5 mm/an) jusqu'en 1998 (2 mm/an) avec une moyenne d'environ 0,35 mm/an depuis 1960^[49].

Un article également intéressant est celui de Arendt et al^[50] qui estime la contribution des glaciers d'Alaska à $0,14 \pm 0,04$ mm/an entre le milieu des années 1950 et le milieu des années 1990 avec une augmentation de 0,27 mm/an dans le milieu et la fin des années 1990. Récemment Berthier et al^[51] ont estimé à $0,12 \pm 0,02$ mm/an la contribution des glaciers à l'élévation du niveau de la mer entre 1962 et 2006.

6 Contribution du Groenland

Krabill *et al.*^[52] estiment la contribution totale du Groenland à au moins 0,13 mm/an dans les années 1990. Joughin *et al.*^[53] ont mesuré un doublement de la vitesse de Jakobshavn Isbræ entre 1997 et 2003. Il s'agit du plus grand glacier d'exutoire du Groenland ; il draine à lui seul 6,5 % de l'inlandsis, et on pense qu'il est responsable de l'augmentation de la vitesse d'élévation du niveau de la mer de 0,06 mm/an, ou, *grosso modo*, de 4 % de l'augmentation de cette vitesse pendant le XX^e siècle^[54]. En 2004, Rignot *et al.*^[55] estimaient la contribution du sud-ouest du Groenland à $0,04 \pm 0,01$ mm/an.

Rignot et Kanagaratnam^[56] ont produit une étude complète et une carte des glaciers d'exutoire et des bassins du Groenland. Ils ont trouvé une accélération glaciaire considérable en dessous de 66 ° N en 1996 qui s'est propagée jusqu'à 70 ° N en 2005 ; et que la vitesse de pertes de l'inlandsis pendant cette décennie a augmenté de 90 à 200 km³/an ; cela correspond à une élévation du niveau de la mer de 0,25 à 0,55 mm/an supplémentaires.

En juillet 2005, il a été rapporté que le glacier Kangerdlugssuaq, sur la côte est du Groenland, se déplaçait vers la mer trois fois plus rapidement que dans la décennie précédente. Kangerdlugssuaq a environ 1 000 m d'épaisseur, 7,2 km de large, et draine environ 4 % de l'inlandsis du Groenland. Des mesures de Kangerdlugssuaq en 1988 et en 1996 l'ont montré se déplaçant à une vitesse entre 5 et 6 km/an. En 2005 il bougeait à 14 km/an.

D'après l'Évaluation de l'Impact du Climat de l'Arctique de 2004, les modèles climatiques prévoient que le réchauffement local au Groenland excédera 3 degrés Celsius pendant ce siècle. De même, les modèles d'inlandsis prévoient qu'un tel réchauffement amorcera le dégel à long terme de l'inlandsis, conduisant au dégel complet de l'inlandsis du Groenland sur plusieurs millénaires, d'où en résultera une élévation du niveau de la mer d'environ sept mètres^[57].

En 2007 et 2008, l'accélération de la fonte des glaciers du Groenland s'est confirmée. Ce phénomène s'explique par les écoulements d'eau de fonte superficielle vers la base des glaciers. La couche d'eau infiltrée agissant comme lubrifiant, provoque l'accélération du déplacement du glacier. Des vitesses de 18 km/an ont été notées en 2008.

D'autre part le Groenland central est sur une assise située en dessous du niveau océanique et par conséquent les eaux océaniques sont susceptibles de provoquer la fonte de l'inlandsis par sa base et d'aggraver le phénomène de lubrification et la déstabilisation des glaciers, voir leur fragmentation en iceberg.

Ce phénomène d'accélération, non pris en compte dans les études du GIEC de 2004, laisse craindre que la fonte des glaces du Groenland sera plus brutale que prévu avec comme conséquence un risque de montée du niveau des océans de plusieurs mètres d'ici la fin du XXI^e siècle.

7 Effets de la limite des neiges éternelles et du pergélisol

La limite des neiges éternelles est l'altitude la plus basse pour laquelle la couche de neige minimum dans l'année couvre plus de 50 % de surface. Cela varie d'environ 5 500 mètres au-dessus du niveau de la mer à l'équateur jusqu'au niveau même de la mer à 65 degrés de Latitude Nord ou Sud (selon les effets de l'amélioration régionale de la température). Le pergélisol apparaît alors au niveau de la mer et s'étend plus profondément sous la mer en direction du pôle. L'épaisseur du pergélisol et la hauteur des banquises du Groenland, comme de l'Antarctique, signifient qu'ils sont largement invulnérables à une fonte rapide. Le Groenland culmine à 3 200 mètres, la température moyenne annuelle y est de moins 32 °C. Donc, même une augmentation projetée de 4 °C le laisse bien en dessous du point de fusion de la glace. Le numéro 28 de décembre 2004 de la revue *Frozen Ground* contient un

plan très significatif des zones affectées du pergélisol de l'Arctique. La zone continue du pergélisol inclut tout le Groenland, le nord du Labrador, les Territoires du Nord-Ouest, le nord de Fairbanks en Alaska, et la plus grande partie du nord est de la Sibérie au nord de la Mongolie et du Kamtchatka. La glace continentale au-dessus du pergélisol a peu de chances de fondre rapidement. Comme la plus grande partie des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique s'étend au-dessus de la limite des neiges éternelles et/ou à la base de la zone du pergélisol, elles ne peuvent pas fondre en un temps beaucoup plus court que plusieurs millénaires ; donc il est peu probable qu'elles contribuent significativement à l'élévation du niveau de la mer dans le siècle qui vient.

7.1 Glace polaire

Le niveau de la mer pourrait augmenter si davantage de glace polaire fondait. Cependant, en comparaison avec les hauteurs des âges glaciaires, il y a aujourd'hui très peu d'inlandsis continentaux qui reste à fondre. On estime que si toute l'Antarctique fondait, cela contribuerait à plus de 60 mètres d'élévation du niveau de la mer, et si c'était le Groenland, cela ferait plus de 7 mètres. Les petits glaciers et les calottes glaciaires pourraient contribuer à environ 0,5 mètres. Bien que ce dernier chiffre soit beaucoup plus petit que pour l'Antarctique ou le Groenland, ce dégel pourrait arriver relativement vite (pendant le siècle qui vient), tandis que la fonte du Groenland serait lente (peut-être 1500 ans, s'il dégelait complètement à la vitesse la plus rapide) et la fonte de l'Antarctique encore plus lente^[17]. Cela ne présage pas de la possibilité que des inlandsis plus larges se mettent à bouger encore plus rapidement puisque de l'eau coule en dessous et les lubrifie^[58].

En 2002, Rignot et Thomas^[59] ont trouvé que les inlandsis de l'Antarctique Ouest et du Groenland perdaient de la masse, alors que l'inlandsis de l'Antarctique Est était probablement en équilibre (bien que, pour ce qui est de l'inlandsis de l'Antarctique Est, ils ne soient pas capables de déterminer si le bilan de masse était positif ou négatif). Kwok et Comiso^[60] ont découvert aussi que les anomalies de température et de pression autour de l'Antarctique Ouest et de l'autre côté de la Péninsule de l'Antarctique étaient corrélés avec le El Niño récent.

En 2004, Rignot et al^[55] estimaient une contribution de 0,04±0,01 mm/an à l'élévation du niveau de la mer provenant du Sud Est du Groenland. Dans la même année, Thomas *et al.*^[61] trouvèrent une preuve d'une contribution accélérée à l'élévation du niveau de la mer provenant de l'Antarctique Ouest. Les données montraient que l'inlandsis de l'Antarctique Ouest du secteur de la mer d'Amundsen perdait 250 kilomètres cubes de glace chaque année, qui avait 60 % de plus que d'accumulation de précipitations dans les zones de captage. Cela seulement était suffisant pour élever le niveau de la mer de 0,24 mm/an. De plus, les vitesses de dilution des glaciers

étudiés en 2002 et 2003 avaient dépassé les valeurs mesurées au début des années 1990. Le soubassement des glaciers se trouvait plusieurs centaines de mètres plus en profondeur que ce qu'on avait connu avant, indiquant des routes d'évacuation de la glace venant de plus loin dans les terres du bassin subpolaire de Byrd. Ainsi l'inlandsis de l'Antarctique occidental pouvait ne pas être aussi stable qu'on l'avait supposé.

