



# La hausse de la mer au xx<sup>e</sup> siècle : observation et causes

Benoit Meyssignac,  
Gilles Reverdin

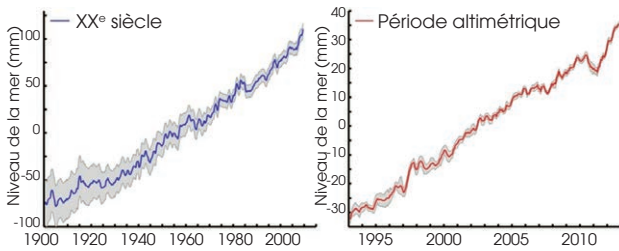
**Les mesures des marégraphes, puis des satellites ont démontré que la mer est montée globalement à une vitesse moyenne de l'ordre de 1,7 mm par an depuis le début du xx<sup>e</sup> siècle, une conséquence directe du réchauffement climatique d'origine anthropique, bien que l'on constate une forte variabilité régionale. Cette hausse est principalement liée à deux phénomènes : l'augmentation de la température des océans d'où une dilatation de l'eau de mer et la fonte des glaces continentales, glaciers et calottes polaires avec un apport d'eau douce à l'océan. Dans le futur, malgré les incertitudes, les scénarios indiquent une poursuite de la montée du niveau de la mer à un rythme plus rapide qu'au xx<sup>e</sup> siècle pour atteindre entre plus 25 cm (cas le plus favorable) et plus 82 cm (cas le moins favorable) en 2100.**

## LES MESURES MARÉGRAPHIQUES DU xx<sup>e</sup> SIÈCLE

L'observation directe des variations du niveau de la mer a débuté avec l'ère industrielle et l'installation systématique de marégraphes dans quelques ports de l'Europe du nord, puis progressivement dans d'autres régions du globe. Ces instruments, développés à l'origine pour mesurer les marées, nous fournissent des observations d'une valeur inestimable sur l'évolution du niveau de la mer au cours du xx<sup>e</sup> siècle. Bien que peu nombreux et mal répartis sur la planète, les séries marégraphiques "historiques" nous indiquent que depuis le début du xx<sup>e</sup> siècle, la mer est montée globalement à une vitesse moyenne de l'ordre de 1,7 mm par an (Figure 1, à gauche).

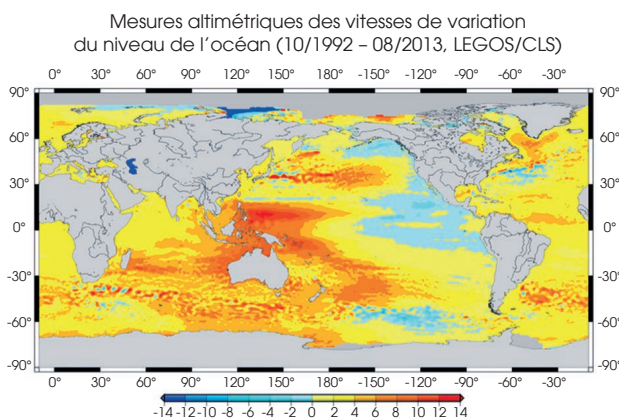
## L'OBSERVATION DES VARIATIONS DU NIVEAU DE LA MER DEPUIS L'ESPACE

Depuis le début des années 1990, on mesure en routine la hausse de la mer depuis l'espace, grâce aux satellites altimétriques de haute précision, tels Topex/Poseidon, Jason-1/2, ERS-1/2, Envisat, et depuis peu SARAL/Alika et Cryosat (Ablain *et al.*, 2014). L'observation par satellite a un avantage majeur par rapport à la marégraphie : c'est une observation quasi globale de l'ensemble du domaine océanique, avec un temps de revisite de quelques jours seulement. La Figure 1 (à droite) montre l'évolution du niveau de la mer mesuré par les satellites altimétriques entre 1993 et 2013. Sur cette période, la hausse du niveau de la mer est quasi linéaire et se fait à une vitesse moyenne de 3,2 soit plus ou moins 0,4 mm/an (Cazenave *et al.*, 2014).



