

# La hausse du niveau de la mer : observations et projections

*Anny Cazenave est chercheur au Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS<sup>1</sup>) à Toulouse et directeur pour les sciences de la Terre à l'International Space Science Institute à Berne. Elle est membre de l'Académie des Sciences.*

Le niveau de la mer et ses variations constituent un excellent indicateur du changement climatique. En effet le niveau de la mer intègre les variations de plusieurs composantes du système climatique en réponse au réchauffement d'origine anthropique et à la variabilité naturelle et interne du climat. Depuis quelques décennies, la Terre est en état de déséquilibre énergétique : elle réémet moins d'énergie vers l'espace qu'elle n'en reçoit du Soleil. C'est une des conséquences majeures de l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre, résultat de l'utilisation des combustibles fossiles par les activités humaines. L'excès d'énergie – essentiellement sous forme de chaleur – s'accumule majoritairement dans l'océan, à hauteur de 93 % en

moyenne sur les cinquante dernières années. Les 7 % restants servent à réchauffer l'atmosphère et les surfaces continentales, et à faire fondre les glaces (banquise, glaciers et calottes polaires). L'augmentation du contenu en chaleur de l'océan (**Figure 1**) ainsi que la fonte des glaces continentales (glaciers et calottes polaires, **Figure 2**) contribuent à leur tour à la hausse du niveau moyen des océans observée depuis un peu plus d'un siècle.

L'observation directe des variations du niveau de la mer a débuté peu après le début de l'ère industrielle avec l'installation systématique de marégraphes dans quelques ports de l'Europe du Nord, puis progressivement dans d'autres régions du globe. Bien que peu nombreux et mal répartis sur la planète, les séries marégraphiques « historiques » nous indiquent que depuis le

1. [www.legos.obs-mip.fr](http://www.legos.obs-mip.fr)

Figure 1

Évolution du contenu thermique de l'océan depuis 1980 estimé à partir de mesures de températures in situ, jusqu'à 700 m de profondeur (courbe bleue), jusqu'à 2 000 m de profondeur (courbe rouge).

Source : d'après Abraham et coll. (2013).

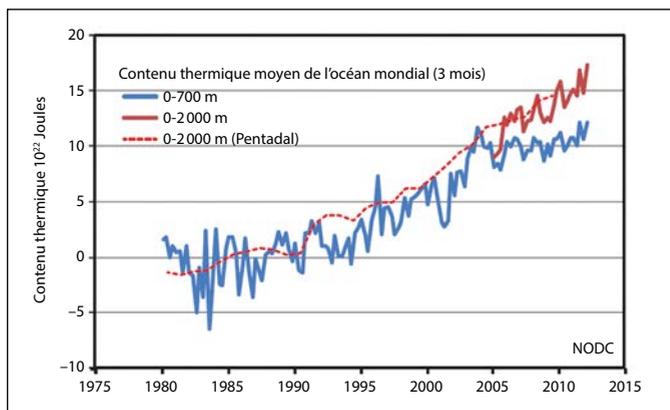
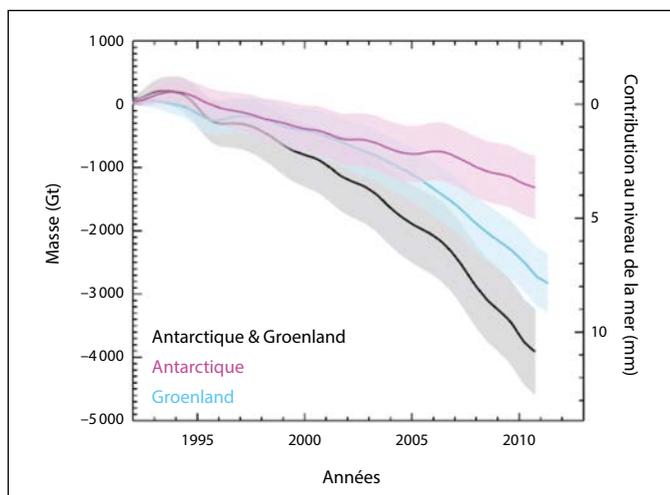


Figure 2

Perte de masse de glace (en milliards de tonnes par an) du Groenland (courbe bleue) et de l'Antarctique (courbe rose). La courbe noire est la somme des deux effets.