En 2005, on a signalé que, entre 1992 et 2003, l'Antarctique oriental s'était épaissi à une vitesse moyenne de 18 mm/an, tandis que l'Antarctique occidental montrait un amincissement global de 9 mm/an, associé avec des précipitations accrues. Un gain de cette grandeur est suffisant pour ralentir l'élévation du niveau de la mer de $0,12 \pm 0,02$ mm/an^[62].

8 Mesures, observation de l'évolution du niveau marin

Ces mesures doivent être mondiales et coordonnées car l'élévation des mer n'est pas géographiquement homogène, elle interagit avec d'autres évolutions (géotectoniques) et le réseau des marégraphes ne couvre qu'une petite partie de la planète.

Ces mesures et diverses modélisations visent à répondre au projet mondial de suivi lancé par l'UNESCO (*Global Sea Level Observing System* ou « GLOSS ») ainsi qu'à des enjeux de sécurité publique (prévention des risques) et de planification de l'aménagement du territoire et des littoraux en particulier dans les zones les plus exposées aux risques de submersion marine, aux ondes de tempête et aux tsunamis (en Europe principalement via le *Centre Régional d'Alerte aux Tsunamis pour l'Atlantique Nord-Est et la Méditerranée* ou CRATANEM coordonné par le Commissariat à l'énergie atomique, ou CEA/DASE)^[63].

En 2015, des océanographes américains (Carling Hay & al.) publient dans la revue *Nature* un article laissant penser que la hausse du niveau marin pourrait être plus rapide que celle annoncée par le dernier rapport du GIEC. Selon eux, si l'on se base sur les mesures satellitales (plus globales et plus précises) et sur une analyse statistique des données de 622 marégraphes en s'appuyant sur la méthode du *Filtre de Kalman* (méthode estimant les états d'un système dynamique à partir de série de mesures incomplètes ou bruitées) ; vers 2100, le niveau marin n'aura pas augmenté de 40 à 60 cm, mais plutôt de un mètre^[64]. Il a augmenté de $3,0 \pm 7$ mm/an pour la période 1993-2010, soit une hausse plus rapide qu'annoncé par les modèles précédents, mais qui est conforme aux mesures globales du réseau des marégraphes (excepté pour certains cas, notamment celui de Champlain au Canada (où des mesures atypiques peuvent être expliquées par l'artificialisation du régime du fleuve Saint-Laurent^[65] sur les berges duquel est situé ce marégraphe) et de Vaasa et quelques autres sites du Golfe de Finlande où les ma-

régraphes montrent une diminution du niveau marin dans la partie nord du golfe mais de moins en moins perceptible en descendant vers le sud, ce qui pourrait traduire un changement dans les bilans hydrographiques de la mer Baltique^[66]. En outre, cette zone présente aussi des anomalies et particularités géotectoniques^{[67],[68]}.

En Europe, un réseau s'organise peu à peu dans les années 2000^[69].

En France, les données historiques sont éparées, d'abord rassemblées par des astronomes tels que Philippe de La Hire et Jean Picard (qui installent le marégraphe (*échelles de marée*) du Port de Brest en 1679, le premier de France. Puis l'administration et des savants parisiens font installer d'autres *échelles de marée*, relevés par des observateurs locaux à la demande de savants de l'Académie royale des sciences. Le protocole de mesure n'est pas exactement le même selon les observateurs^[70]. Des « marégraphes analogiques » fonctionnant suivant un même protocole sont ensuite installés et utilisés (de 1840 à 1940 environ, partiellement automatisé par l'ingénieur L'Ingénieur hydrographe Chazallon, pour le compte d'un nouveau *Service des marées* créé après 1850). Chazallon utilise les premiers *marégraphes à flotteurs* pour mieux analyser et prédire les variations de marée (le premier « annuaire de marée » est publié en 1839). Le ministère des Travaux publics développe aussi de son côté un réseau de marégraphes, pour ses propres besoins (*Ponts et Chaussées* et *Nivellement Général de France* qui ont besoin de ces données pour la gestion des écluses et de certaines voies navigables, pour quantifier et gérer les crues, pour les installations et travaux portuaires ou les constructions d'ouvrages côtiers, et enfin pour connaître le niveau moyen de la mer qui est la base de définition de l'altitude de référence en France).

Viennent ensuite (plus récemment) les réseaux de marégraphes numériques automatiques (qui peuvent néanmoins aussi parfois être affectés par des pannes).

À la suite du livre bleu *Stratégie nationale pour la mer et les océans* de 2009^[71], une instruction interministérielle signée du 1^{er} ministre le 20 avril 2010, rappelle les enjeux de connaissance du niveau marin et de ses évolutions et cadre les modalités d'acquisition, de qualification (marégraphie), de transmission, de gestion, d'archivage et de diffusion des données résultant des observations *in situ* effectuées par divers acteurs (hors moyens de télédétection aérienne ou satellitaire). Elle identifie le SHOM comme « référent national pour le « niveau de la mer »^[72], notamment chargé de coordonner le travail d'observation^[73], qui est maintenant disponibles pour ce qui concerne les réseaux de référence des observations marégraphiques (REFMAR). Aux XIX^e et XX^e siècles, les ports français équipés ou ayant été équipés sont :

- le Port de Dunkerque (1865 – 1899) ;
- le Port de Calais (1891 – 1899) ;
- le Port de Boulogne-sur-Mer (1876) ;

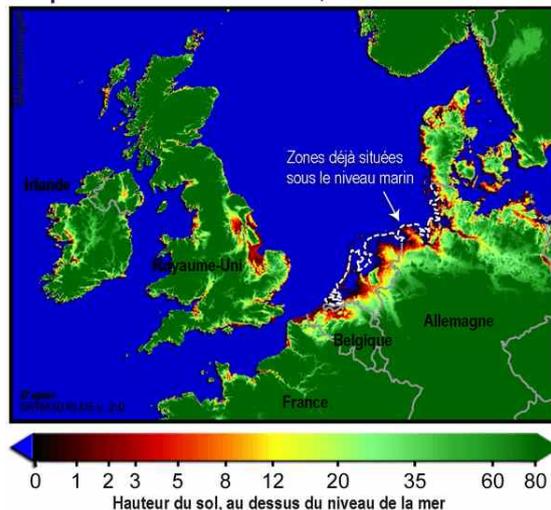
- le Port du Havre (1850 – 1934 ou plus tard) ;
- le Port de Cherbourg (1846 – 1920) ;
- le Port de Saint-Malo (Saint-Servan) (1850 – 1917) ;
- le Port de Heaux de Brehat 1889 –1896) ;
- le Port de Brest (1846 -) ;
- le Port de Saint-Nazaire (1863 – 1934 ou plus tard) ;
- le Port de Rochefort 1860 – 1918) ;
- le Port de Fort Énet 1859 – 1973) ;
- le Port de Fort-Boyard 1873 - 1909) ;
- le Port de La Rochelle (1863 – 1874) ;
- le Port de Cordouan 1905 – 1934 ou plus tard) ;
- le Port d'Arcachon (1877 – ?) ;
- le Port du Boucau 1899 – 1934 ou plus tard) ;
- le Port de Saint-Jean-de-Luz (Socoa) (1875 – 1920) ;
- le Port de Sète (1857 – ?) ;
- le Port de Marseille (1885) ;
- le Port de Toulon (1844 – 1861) ;
- le Port de Nice

En 2010, le Réseau d'Observatoires du Niveau des Mers (RONIM) comptait 32 marégraphes^[74]. Il existe aussi le *réseau d'Observation Subantarctique et Antarctique du niveau de la MER*^[75], dont les données sont traitées par le *Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales* (LEGOS).