**Fig.1** — Évolution du niveau moyen global de la mer, estimée à partir de la reconstruction de Church and White (2011) sur le xx<sup>e</sup> siècle (à gauche) et à partir de l’altimétrie spatiale sur la période 1993-2012 (source: AVISO). Le grisé représente l’incertitude associée à chacune des courbes. Les cycles annuels et semi-annuels ont été enlevés. À noter, la différence d’échelle verticale entre les deux courbes. D’après Cazenave & Le Cozannet (2014).

Cette hausse est deux fois supérieure à celle enregistrée par les marégraphes au cours du xx<sup>e</sup> siècle, suggérant une accélération du niveau de la mer depuis le début des années 1990. Grâce à leur couverture complète du domaine océanique, les satellites altimétriques ont aussi révélé que la hausse du niveau de la mer n’est pas uniforme. Elle présente une forte variabilité régionale (voir Fig.2) avec des régions comme l’ouest de l’Océan Pacifique Tropical où le niveau de la mer augmente 3 fois plus vite que la moyenne globale et d’autres régions, comme le long de la côte Ouest américaine, où il diminue à la vitesse de 1 à 2 mm/an.



**Fig.2** — Carte globale de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2013) d’après les mesures altimétriques de Topex/Poseidon, Jason-1/2, ERS-1/2, et Envisat (source: LEGOS).

## LES CAUSES DE LA HAUSSE ACTUELLE DE LA MER EN MOYENNE GLOBALE

En moyenne globale, la hausse actuelle du niveau de la mer est une conséquence directe du réchauffement climatique d’origine anthropique (Church *et al.*, 2013). Elle résulte de deux causes principales :

1. L’augmentation de la température des océans et l’expansion thermique associée (lorsque la température augmente, l’eau de mer se dilate et le niveau de l’océan s’élève).
2. La fonte des glaces continentales, glaciers et calottes polaires (les apports d’eau douce supplémentaires font monter son niveau). En plus de ces processus, on trouve aussi une petite contribution qui provient des échanges d’eau liquide avec les terres émergées (0,38 mm/an sur la période altimétrique de 1993 à 2010).

### Expansion thermique

Grâce à des mesures de température de la mer collectées à partir de sondes jetées à l’arrière des navires marchands au cours des 5 dernières décennies, et depuis 10 ans à partir des flotteurs automatiques du système international Argo, les océanographes ont observé que l’océan se réchauffe. En se réchauffant, l’eau de mer se dilate et le niveau de la mer augmente. On estime que sur la période altimétrique (depuis 1993 et le début des observations satellites), cette contribution explique 30 % de la hausse du niveau de la mer global (1,1 +/- 0,3 mm/an entre 1993 et 2010; Church *et al.*, 2013).

### Fonte des glaciers

Les glaciers correspondent à l’ensemble des masses de glaces continentales, exception faite des deux vastes calottes polaires antarctique et groenlandaise. Ils sont plus de 200 000 et couvrent environ 730 000 km<sup>2</sup> des terres émergées. Depuis la fin du petit âge de glace vers 1850, on observe (par mesures *in situ* du bilan de masse glaciaire et altimétrie ou gravimétrie spatiale pour les années récentes) un recul des glaciers dans presque toutes les chaînes de mon-

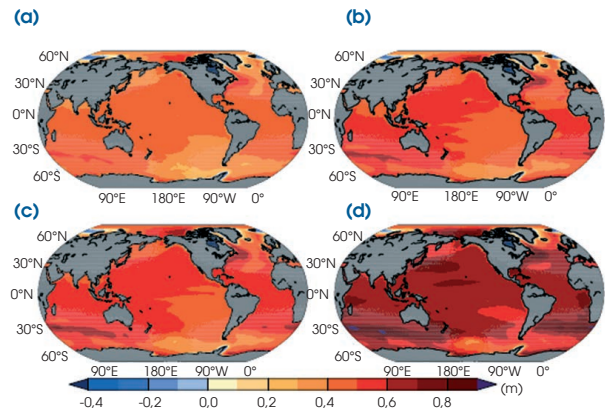
tagnes. Ce phénomène s'explique en partie par leur réponse retardée au réchauffement naturel de la planète après le petit âge glaciaire. En revanche, l'accélération des pertes de masse des glaciers observée depuis le milieu des années 1980 est attribuée au réchauffement récent d'origine anthropique (Marzeion *et al.*, 2014). Sur la période altimétrique, de 1993 à 2010, on estime que les glaciers ont contribué pour 0,9 mm/an à la hausse de la mer (Church *et al.*, 2013).