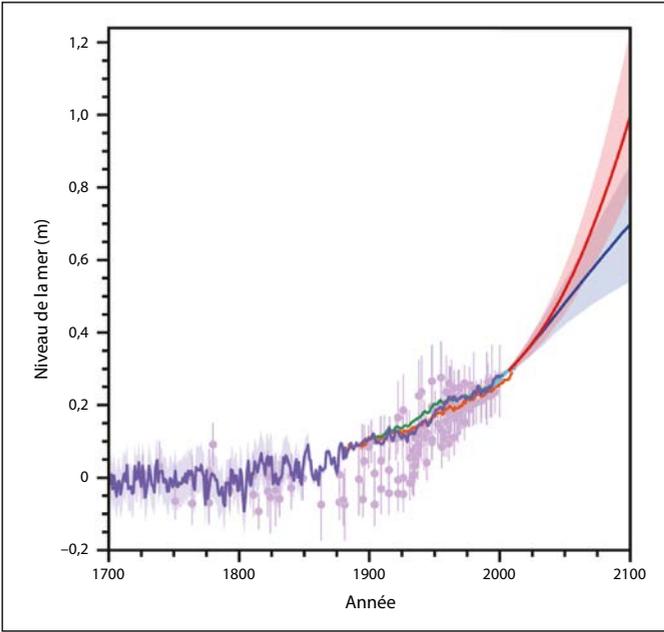
Source : d'après Shepherd et coll. (2012).



début du  $xx^e$  siècle, la mer est montée globalement à une vitesse moyenne de l'ordre de 1,7 mm par an (Figure 3).

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 que Topex/Poseidon et ses successeurs Jason-1, Jason-2 et Jason-3, ainsi qu'ERS-1/2 et Envisat, et depuis peu SARAL/Altika et Cryosat et Sentinel-3. On dispose aujourd'hui d'une série d'observations depuis

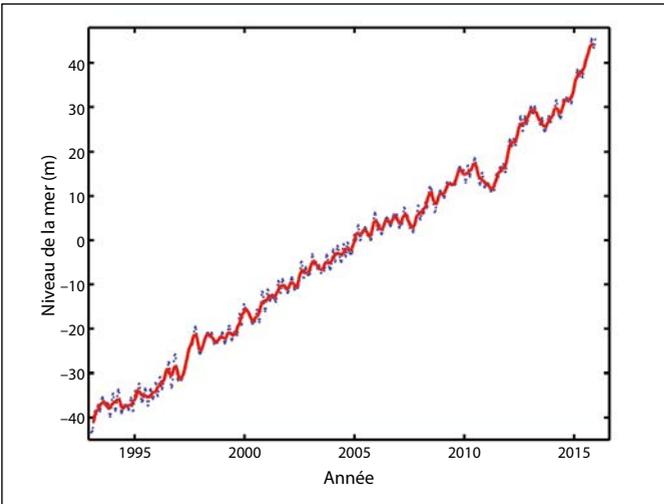
l'espace longue d'environ vingt-cinq ans (Figure 4). Celle-ci montre que le niveau moyen de la mer s'est élevé à la vitesse de 3,4 mm par an entre 1993 et 2016. Bien que la série altimétrique soit encore un peu courte, on ne peut exclure que la hausse de la mer s'est accélérée au cours des deux dernières décennies. L'accord avec les données marégraphiques suggère qu'il s'agit d'un phénomène réel et non d'un biais lié à l'utilisation d'un nouveau système d'observation.



**Figure 3**

Évolution du niveau moyen global de la mer depuis 1700 estimée à partir des mesures marégraphiques puis altimétriques.

Source : d'après IPCC, 2013 (GIEC).



**Figure 4**

Évolution du niveau moyen global de la mer mesuré par altimétrie spatiale entre janvier 1993 et décembre 2015.

Source : LEGOS.

Grâce à leur couverture quasi globale du domaine océanique, les satellites altimétriques ont aussi révélé que la hausse du niveau de la mer présente d'importantes disparités régionales. Dans certaines régions, tel le Pacifique tropical ouest, la hausse de

la mer a atteint 12 mm/an depuis 1993, soit une élévation trois fois plus grande que la moyenne globale (Figure 5).