9 Effets et enjeux de l'élévation du niveau de la mer

Sur la base des projections rappelées ci-dessus, le rapport TRE du GIEC (*IPCC TAR*) WG II note qu'on peut s'attendre à ce que le changement actuel et futur du climat ait divers impacts sur les systèmes côtiers^[76] ; incluant une érosion côtière accélérée, une exacerbation de l'occurrence et de l'ampleur des inondations, des invasions marines dues aux tempêtes, l'inhibition de processus de production élémentaires, des changements dans les caractéristiques et dans la qualité de l'eau de surface et des eaux souterraines (salinisation), davantage de pertes de propriétés et d'habitats littoraux, des pertes de ressources et de valeurs culturelles et sociales, déclin de la qualité du sol et de l'eau, pertes économiques (agriculture, aquaculture, tourisme, loisirs) et liées et les services de transports (les littoraux sont souvent bordés

Risque de submersion marine, Manche / Mer du Nord



Zones à risques de submersion, pour l'Europe

d'infrastructures importantes ou vitales pour les transports nationaux). Des pertes potentielles de vie font partie des impacts cités par le GIEC.

Les modèles projettent des différences régionales et locales importantes dans les changements relatifs du niveau marin. Les impacts varieront aussi selon les capacités de résilience écologique des écosystèmes et donc selon les zones biogéographiques et leur état de santé (Alors que l'objectif de bon état écologique et physico-chimique des masses d'eau, poursuivi par la directive cadre européenne sur l'eau semble ne pas pouvoir être partout atteint en 2015 comme prévu (au rythme des progrès actuels). Des changements floristiques, fauniques, trophiques et de biomasse sont déjà observés, mais dont les causes sont difficiles à démêler (le réchauffement ou des perturbations induites par la surpêche sont probablement aussi en cause). La biodiversité et biomasse de la zone intertidale moyenne et basse (là où elle est la plus riche) pourraient être affectées si l'eau monte trop rapidement^[77].

9.1 Les cas des littoraux

Ils sont plus ou moins exposés, selon leur altitude ou leur degré de poldérisation, mais aussi selon la nature des substrats, leur orientation, le climat local, leur position dans un détroit, etc. Les données statistiques prospectives sur les impacts sur l'Homme de l'élévation des mers sont rares, mais certaines données paléoclimatiques et sur les paléopaysages peuvent renseigner sur la manière dont ils ont été affectés lors des avancées marines précédentes.

Une étude^[78] rappelait en 2007 que 634 millions de personnes vivent près des côtes et à moins de 10 mètres au-dessus du niveau marin. Et deux tiers des villes de plus de cinq millions d'habitants sont situées dans des secteurs côtiers de basses terres. Ce sont dans de nombreux pays les littoraux qui s'urbanisent le plus vite

et qui sont le plus touchés par la périurbanisation, dont en France, selon l'Observatoire du littoral de l'Institut français de l'environnement.

Une grande partie des usines chimiques, des raffineries, des grands ports stratégiques, des centrales électriques, notamment nucléaires les plus puissantes y sont construites. Ce sont aussi sur des atolls vulnérables à la submersion qu'on a fait de nombreux essais nucléaires (Moruroa, îles Marshall, dont l'atoll d'Eniwetok...)

Un enjeu important de protection de la nature existe aussi, car ce sont sur les littoraux qu'ont subsisté de nombreux milieux naturels précieux et menacés (par exemple coûteusement achetés par le Conservatoire du littoral en France) ; Ils abritent une partie importante des réserves naturelles et de la biodiversité mondiale. De nombreux récifs et mangroves risquent de ne pas pouvoir croître assez vite pour s'adapter à une montée de l'eau, surtout si celle-ci devient plus turbide et polluée en raison d'une augmentation de l'érosion, ce qui semble être déjà le cas^[79]. Toutes ces ressources sont menacées par la montée des océans.

Dans le monde, de nombreuses régions littorales ont commencé à consolider ou rehausser leurs digues, à redimensionner leurs systèmes d'écluses ou de protection, sans néanmoins qu'il y ait de consensus sur la hauteur du risque à envisager ou sur les dates butoirs.

Ce n'est pas la hauteur moyenne, mais les maxima qu'il faut prendre en compte, ce qui nécessite d'intégrer les combinaisons possibles de facteurs d'exacerbation que sont les tempêtes, les dépressions et les crues, voire le risque de tsunami. La Flandre belge a par exemple décidé de maintenant prendre en compte le risque de surcote lié à une tempête « millénaire » dans son plan de protection des côtes mis en place par l'État et les dix communes côtières concernées. En effet, sans confortement des digues et du cordon dunaire sur au moins 1/3 du littoral belge, selon les modélisations, presque toute la côte et les villes des zones arrière dunaïres et de polders seraient inondées, jusqu'à Bruges^[80].

9.2 Le cas des îles

Le GIEC a suggéré que les deltas et les petits États insulaires pourraient être particulièrement vulnérables à la montée des mers. Des phénomènes de *compensation isostatique* pourraient toucher la Baltique et certaines îles. L'*élévation relative* du niveau marin pourra être exacerbée par des affaissements ou pertes substantielles de terres dans certains deltas^[81]. À ce jour, les changements de niveau marin n'ont pas encore causé de graves pertes environnementales, humanitaires, ou économiques dans les petits États insulaires. L'enfoncement d'une partie des terres des nations insulaires des Tuvalu avait d'abord été attribué à la seule montée de la mer, mais des articles ont ensuite suggéré que des pertes importantes de terre résultaient de l'érosion induite par les cyclones Gavin, Hina, et Keli de 1997^{[82],[83]}. Les îles en question n'étaient

pas peuplées. Reuters cite d'autres îles Pacifiques qui font face à un risque grave, dont l'île de Tegua dans Vanuatu. L'Agence affirme que les données de Vanuatu ne montrent aucune élévation nette du niveau de la mer, et ne sont pas corroborées par des données de mesure de marée. Les données de mesure de marée de Vanuatu^[84] montrent une élévation nette d'environ 50 millimètres de 1994 à 2004. La régression linéaire de cet enchaînement à court terme suggère une vitesse d'élévation d'environ 7 mm/an, bien qu'il y ait une variabilité considérable et qu'il soit difficile d'évaluer la menace exacte qui pèse sur les îles en utilisant un enchaînement à si court terme. Selon Patrick J. Michaels, sceptique sur le réchauffement climatique : « en fait, les secteurs tels que les îles Tuvalu montrent des déclin substantiels du niveau de la mer pendant cette période^[85] ».

Pour éviter un afflux supplémentaire de réfugiés climatiques, diverses options ont été proposées pour aider les nations insulaires à s'adapter à l'élévation du niveau marin et à des tempêtes plus fréquentes ou plus graves^[86].

9.3 Le cas des polders

Les zones de polders comptent parmi les plus vulnérables. Dans certains cas (Pays-Bas), des polders sont rendus à la mer ou vont l'être. En cas de recul des nappes d'eau douce, l'avancée d'un « biseau salé » sous une digue ou un cordon dunaire est possible. Les régions de polders et de marais sont particulièrement exposés par leur altitude très voisine du niveau moyen de la mer. Si l'augmentation de la profondeur à l'extérieur des digues n'est pas compensée par une sédimentation équivalente, elle provoque une diminution de la réfraction des vagues, d'où une énergie plus grande libérée sur le littoral et une vulnérabilité accrue des ouvrages de défense contre la mer. Par ailleurs, la plus grande profondeur peut entraîner une modification de direction des courants, ce qui soumet le tapis végétal à une plus longue durée de submersion et à une salinité plus élevée, causant son appauvrissement^[87]. En plein essor depuis les années 1980, de nouvelles formes de gestion du littoral axées sur la dépoldérisation développent une politique défensive face à la mer. Ce mouvement consiste à rendre à la mer les étendues de terre qui avaient été gagnées sur l'eau. La dépoldérisation permet de se défendre contre la mer sans dommages environnementaux. Elle participe même à reconstituer des milieux naturels. Dépoldériser entraîne une modification du milieu par resalinisation de celui-ci et permet la reconstitution d'un écosystème maritime composé de slikke et de schorre. Sa végétation halophile dense et épaisse est un frein pour la pénétration de la mer puisqu'elle contribue à l'accumulation des sédiments^[88].