### Perte de masse des calottes polaires

La perte de masse des calottes polaires est observée et estimée essentiellement par 3 techniques : l'altimétrie radar ou laser (qui mesurent l'évolution de l'altitude des calottes depuis 1991), la gravimétrie spatiale (qui fournit directement les variations de masse de la calotte au cours du temps) et la méthode des flux (qui consiste à calculer la différence entre l'accumulation de neige en surface estimée le plus souvent avec des modèles de climat et les flux de glace « coulant » vers l'océan au niveau de la ligne d'échouage des calottes) (Rignot *et al.*, 2014). La synthèse de ces observations pour les 20 dernières années (Shepherd *et al.*, 2012) indique une perte de masse très marquée dans les régions côtières du Groenland et en Antarctique de l'ouest. Cumulées, ces pertes représentent une hausse du niveau de la mer de 0,6 mm/an sur la période 1993-2010 (Church *et al.*, 2013).

## LES CAUSES DE LA VARIABILITÉ RÉGIONALE DU NIVEAU DE LA MER

Au niveau régional, c'est le stockage de la chaleur dans l'océan et l'expansion thermique associée qui génèrent l'essentiel de la variabilité régionale du niveau de la mer. La chaleur de l'Océan est redistribuée de manière inhomogène par la circulation océanique (Stammer *et al.*, 2013) en réponse aux forçages (en moment cinétique, chaleur et en eau douce) de l'atmosphère. Selon les régions, divers processus sont à l'œuvre. Par exemple dans le Pacifique Tropical Ouest, l'intensification des alizés observée depuis une vingtaine d'années provoque l'approfondissement de la thermocline dans la partie ouest du bassin, induisant une couche d'eau chaude



**Fig.3** — Moyenne d'ensemble (21 modèles CMIP5) du changement du niveau des mers relatif pour les scénarios RCP2.6 (a), 4.5 (b), 6.0 (c) et 8.5 (d). L'impact de l'expansion thermique des océans, de la masse des glaces continentales, des stocks continentaux d'eau liquide, et du rebond post-glaciaire sont pris en compte (adapté de Church *et al.*, 2013).

superficielle plus épaisse et donc une hausse du niveau de la mer plus marquée (Timmermann *et al.*, 2010; Stammer *et al.*, 2013).

## ÉLÉVATION DE LA MER DANS LE FUTUR

En réponse aux émissions passées et futures de gaz à effet de serre, le réchauffement climatique va continuer dans le futur. En conséquence, la hausse du niveau marin va elle aussi se poursuivre, principalement en raison de la fonte des glaces continentales et de l'expansion thermique des océans. Tout l'enjeu est d'estimer l'amplitude de cette hausse, les disparités régionales, et les incertitudes associées. Les incertitudes proviennent de 2 sources majeures : d'une part de la mauvaise connaissance de certains processus climatiques qui affectent les variations du niveau de la mer (c'est le cas pour le processus d'écoulement de la glace des calottes polaires vers l'Océan) et d'autre part de l'incertitude sur les scénarios futurs d'émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique. En effet, différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (exprimés en terme de forçage radiatif : RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5, IPCC 2013) et de réponse du système climatique (exprimés en terme d'augmentation de la température globale de la Terre) sont possibles pour les