Les deux contributions principales de la hausse moyenne globale de la mer sont le réchauffement de l'océan (qui se dilate) et la fonte des glaciers

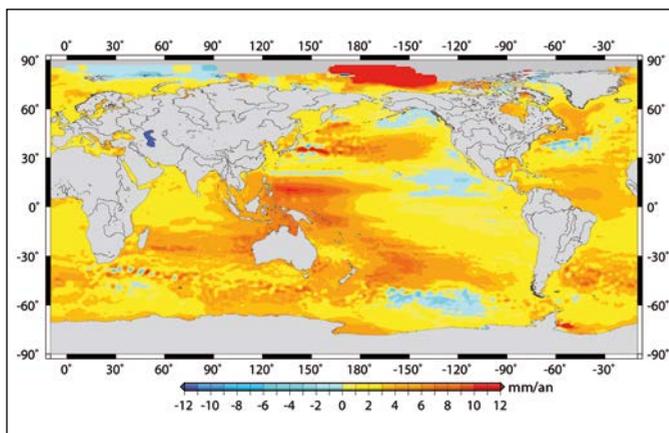


Figure 5

Distribution régionale des vitesses de variation du niveau de la mer entre janvier 1993 et décembre 2014, d'après les observations d'altimétrie spatiale.

Source : LEGOS.

continentaux et des calottes polaires. Les échanges d'eau avec les terres émergées participent aussi aux variations du moyen global de la mer. Aux échelles régionales, l'expansion thermique non uniforme des océans est la cause majeure des disparités régionales de la hausse de la mer. Mais les déformations de la Terre solide dues aux redistributions de masse liées à la fonte passée et actuelle des glaces ont également un impact sur les variations régionales du niveau de la mer.

Depuis plusieurs années, on dispose de divers systèmes d'observation spatiaux et *in situ* permettant d'estimer à la fois les variations globales et régionales du niveau de la mer (l'altimétrie spatiale de haute précision et la marégraphie) ainsi que les principales contributions à ces variations : le système Argo pour la mesure des variations de température et de salinité de la mer ; la gravimétrie spatiale GRACE

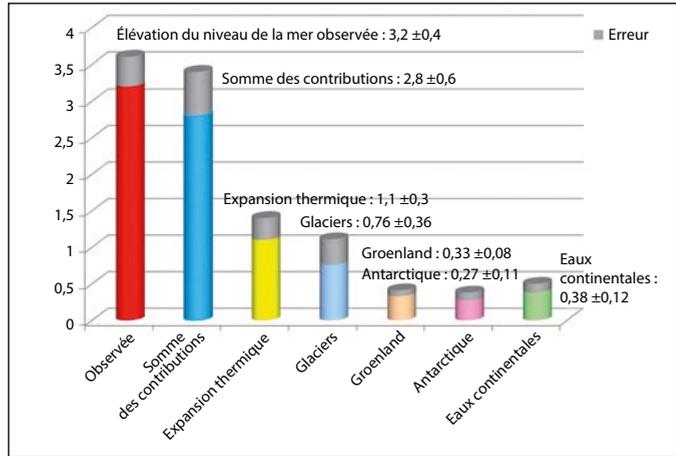
pour estimer les variations de masse de l'océan et des stocks d'eaux continentales ; l'altimétrie laser et radar, GRACE et l'interférométrie radar pour quantifier le bilan de masse des calottes polaires ; l'imagerie spatiale haute résolution et des mesures de terrain pour estimer la fonte des glaciers (même si le bilan de masse des glaciers reste encore principalement basée sur les mesures *in situ*). Utilisées conjointement avec la modélisation, ces observations permettent d'étudier le « bilan » du niveau de la mer aux échelles globale et régionale, et donc de mieux comprendre les processus en jeu. Par ailleurs, ces observations contribuent à la validation et à l'amélioration des modèles climatiques utilisés pour simuler les variations de la mer dans le futur, et en particulier dans les régions côtières.

On estime que l'ensemble des glaces continentales – glaciers et calottes polaires – ont

contribué pour environ 45 % à la hausse observée du niveau de la mer sur la période 1993-2010<sup>2</sup>. Les mesures de température de la mer réalisées à différentes profondeurs à partir de bateaux au cours des dernières décennies, et depuis dix ans par les flotteurs automatiques du projet international Argo (assurant une couverture quasi globale des océans), ont permis d'estimer le réchauffement de l'océan et donc la contribution de la dilatation thermique à la hausse de la mer. Celle-ci a contribué pour environ 35 % à la hausse de la mer sur la période 1993-2010. Les 15 % restants sont attribués à une diminution des stocks d'eau sur les continents, principalement à cause du pompage de l'eau dans les nappes souterraines pour l'irrigation des cultures. La

**Figure 6** illustre les différentes contributions à la hausse de la mer sur la période 1993-2010. Depuis 2002-2003, grâce à la mission de gravimétrie spatiale GRACE, on peut mesurer directement la variation de masse de l'océan (sans avoir besoin d'estimer individuellement les différentes compo-

2. Church J.A., Clark P.U., Cazenave A., Gregory J.M., Jevrejeva S., Levermann A., Merrifield M.A., Milne G.A., Nerem R.S., Nunn P.D., Payne A.J., Pfeffer W.T., Stammer D., Unnikrishnan A.S., 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*, edited by: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013.