Les aménagements humains pour protéger l'habitat de la mer impactent les prix et le consentement à payer ; ainsi les prix des loyers semblent évoluer selon le niveau de sécurité ressentie lié à la présence de digues^[89].

10 Mesures du niveau de la mer par satellite

Les évaluations d'élévation du niveau de la mer par altimétrie de satellite donnent 3,1 +/- 0,4 mm/an pour la période 1993-2003 (Leuliette et autres, 2004). Cela est supérieur à celles obtenues par les marégraphes. Il est peu clair de savoir si cela représente une augmentation pendant les dernières décennies : variabilité, réelles différences entre les satellites et marégraphes, ou problèmes de calibrage des satellites^[3].

Depuis 1992, les programmes satellite TOPEX/Poseidon (T/P) et Jason-1 de la NASA et du CNES, fournissent des mesures du changement du niveau de la mer. Les données actuelles sont disponibles en ligne^[90]. Ces données montrent une augmentation moyenne du niveau de la mer de 2,8±0,4 mm/an. Cela inclut une augmentation apparente de 3,7±0,2 mm/an pendant la période de 1999 à 2004^[91]. Les satellites ERS-1 (17 juillet 1991-10 mars 2000)^[92], ERS-2 (21 avril 1995-)^[93], et Envisat (1^{er} mars 2002-) ont aussi des composants de calcul de surface de la mer mais d'usage limité pour la mesure du niveau global de la mer dû à une couverture moins détaillée.

- TOPEX/Poseidon ont commencé leurs séries de mesures en 1992, et la mission scientifique a été finie en octobre 2005.
- Jason-1, lancé le 7 décembre 2001, a maintenant repris sa mission, et suit la même trace au sol.

Puisque de la variabilité significative à court terme du niveau de la mer peut se produire, extraire l'information moyenne globale de niveau de la mer est complexe. En outre, les données satellites ont une capacité d'enregistrement beaucoup plus courte que les marégraphes, qui se sont avérées réclamer des années d'opérations pour extraire des tendances.

Il y a là une gamme de distances qui s'appliquent :

- de 140 à 320 mm : Augmentation du niveau de la mer dans la région du Pacifique de El Niño pendant la période 1997-1998^[94].
- 140 mm : Intervalle de variations typiques du niveau de la mer (±70 mm)^[95].
- 100 mm : Précision de l'altimètre radar ERS-1 radar^[96].
- 43 mm : Précision des calculs de la hauteur de surface de l'océan avec T/P^[97].
- de 30 à 40 mm : Précision de l'altimètre radar de TOPEX et POSEIDON-1 qui mesure la distance à la surface de l'océan.

- de 20 à 30 mm : Précision de la détermination de la hauteur de l'orbite du satellite T/P (amplitude de laser, effet doppler, GPS).
- 20 mm : Précision de l'altimètre radar de Jason-1 POSEIDON-2^[98].
- de 7 à 14 mm : Montée subite moyenne globale du niveau de la mer pendant la période 1997-1998 d'EL Niño^[99].
- Quelques mm : Précision de la mesure moyenne globale du niveau de la mer après avoir fait la moyenne de la couverture sur dix jours^[100].
- 10 mm : Stabilité des hauteurs orbitales de T/P sur 4 ans^[101].
- 2,8 ±0,4 mm : Élévation globale annuelle moyenne du niveau de la mer depuis 1992 selon T/P.

Il y a apparemment un problème avec l'altimètre ERS-2. Des changements moyens de niveau de la mer ont été comparés entre les satellites, entre 60 °N et 60 °S, de mai 1995 à juin 1996^[102] :

- -4,7 ±1,5 mm/an pour ERS-1
- -5,6 ±1,3 mm/an pour TOPEX
- +9,0 ±2,1 mm/an pour ERS-2

Des comparaisons continues d'altimétrie sont disponibles sur « <http://www7300.nrlssc.navy.mil/altimetry/intercomp.html> » (Archive • Wikiwix • Archive.is • Google • Que faire ?), consulté le 2013-04-01

Les diverses lectures sont des variations courantes du niveau de la mer, pas du niveau global, et donc la comparaison s'applique seulement sur les différences entre les valeurs. Ces données sont centimétriques ; une transformation ultérieure est faite pour atteindre une résolution d'1 millimètre, résolution nécessaire pour les études moyennes du niveau marin.

Les comparaisons de T/P avec des données des marégraphes des îles du Pacifique prouvent que les déviations moyennes mensuelles ont une précision 20 mm^[103].

Les résultats satellites étant partiellement calibrés sur les résultats des marégraphes, ce ne sont pas des sources entièrement indépendantes^[104].

Le fort El Niño de 1997-1998 « a imprimé une signature forte sur la hauteur de surface de la mer à mi-latitude du Pacifique oriental. Ce signal sera suivi à l'ouest pendant la décennie suivante comme manifestation orientale de la frontière des propagations de cet événement en direction de l'extension du Courant de Kuroshio^[105]. »

Autres satellites :

- **Geosat Follow-On** est une mission d'altimétrie de la marine américaine qui a été lancée le 10 février 1998. Le 29 novembre 2000, la marine a validé le satellite comme opérationnel. Pendant sa mission, le satellite sera maintenu dans l'orbite de la Mission Exacte de Répétition de GEOSAT (MER) (800 km d'altitude, 108 degrés d'inclinaison, 0,001 d'excentricité, et période de 100 minutes). Cette Orbite Exacte de Répétition de 17 jours (OER) suit la trace au sol de MER ± 1 km. Comme pour le GEOSAT original MER, les données seront disponibles pour la science océanique par NOAA/NOS et NOAA/NESDIS. Altimètre de radar - à fréquence unique (13,5 gigahertz) avec 35 mm de précision sur la hauteur. Le récepteur du GPS n'est pas fonctionnel.

- Geosat Follow-On @ NOAA/LSA^[106]
- NAVY GEOSAT FOLLOW-ON (GFO) ALTIMETRY MISSION^[107]
- NASA WFF Geosat Follow-On^[108]

Autres analyses du niveau de la mer :

- Analyse du Niveau de la Mer à partir de l'altimétrie de ERS^[109]
- Produits altimétriques de la multimission Ssalto/Duacs^[110] : Données courantes combinées de Topex/Poseidon, Geosat Follow On, Jason-1 et Envisat..

11 Conséquences sociales : migrations et conflits

Les conséquences de l'élévation du niveau de la mer sont nombreuses sur différents plans (social, environnemental, économique, etc.). Sur le plan social, les impacts peuvent varier de pays à pays.

Les populations exposées à un niveau de la mer élevé qui submerge les côtes habitées sont obligées de migrer pour échapper à leur position vulnérable. Au Bangladesh, deux types de migrations peuvent être mises en évidence : premièrement, la migration interne qui pousse les habitants ruraux à se déplacer vers la région urbaine et deuxièmement, la migration internationale qui a surtout lieu vers l'Inde^[111]. The State of Environmental Migration 2011 a publié un tableau concernant la présence des migrants bangladais dans différents états indiens^[112] :

Au Nigéria, la migration de la population se limite au déplacement interne, population composée de personnes déplacées à l'intérieur de leur propre pays qui ont été forcées à fuir leur lieu de résidence habituel, notamment en raison de catastrophes naturelles, et qui n'ont pas franchi les frontières internationalement reconnues

d'un État^[113]. Mais le changement climatique est vécu de manière très différente selon les régions et les catégories sociales concernées, car la vulnérabilité à l'égard de l'environnement est le résultat des facteurs socio-économiques et géographiques spécifiques qui façonnent chaque société^[114]. C'est ainsi que certains pays, pourtant très exposés à l'élévation de la mer, parviennent à développer des programmes et infrastructures de défense efficace face à la menace des eaux. Se situant dans la partie du monde où les ressources financières sont les plus élevées, les Pays-Bas ont développé depuis la fin du XX^e siècle différentes techniques de protection devant cet enjeu climatique majeur. Aujourd'hui, la population néerlandaise n'est plus en permanence directement menacée par les inondations susceptibles de provoquer des migrations.