décennies à venir (IPCC 2013). Chacun de ces scénarios indique une augmentation du niveau de la mer entre 1986-2000 et 2080-2100, car ils montrent tous une augmentation du réchauffement de l'Océan et de la fonte des glaces continentales. L'augmentation s'élèverait entre 25 cm (cas le plus favorable scénario RCP2.6) et 82 cm (cas le moins favorable scénario RCP8.5). Dans tous les cas, la montée du niveau de la mer simulée d'ici à 2100 serait donc plus rapide qu'au cours du xx<sup>e</sup> siècle. À l'horizon 2100, le rythme de montée du niveau de la mer atteindrait 8 à 16 mm/an pour le RCP 8,5, autant que durant la dernière déglaciation. De plus, de la même manière que les variations actuelles du

niveau de la mer ne sont pas uniformes, on s'attend à ce que les variations du niveau de la mer pour la fin du xxi<sup>e</sup> siècle présentent d'importantes disparités régionales (Figure 3, Yin *et al.*, 2010). Par exemple, en considérant le scénario RCP8.5, il apparaît que le niveau de la mer pourrait baisser légèrement dans certaines régions de l'Arctique, tandis qu'il pourrait augmenter de plus de 70 cm le long de la côte est des États-Unis. Il est essentiel de prendre en compte ces disparités et de les modéliser correctement si l'on veut anticiper la hausse future du niveau de la mer à la côte. C'est un sujet de recherche très actif actuellement.

## RÉFÉRENCES

- ABLAIN M. *et al.*, 2014 – *Improved Sea Level Record over the Satellite Altimetry Era (1993-2010). From The Climate Change Initiative Project.* In revision, Ocean Sciences.
- CAZENAVE A. and LE COZANNET G., 2014 – *Sea Level Rise and Coastal Impacts.* Earth's Future, vol. 2, issue 2.
- CAZENAVE A., DIENG H., MEYSSIGNAC B., VON SCHUCKMANN K., DECHARME B. and BERTHIER E., 2014 – *The Rate of Sea Level Rise.* Nature Climate Change, vol. 4.
- CHURCH J. A. and WHITE N. J., 2011 – *Sea-Level Rise from the Late 19<sup>th</sup> to the Early 21<sup>st</sup> Century.* Surveys in Geophysics, 32 (4-5), 585-602.
- CHURCH J. A., CLARK P. U., CAZENAVE A., GREGORY J. M., JEVREJEVA S., LEVERMANN A., M. MERRIFIELD A., MILNE G. A., NEREM R. S., NUNN P. D., PAYNE A. J., PFEFFER W. T., STAMMER D. and UNNIKRISHNAN A. S., 2013 – *Sea Level Change.* In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- IPCC 5<sup>th</sup> Assessment Report, 2013 – *Climate Change 2013: the Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- MARZEION B., COGLEY J. G., RICHTER K. and PARKES D., 2014 – *Attribution of Global Glacier Mass Loss to Anthropogenic and Natural Causes.* Science, 345 (6199), 919 – 921.
- MEYSSIGNAC B., SALAS Y MELIA D., BECKER M., LLOVEL W. and CAZENAVE A., 2012 – *Tropical Pacific Spatial Trend Patterns in Observed Sea Level: Internal Variability and/or Anthropogenic Signature ?* Climate of the Past, 8 (2), 787-802.
- RIGNOT E., MOUGINOT J., MORLIGHEM M., SEROUSSI H. and SCHEUCHL B., 2014 – *Widespread, Rapid Grounding Line Retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler Glaciers, West Antarctica, from 1992 To 2011.* Geophys. Res. Lett., 41 (10), 3502 – 3509.
- SHEPHERD A. *et al.*, 2012 – *A Reconciled Estimate of Ice-Sheet Mass Balance.* Science, 338 (6111), 1183 – 1189.
- STAMMER D., CAZENAVE A., PONTE R. M. and TAMISIEA M. E., 2013 – *Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes.* Annual Review of Marine Science, vol. 5.
- TIMMERMANN A., MCGREGOR S. and JIN F.-F., 2010 – *Wind Effects on Past and Future Regional Sea Level Trends in the Southern Indo-Pacific.* Journal of Climate, 23 (16).
- YIN J., GRIFFIES S. M. and STOUFFER R. J., 2010 – *Spatial Variability of Sea Level Rise in Twenty-First Century Projections.* Journal of Climate, 23 (17), 4585-4607.