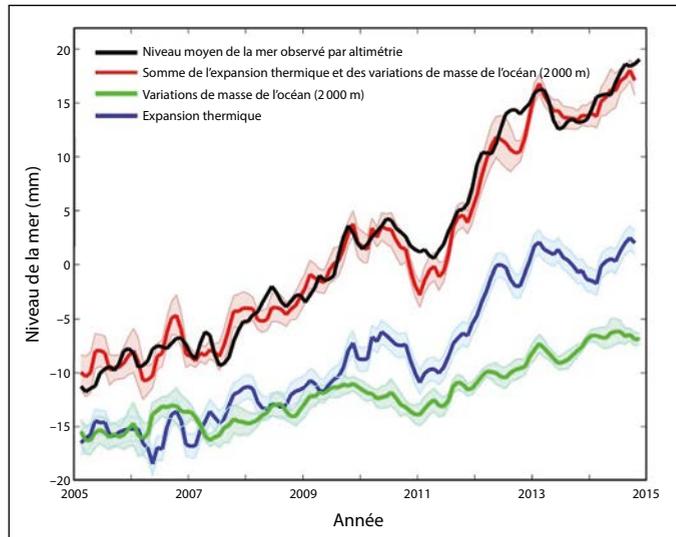


santes – glaciers, Groenland, Antarctique, eaux terrestres). Ceci est illustré par la **Figure 7** montrant la hausse de la mer et les contributions de l'expansion thermique (estimée par Argo) et de la masse de l'océan.

**Figure 6**

Bilan du niveau de la mer pour la période 1993-2010 ; comparaison de la hausse observée avec la somme des contributions (en mm/an).

Source : d'après Church et coll. (2013).



**Figure 7**

Bilan du niveau de la mer pour la période 2003-2013 ; comparaison entre niveau de la mer observé par altimétrie spatiale et contributions de l'expansion thermique (d'après Argo) et de la masse de l'océan (d'après GRACE).

Source : LEGOS et Dieng et coll. (2015).

À l'échelle régionale, comme mentionné plus haut, la cause principale de la variabilité observée résulte de l'expansion thermique non uniforme de l'océan : dans certaines régions, il y a plus de chaleur stockée dans l'océan donc plus de dilatation. Il en résulte une hausse de la mer non uniforme. Les tendances régionales du niveau de la mer observées par altimétrie satellitaire et celles résultant de l'expansion thermique de l'océan montrent un accord remarquable.

Avec la poursuite du réchauffement climatique en réponse aux émissions passées et futures de gaz à effet de serre, la hausse du niveau marin va se poursuivre au cours des prochaines décennies, et même des prochains siècles. Comme c'est le cas aujourd'hui, les deux contri-

butions principales sont la fonte des glaces continentales et l'expansion thermique des océans. Les estimations de la hausse future de la mer sont basées sur des simulations numériques modélisant les différents processus. Dans le 5<sup>e</sup> rapport du GIEC, les projections futures des différentes variables climatiques sont fournies pour plusieurs scénarios de réchauffement futur exprimés en termes de forçage radiatif net (appelés RCP/'Radiative Concentration Pathway').

Pour le scénario RCP8.5 (extrapolation du taux actuel d'émissions de gaz à effet de serre), les projections pour 2100 indiquent une élévation moyenne globale de la mer de l'ordre de  $75 \pm 25$  cm (Figure 8). L'expansion thermique de l'océan devrait représenter 30 à 55 % de la hausse de la

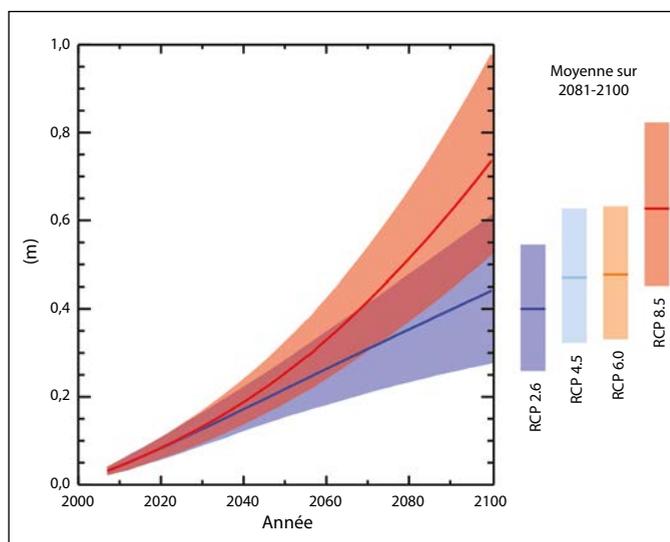


Figure 8

Projections de la hausse future du niveau moyen global de la mer au cours du XXI<sup>e</sup> siècle pour deux scénarios de réchauffement (RCP 2.6 et RCP 8.5).