Le phénomène des migrations climatiques est susceptible de causer des conflits dans les régions déjà sensibles de la planète. Ainsi, au Bangladesh, des conflits externes ont explosé à cause de la migration élevée vers l'Inde qui aggrave la concurrence pour l'accaparement de ressources déjà rares. Cette concurrence entraîne le déclenchement de tensions ethniques à la frontière et à l'intérieur des terres^[115].

12 Notes et références

- (en) Cet article est partiellement ou en totalité issu de l'article de Wikipédia en anglais intitulé « *Sea level rise* » (voir la liste des auteurs).

- [1] selon les mesures faites par les satellites TOPEX/Poseidon, Jason-1 et Jason-2. les variations saisonnières ont été lissées pour rendre la courbe plus claire. Elle révèle ou confirme une montée constante de la mer, à raison de $3,3 \pm 0,4$ mm/an sur ces près de 20 ans. Graphique préparé par Neil White du CSIRO.
- [2] (en) IPCC, *Climate Change 2001*, chap. 11 : *Changes in Sea Level* [détail des éditions], partie 11.3.2.2 « Long-term mean sea level accelerations » [lire en ligne]
- [3] (en) IPCC, *Climate Change 2001*, chap. 11 : *Changes in Sea Level* [détail des éditions], partie 11.3.2.3 « Mean sea level change from satellite altimeter observations » [lire en ligne]
- [4] Le Monde.fr ; Reuters ; Fil d'infos 2012-11-29 ; Climat / changements climatiques / Effet de serre
- [5] Niveau de la mer, neige, rapport du GIEC de 2007 repris par Météo-France
- [6] (en) *NASA Science Zeros in on Ocean Rise : How Much ? How Soon ?* : at least 3 feet of sea level rise NASA, 26 août 2015 15-174
- [7] « variations » (Archive • Wikiwix • Archive.is • Google • Que faire ?), consulté le 2013-04-01, sur le site cnrs.fr

- [8] Cédric Brunel (2012), Tempêtes et élévation marine, L'Harmattan, janv 2013 ; ISBN 978-2-296-51365-5
- [9] Définition retenue par la cour des comptes dans un rapport de Didier Migaud et Jean-Marie Bertrand, intitulé Les enseignements des inondations de 2010 sur le littoral atlantique (Xynthia) et dans le Var, Rapport de la Cour des comptes sur les inondations de 2010 ; Cour des comptes, juillet 2012, PDF, ; Voir page 12/299
- [10] H. Langenberga, A. Pfizenmayera, H. von Storch, J. Sündermannb ; *Storm-related sea level variations along the North Sea coast : natural variability and anthropogenic change* ; Continental Shelf Research Volume 19, Issue 6, May 1999, Pages 821-842 doi:10.1016/S0278-4343(98)00113-7 (Résumé)
- [11] (en) Carl Wunsch, « The Long-Period Tides », *Review of Geophysics*, vol. 5, n° 4, 1967 (lire en ligne)
- [12] (en) Cheh Pan, « Observed multiple frequencies of the Chandler wobble », *Journal of Geodynamics*, vol. 44, 2007, p. 47, p. 61
- [13] Synthèse d'une étude IRD (N. Gratiot, E. J. Anthony, A. Gardel, C. Gaucherel, C. Proisy, J. T. Wells, *Significant contribution of the 18.6 year tidal cycle to regional coastal changes*, *Nature Geoscience*, volume 1, mars 2008 Doi : 10.1038/ngeo127, Letter), ULCO (Université du littoral Côte d'Opale) à Dunkerque.
- [14] Eli Kintisch (2014) *Past measurements may have missed massive ocean warming* 05-10-2014
- [15] C.V. Murray-Wallacea, *Sea Level Studies* | Eustatic Sea-Level Changes, Glacial-Interglacial Cycles ; *Encyclopedia of Quaternary Science Pages 3024-3034* doi:10.1016/B0-44-452747-8/00140-X (Résumé)
- [16] Travaux présenté par l'institut de recherche sur les conséquences climatiques de Potsdam (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung ou PIK, créé en 1992, réunissant environ 110 chercheurs) dans le journal « Climate Dynamics », et annoncé par Communiqué de presse de l'institut, du 04/04/2005, repris par le BE ADIT n° 232 du 13/04/2005, de l'Ambassade de France a Berlin
- [17] (en) IPCC, *Climate Change 2001*, chap. 11 : *Changes in Sea Level* [détail des éditions], partie 11.2.1.2 « Models of thermal expansion » [lire en ligne]
- [18] (en) Michael Studinger, *Geological Influence on the Onset of Fast Moving Ice* [lire en ligne]
- [19] (en) IPCC, *Climate Change 2001*, chap. 11 : *Changes in Sea Level* [détail des éditions], partie 11.4 « Can 20th Century Sea Level Changes be Explained ? » [lire en ligne]
- [20] (en) Université du Colorado, *Sea level change* [lire en ligne]
- [21] Martin Ekman, *Climate changes detected through the world's longest sea level series* ; Global and Planetary Change Volume 21, Issue 4, September 1999, Pages 215-224 doi:10.1016/S0921-8181(99)00045-4 (Résumé)
- [22] (en) IPCC, *Climate Change 2001*, [détail des éditions], figure 11.4 [lire en ligne]
- [23] (en) J. A. Church et N. J. White, « A 20th century acceleration in global sea-level rise », in *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, 2006 [présentation en ligne]
- [24] (en) IPCC, *Climate Change 2001*, chap. 11 : *Changes in Sea Level* [détail des éditions], partie 11.2.6 « Tectonic Land Movements » [lire en ligne]
- [25] (en) IPCC, *Climate Change 2001*, [détail des éditions], Technical Summary [lire en ligne]
- [26] Stroeve, J., M.K. Holland, W. Meier, T. Scambos, and M. Serreze, 2007, *Arctic sea ice decline : faster than forecast*, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L09501, doi : 10.1029/2007/GL029703.
- [27] Velicogna, I., 2009 : *Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE*, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19503, doi:10.1029/2009GL040222.
- [28] AMAP, (*Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic* (SWIPA) 2011 - Executive Summary,
- [29] (en) IPCC, *Climate Change 2001*, chap. 11 : *Changes in Sea Level* [détail des éditions] [lire en ligne]
- [30] J E Hansen, *Scientific reticence and sea level rise* ; *Environ. Res. Lett.* 2 (April-June 2007) 024002 doi:10.1088/1748-9326/2/2/024002 NASA Goddard Institute for Space Studies, 2880 Broadway, New York, NY 10025, États-Unis
- [31] Rahmstorf, S., 2007 : *A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise*, *Science*, 315, 368-370.
- [32] Overpeck, J.T., B.L. Otto-Bliesner, G.H. Miller, D.R. Muhs, R.B. Alley, J.T. Kiehl, 2006 : *Paleoclimatic Evidence for future ice-sheet instability and rapid sea-level rise*, *Science*, 311, 1747-1750
- [33] James E. Hansen & Makiko Sato, *Paleoclimate Implications for Human-Made Climate Change*, NASA (Goddard Institute for Space Studies and Columbia University Earth Institute), New York, 2011
- [34] présentation de Kenneth G. Miller (CV), consulté 2012-03-22
- [35] Dowsett, H. J., and T. Cronin, 1990 : *High eustatic sea level during the middle Pliocene : Evidence from the southeastern U.S. Atlantic coastal plain*, *Geology*, 18, 435-438.
- [36] Shepherd, A., D. Wingham, E. Rignot, 2004 : *Warm ocean is eroding West Antarctic ice sheet*. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23402 (4 p.)
- [37] GIEC 2007 : « *Models used to date do not include uncertainties in climate-carbon cycle feedback nor do they the full effects of changes in ice sheets [...] . Dynamical processes related to ice flow not included in current models but suggested by recent observations, could increase the vulnerability of the ice sheets to warming, increasing future sea level rise* »

- [38] Church, J.A. et 12 coauteurs, 2010 : *Sea-level rise and variability : synthesis and outlook for the future*, in *Understanding Sea-Level Rise and Variability*, Ed. J.A. Church, P.L. Woodworth, T. Aarup, W. S. Wilson, Blackwell Publ. Ltd.
- [39] (en) IPCC, *Climate Change 2001*, chap. 11 : *Changes in Sea Level* [détail des éditions], partie 11.5.2 « Regional Sea Level Change » [lire en ligne]
- [40] (en) IPCC, *Climate Change 2001*, [détail des éditions], figure 11.13 [lire en ligne]
- [41] *Sea levels are rising at their fastest rate in 2000 years*; Science, 22-02-2016
- [42] Robert E. Kopp & al.; (2016) *Temperature-driven global sea-level variability in the Common Era* résumé PNAS, doi : 10.1073/pnas.1517056113; information compl. en ligne : <http://www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.1517056113/-/DCSupplemental>.
- [43] Matthias Mengel & al. (2016), *Future sea level rise constrained by observations and long-term commitment*; PNAS, doi:10.1073/pnas.1500515113; (résumé)
- [44] Richard Levy & al. (2016) *Antarctic ice sheet sensitivity to atmospheric CO₂ variations in the early to mid-Miocene*; Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2016 0 (2016) 1516130113v1-201516130
- [45] Edward Gasson & al. (2016) *Dynamic Antarctic ice sheet during the early to mid-Miocene*; PNAS publié en ligne 22-02-2016, doi : 10.1073/pnas.1516130113 voir aussi : <http://www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.1516130113/-/DCSupplemental>. et résumé
- [46] (en) IPCC, *Climate Change 2001*, chap. 11 : *Changes in Sea Level* [détail des éditions], partie 11.5.4 « Longer Term Changes » [lire en ligne]
- [47] « L'augmentation du niveau des océans sera plus importante que prévue », Climat CO2
- [48] Télécharger la directive 2007/60/CE du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (« considérant » n° 10, et paragraphe 1 de l'article 2)
- [49] (en) Mark Dyurgerov, *Glacier Mass Balance and Regime : Data of Measurements and Analysis*, INSTAAR Occasional Paper n° 55, éd. M. Meier and R. Armstrong, Boulder, CO : Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, 2002. [présentation en ligne]
- [50] (en) Arendt, « Rapid Wastage of Alaska Glaciers and Their Contribution to Rising Sea Level », *Science*, vol. 297, juillet 2002, p. 382 (lire en ligne)
- [51] (en) Berthier, « Contribution of Alaskan glaciers to sea-level rise derived from satellite imagery », *Nature Geoscience*, vol. 3, janvier 2010, p. 93 (lire en ligne)
- [52] (en) Krabill, « Greenland Ice Sheet : High-Elevation Balance and Peripheral Thinning », *Science*, vol. 289, n° 5478, 21 juillet 2000, p. 428-430 (lire en ligne)
- [53] (en) Joughin, « Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbræ glacier », *Nature*, vol. 432, décembre 2004, p. 608 (lire en ligne)
- [54] (en) University of New Hampshire, *Report shows movement of glacier has doubled speed* [lire en ligne]
- [55] (en) « Rapid ice discharge from southeast Greenland glaciers last=Rignot », *Geophysical Research Letters*, vol. 31, 2004, p. L10401 (lire en ligne)
- [56] (en) Rignot, « Changes in the Velocity Structure of the Greenland Ice Sheet », *Science*, vol. 311, 2006, p. 986 et seq. (lire en ligne)
- [57] (en) Jason E. Lowe et al., *The Role of Sea-Level Rise and the Greenland Ice Sheet in Dangerous Climate Change : Implications for the Stabilisation of Climate* [lire en ligne].
- [58] H. Jay Zwally *et al.*, « Surface Melt-Induced Acceleration of Greenland Ice-Sheet Flow » dans *Science*, vol. 297 n° 5579, p. 218 - 222, 12 juillet 2002 [lire en ligne]
- [59] (en) Rignot, « Mass Balance of Polar Ice Sheets », *Science*, vol. 297, 2002, p. 1502-1506 (lire en ligne)
- [60] *J. Climate*, v15, 487-501, 2002
- [61] (en) Thomas, « Accelerated Sea-Level Rise from West Antarctica », *Science*, vol. 306, 2004, p. 255-258 (lire en ligne)
- [62] (en) Curt H. Davis, « Snowfall-Driven Growth in East Antarctic Ice Sheet Mitigates Recent Sea-Level Rise », *Science*, vol. 308, n° 5730, 24 juin 2005, p. 1898 - 1901 (lire en ligne)
- [63] Ministère de l'écologie (2009) *Cratanem : le nouveau centre français d'alerte aux tsunamis*
- [64] Carling C. Hay, Eric Morrow, Robert E. Kopp & Jerry X. (2015) Mitrovica (2015) Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise, *Nature, Letter*, mis en ligne 14 janvier 2015 ; doi:10.1038/nature14093 PDF, 12 pages
- [65] Talbot, A. (ed.) *Water Availability Issues for the St. Lawrence River : An Environmental Synthesis* (Environment Canada, Montreal, 2006).
- [66] Johansson MM Kahma KK & Boman H (2003), An improved estimate for the long-term mean sea level on the Finnish coast. *Geophysica* 39(1-2) :51-73
- [67] Chopin, F., Korja, A., & Hölttä, P. (2013). Tectonometamorphic evolution of a large dome in the Svecofennian Paleoproterozoic accretionary orogeny. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 15, p. 10231), avril 2013 (résumé)
- [68] résumé
- [69] WOODWORTH P.L., RICKARDS L.J., PEREZ B. (2009). A survey of European sea level infrastructure. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, p. 927-934
- [70] Pouvreau N (2008) *Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest*; Thèse de doctorat, soutenue à l'Université de La Rochelle, 466 p

- [71] CIMER (2009) livre bleu "*stratégie nationale pour la mer et les océans*" approuvé par le Premier Ministre en décembre 2009
- [72] Instruction relative à l'observation du niveau de la mer et à la gestion et à la diffusion des données en résultant
- [73] Pouvreau N (2010) *Vers une coordination de l'observation du niveau de la mer en France*. XIèmes Journées Nationales" Génie Civil-Génie Côtier, 22-24.(PDF, 10 pages)
- [74] Marégraphes (Shom, 2010)
- [75] Réseau ROSAME
- [76] (en) IPCC, *Climate Change 2001*, chap. 6 : *Radiative Forcing of Climate Change* [détail des éditions], partie 6.4 « Coastal Systems » [lire en ligne]
- [77] J.J Beukema, *Expected changes in the benthic fauna of Wadden Sea tidal flats as a result of sea-level rise or bottom subsidence* Journal of Sea Research, Volume 47, Issue 1, February 2002, Pages 25-39 (Résumé)
- [78] « *Environment and Urbanization* », avril 2007
- [79] Voir l'article Zone morte
- [80] Brève du *Standard*, intitulée *Kust wordt beschermd tegen 1.000-jarige storm* 03/03/2011
- [81] (en) German Advisory Council on Global Change, *The Future Oceans – Warming up, Rising High, Turning Sour*, Berlin, 2006 (ISBN 3-936191-14-X) [lire en ligne]
- [82] (en) Michael J. Field, « Sea Levels Are Rising », *Pacific Magazine*, décembre 2001 (lire en ligne)
- [83] (en) Mark Levine, « Tuvalu Toodle-oo », *Outside Magazine*, décembre 2002 (lire en ligne)
- [84] (en) Voir les données brutes.
- [85] (en) Marc Morano, *Climatologist Rejects 'Global Warming' as Cause for Island Evacuation*, CNSNews.com, 7 décembre 2005 [lire en ligne]
- [86] (en) « Policy Implications of Sea Level Rise : The Case of the Maldives. » (Archive • Wikiwix • Archive.is • Google • Que faire ?), *Proceedings of the Small Island States Conference on Sea Level Rise. November 14-18, 1989. Male, Republic of Maldives. Edited by Hussein Shihab*, consulté le 12 janvier 2007
- [87] VERGER F. (2000), *Les risques liés à l'élévation du niveau de la mer dans les marais maritimes et les polders*, Actes du Colloque d'Arles « Le changement climatique et les espaces côtiers - L'élévation du niveau de la mer : risques et réponses », p. 21-23
- [88] BAWEDIN V. (2013), *L'acceptation de l'élément marin dans la gestion du trait de côte : une nouvelle gouvernance face au risque de submersion ?*, Annales de géographie 4, n° 692, p. 429-430
- [89] Jacqueline M. Hamilton, Analysis, *Coastal landscape and the hedonic price of accommodation* ; Ecological Economics Volume 62, Issues 3-4, 15 May 2007, Pages 594-602 doi:10.1016/j.ecolecon.2006.08.001 (Résumé)
- [90] Voir les pages « Mean Sea Level rise », « Sea Level Estimate Coming Soon » et « Ocean surface topography from space »
- [91] (en) S. Mukherjee, « Satellite Measurements of Sea Level Rise », sur *membrane.com*, 2004 (consulté le 19 décembre 2005)
- [92] (en) « ERS », sur *earth.esa.int* (consulté le 19 décembre 2005)
- [93] (en) « ESA - Observing the Earth - ERS overview », sur *esa.int* (consulté le 19 décembre 2005)
- [94] (en) (en) « 40+ Years of Earth Science * TOPEX/Poseidon * », sur *earth.nasa.gov* (consulté le 19 décembre 2005)
- [95] (en) « T/P sea level deviation - Fall 2001 », sur *ibis.grdl.noaa.gov* (consulté le 19 décembre 2005)
- [96] (en) « Altimeter design », sur *earth.esa.int* (consulté le 19 décembre 2005)
- [97] (en) « Sea level deviation - Fall 2001 » (consulté le 19 décembre 2005)
- [98] (en) « Aviso/Altimetry - How altimetry works » (consulté le 19 décembre 2005)
- [99] (en) « Ocean Surface Topography from Space-Science » (consulté le 19 décembre 2005)
- [100] (en) « Ocean Surface Topography from Space-Technology » (consulté le 19 décembre 2005)
- [101] (en) « Monitoring the Stability of Satellite Altimeters with Tide Gauges » (Archive • Wikiwix • Archive.is • Google • Que faire ?), consulté le 19 décembre 2005
- [102] (en) [PDF] P Moore, MD Reynolds and R J Walmsley, « Monitoring of the ERS-2 Radar Altimeter range measurement stability » (consulté le 19 décembre 2005)
- [103] (en) « T/P versus Pacific Gauges » (consulté le 19 décembre 2005)
- [104] (en) « Global mean sea level calibration » (consulté le 19 décembre 2005)
- [105] (en) « The dynamics of short-term ocean climate variability » (consulté le 19 décembre 2005)
- [106] (en) « Geosat Follow-On @ NOAA/LSA » (consulté le 19 décembre 2005)
- [107] (en) « NAVY GEOSAT FOLLOW-ON (GFO) ALTIMETRY MISSION » (Archive • Wikiwix • Archive.is • Google • Que faire ?), consulté le 19 décembre 2005
- [108] (en) « NASA WFF Geosat Follow-On » (consulté le 19 décembre 2005)
- [109] (en) « Sea Level Analysis from ERS Altimetry » (Archive • Wikiwix • Archive.is • Google • Que faire ?), consulté le 19 décembre 2005
- [110] (en) « Ssalto/Duacs multimission altimeter products » (consulté le 19 décembre 2005)

- [111] PONCELET A. (2010), *Bangladesh, un pays fait de catastrophes*, Hommes & Migrations, N° 1284, p. 20
- [112] GEMENNE F., BRUCKER P., IONESCOI D. (ed.) (2012), *The State of Environmental Migration 2011*, Institute for Sustainable Development International Relations (IDDRI) et International Organization for Migration (IOM), p. 61
- [113] Définition officielle de l'UNHCR.
- [114] PIGUET E. et al. (2011), *Changements climatiques et migrations : quels risques, quelles politiques ?*, *L'Information géographique* 4, Vol. 75, p. 103
- [115] GIORDANO A. et al. (2013), *Bangladesh à risque entre vulnérabilité et migrations climatiques*, *Outre-Terre*, N° 35-36, p. 99-110, p. 110

13 Annexes

13.1 Législation

- Directive 2007/60/CE du Parlement et du Conseil relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, 32007L0060, adoptée le 23 octobre 2007, JO du 6 novembre 2007, p. 27-34, entrée en vigueur le 26 novembre 2007 [consulter en ligne, notice bibliographique]

13.2 Cartographie des zones touchées selon le niveau

La montée de la mer ne se fera pas à la même vitesse partout, et avec des impacts différents. De plus au fur et à mesure de la submersion, l'érosion et de nouveaux cordons dunaires pourront modifier le trait de côte. Cartographier le futur trait de côte et son évolution relève encore du domaine de la prospective et de ses incertitudes.

Enfin, de nombreuses méthodes et représentations visuelles du risque de submersion existent à ce jour^[1], dont la précision dépend de celle du modèle numérique de terrain, mais pas uniquement (il faut notamment tenir compte des rééquilibres eustatiques et isostatiques). Il existe des sites calculant en ligne, assez grossièrement les zones submergées selon la hauteur de la mer^[2] selon le MNT (modèle numérique de terrain), dans le monde

13.3 Articles connexes

- Réchauffement climatique
- Enjeux du réchauffement climatique
- Niveau de la mer
- Eustatisme

- Paléoclimatologie
- Submersion marine
- Transgression marine
- Marégraphe
- Recul des glaciers depuis 1850
- Événement de Heinrich
- Modélisation des glaciers

13.4 Liens externes

- (fr) « Réseaux de référence des observations marégraphiques (REFMAR) »
- (fr) « SONEL »
- (en) « Sea Level Changes in the Past, Present and in the Near-Future Global Aspects Observations versus Models », *IGCP Project No. 437 Puglia 2003 - Final Conference* (consulté le 10 février 2005)
- (en) « Sea Level Changes : The Maldives Project Freed From Condemnation to become Flooded », *IGCP Project No. 437 Puglia 2003 - Final Conference* (consulté le 10 février 2005)
- (en) Providing new homes for climate exiles Sujatha Byravan et Sudhir Chella Rajan, 2006
- (en) New perspectives for the future of the Maldives Nils-Axel Mörner, Michael Tooley, Göran Possnert, 2004
- (en) « Physical Agents of Land Loss : Relative Sea Level », *An Overview of Coastal Land Loss : With Emphasis on the Southeastern United States* (consulté le 14 février 2005)
- (en) Changes in the Earth's shorelines during the past 20 kyr caused by the deglaciation of the Late Pleistocene ice sheets, du Service Permanent pour le Niveau Moyen de la Mer
- (en) Includes picture of sea level for past 20 kyr based on barbados coral record
- (en) Global sea level change : Determination and interpretation
- (en) Sea level rise FAQ (1997)
- (en) The Global Sea Level Observing System (GLOSS)
- (en) The GLOSS Station Handbook
- (en) « Sea Level Rise Reports », *site Web du US Environmental Protection Agency*

- (en) Sea level rise - How much and how fast will sea level rise over the coming centuries ? Past
- (en) Sea level rise - How much and how fast will sea level rise over the coming centuries ? Present

13.5 Modélisations

- Exemple de simulateur, ici proposé par la revue National Geographic (en) ;
- Autre simulateur, basé sur le modèle numérique de terrain (MNT) (fr)
- Interactive sea level map (en)
- Simulation de la montée de la mer, avec relief simulé par la couleur (globalwarmingart)
- Modélisation et visualisation des courants de l'océan mondial, par la NASA ; l'une des incertitudes des modèles géoclimatiques porte sur la manière dont les courants marins (Gulf stream notamment) vont réagir aux changements de température et salinité de l'océan et aux changements de forme des littoraux liés à la montée de la mer.

13.6 Bibliographie

- Barroca B & Hubert G (2008) *Urbaniser les zones inondables, est-ce concevable ?*, Développement durable et territoires, Dossier 11 : Catastrophes et Territoires
- Carling C. Hay, Eric Morrow, Robert E. Kopp & Jerry X (2015) Mitrovica (2015) Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise, Nature, Letter, mis en ligne 14 janvier 2015 ; doi:10.1038/nature14093 PDF, 12 pages
- Conseil général de Charentes maritime (2007), *Diagnostic des digues maçonnées « extérieures » de l'île de Ré, Phase 5 : Hiérarchisation des risques liés à la rupture et/ou au dysfonctionnement des digues*, p. 29
- Lauriane paul (2011) *des critères de l'acceptation du risque de submersion marine par la population ; Application sur l'île de Ré à la suite de la tempête Xynthia*, projet de fin d'étude 2010-2011, sous la direction de Marc-André PHILIPPE, SCD, Université de Tours, PDF, 75p
- Ganier E. & Surville F. (2010), *La tempête Xynthia face à l'histoire, submersion et tsunamis sur les littoraux français du Moyen Âge à nos jours ; L'exemple du littoral aunisien et de ses prolongements d'entre Loire et Gironde*, La Croît Vif, 174 p.

- Laurent Labeyrie (2015), *Submersion. Comment gérer la montée du niveau des mers*, Éditions Odile Jacob, 176 p.

-  Portail du monde maritime

-  Portail des sciences de la Terre et de l'Univers

-  Portail de la géologie

[1] John C. Kostelnick, Dave McDermott, Rex J. Rowley, Cartographic methods for visualizing sea level rise

[2] Calculant en ligne, selon le MNT (modèle numérique de terrain)

14 Sources, contributeurs et licences du texte et de l'image

14.1 Texte

- **Élévation du niveau de la mer** *Source* : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89%C3%A9vation_du_niveau_de_la_mer?oldid=126350723 *Contributeurs* : Delorme, Zaharia, Urhixidur, Lachaume, Korrigan, Z653z, Theon, Leag, Wku2m5rr, Poulos, Sherbrooke, Deniss, Holycharly, Stéphane33, Zetud, Vazkor, Romanc19s, Arnaud.Serander, Gzen92, Necrid Master, Ocam Hartog, CaptainHaddock, MMBot, Litlok, Loveless, Jljmt, Malosse, CLV, Jrcourtois, Pautard, Pierre cb, Manu1400, Lamiot, Rominandreu, JPhR, BD2412, Bouchecl, Treehill, Rémi, Deep silence, LeFit, Nono64, Sebleouf, Pfrappe, Dfeldmann, Eiffele, Greteck, Wikig, Salebot, LPLT, Stef48, Emmanuel.boutet, TXiKiBoT, VolkovBot, Antoviaque, Ptbotgourou, ArsenePlus, Orthomaniaque, Gz260, Michel D. Cloutier Roy, BotMultichill, SieBot, Cépey, Ange Gabriel, Dhatier, Kelam, KelBot, DeepBot, GLec, DragonBot, Kolossus, Quentin57, Acx01b, Fandepanda, Thrace, HerculeBot, WikiCleanerBot, ZetudBot, Ggal, Jmp48, Bserin, Luckas-bot, Micbot, K90, Derkleinebaueraufdemriesigenschachbrett, ABACA, Archimëa, Penjo, Patrice78500, Abracadabra, MathsPoetry, JackBot, Etricomed, Vincent.vaquin, Kopiersperre, Coyote du 57, Lomita, Zoldik, Igel 14, Masterdeis, Cinerama14, Salsero35, HRoestBot, Scientif38, WikitanvirBot, ChuispastonBot, Boris Letcheff, Roi du monde, SenseiAC, Bertol, Pano38, Dojada, Klippe, Sculptorique, Addbot, Tisourcier, Lisdevos, NaggoBot, SamuelWikiEnvironnement, Antoniex, Raphoraph, Niki-athina, Stewi101015 et Anonyme : 57

14.2 Images

- **Fichier:Anchor.svg** *Source* : <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/80/Anchor.svg> *Licence* : CC0 *Contributeurs* : ? *Artiste d'origine* : ?
- **Fichier:Crystal_browser.png** *Source* : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/52/Crystal_browser.png *Licence* : LGPL *Contributeurs* : All Crystal icons were posted by the author as LGPL on kde-look *Artiste d'origine* : Everaldo Coelho and YellowIcon
- **Fichier:Holocene_Sea_Level-fr.svg** *Source* : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bb/Holocene_Sea_Level-fr.svg *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Image:Holocene Sea Level.png by Robert A. Rohde. This figure was prepared by Robert A. Rohde from published data, and is incorporated into the Global Warming Art project. Translation in french and conversion to svg was done by SuperManu *Artiste d'origine* : Robert A. Rohde, translated by SuperManu
- **Fichier:Mass_balance_atmospheric_circulation.png** *Source* : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/Mass_balance_atmospheric_circulation.png *Licence* : Public domain *Contributeurs* : http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Mass_balance_atmospheric_circulation.png *Artiste d'origine* : NASA
- **Fichier:Monocline01.gif** *Source* : <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f0/Monocline01.gif> *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Transféré de en.wikipedia à Commons. ; Transfer was made by User:Mikenorton. *Artiste d'origine* : Original téléversé par Mikenorton sur Wikipedia anglais
- **Fichier:North_Sea_Sea_Level_RisksFr.png** *Source* : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c5/North_Sea_Sea_Level_RisksFr.png *Licence* : CC BY-SA 3.0 *Contributeurs* : this map comes from an original work created for Global Warming Art by *Artiste d'origine* : Lamiot
- **Fichier:Phanerozoic_Sea_Level-fr.svg** *Source* : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/67/Phanerozoic_Sea_Level-fr.svg *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Image:Recent Sea Level Rise.png by Robert A. Rohde. This figure was prepared by Robert A. Rohde from published data, and is incorporated into the Global Warming Art project. Translation in french and conversion to svg was done by SuperManu *Artiste d'origine* : Robert A. Rohde, translated by SuperManu
- **Fichier:Post-Glacial_Sea_Level-fr.svg** *Source* : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c5/Post-Glacial_Sea_Level-fr.svg *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Image:Post-Glacial Sea Level.png by Robert A. Rohde. This figure was prepared by Robert A. Rohde from published data, and is incorporated into the Global Warming Art project. Translation in french and conversion to svg was done by SuperManu *Artiste d'origine* : Robert A. Rohde, translated by SuperManu
- **Fichier:Recent_Sea_Level_Rise-fr.svg** *Source* : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/69/Recent_Sea_Level_Rise-fr.svg *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Image:Recent Sea Level Rise.png by Robert A. Rohde. This figure was prepared by Robert A. Rohde from published data, and is incorporated into the Global Warming Art project. Translation in french and conversion to svg was done by SuperManu *Artiste d'origine* : Robert A. Rohde, translated by SuperManu
- **Fichier:Sea_level_rise.svg** *Source* : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/aa/Sea_level_rise.svg *Licence* : CC BY-SA 3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Kopiersperre (discussion)
- **Fichier:Sea_level_temp_140ky_Quaternary-fr.svg** *Source* : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/39/Sea_level_temp_140ky_Quaternary-fr.svg *Licence* : Public domain *Contributeurs* : <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/ctl/clisci100k.html#sea> and Image:Sea level temp 140ky.gif *Artiste d'origine* : translated by SuperManu
- **Fichier:U._S._Sea_Level_Trends_1900-2003.gif** *Source* : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7f/U._S._Sea_Level_Trends_1900-2003.gif *Licence* : Public domain *Contributeurs* : ? *Artiste d'origine* : ?

14.3 Licence du contenu

- Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0