Source : d'après Church et coll. (2013).

mer. La fonte des glaciers de montagne représente la deuxième contribution la plus importante et se situe entre 15 et 35 %. Les contributions du Groenland et de l'Antarctique comprennent à la fois celles qui sont liées au bilan net de la fonte et de l'accumulation de la glace ou de la neige à la surface des calottes, et celles liées à l'écoulement de la glace vers l'océan.

Comme c'est déjà le cas aujourd'hui, l'élévation future de la mer présentera d'importantes variations régionales (Figure 9). Celles-ci résultent de différents facteurs. L'effet dominant est dû à la distribution non uniforme de la température de l'océan et de la salinité (en lien avec la fonte de la banquise et des glaces continentales, et les variations du cycle hydrologique). Les variations géographiques de la pression atmosphérique jouent aussi un rôle, mais faible en comparaison de la température de la mer et de la salinité. La fonte actuelle (et future) des glaces continentales (glaciers de montagne et calottes polaires) génère aussi de manière indirecte une part de la variabilité régionale du niveau de la mer : sous l'effet des redistributions de masse de glace et d'eau, la croûte terrestre (élastique) se déforme, ce qui modifie légèrement le contour et la profondeur des bassins océaniques, donc le niveau de la mer à l'échelle régionale. De plus, la Terre continue de se déformer de façon viscoélastique en réponse à la dernière déglaciation (phénomène appelé « rebond post-glaciaire »), ce qui induit une

autre contribution à la variabilité régionale de la mer. On estime que la fonte future des calottes polaires causera une amplification de l'élévation de la mer dans les océans tropicaux de 20 % à 30 % par rapport à la hausse moyenne globale. Le phénomène de rebond post-glaciaire a quant à lui des effets importants dans les régions des hautes latitudes. Le long de la côte Est de l'Amérique du Nord, l'effet du rebond post-glaciaire combiné au ralentissement de la circulation thermohaline induite par les changements de la dynamique océanique, la hausse (relative) de la mer devrait être très supérieure à la moyenne globale (voir la Figure 9).

Les conséquences de la hausse future de la mer dans les régions côtières sont multiples : submersions temporaires et inondations permanentes, érosion du littoral, salinisation des aquifères, disparition des zones humides, etc. Si la hausse de la mer causée par le réchauffement climatique

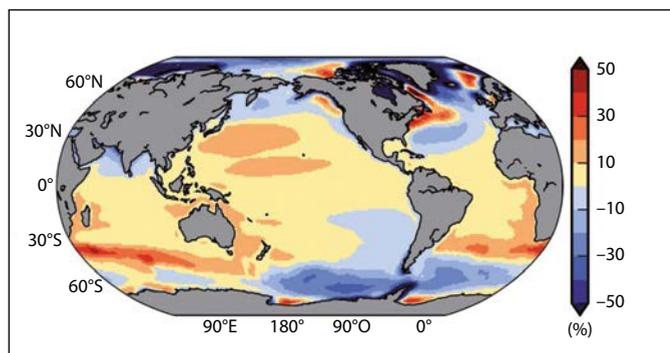


Figure 9

Écarts à la hausse moyenne globale, exprimés en % (vables pour tous les scénarios de réchauffement).

Source : d'après Church et coll. (2013).

global reste un phénomène lent, il est néanmoins inexorable et à très longue durée de vie (même si les émissions de gaz à effet de serre s'arrêtaient immédiatement, la mer continuerait à monter pendant plusieurs siècles en raison de la très grande inertie thermique de l'océan et de la longue durée de vie du dioxyde de carbone dans l'atmosphère). Avec les événements extrêmes et les ressources en eau, la hausse du niveau de la mer est un des phénomènes les plus préoccupants causés par les changements

globaux affectant la planète. Assurer la continuité des observations spatiales et *in situ* de façon à disposer de séries longues et précises des paramètres climatiques, améliorer les projections de la hausse future de la mer aux échelles globale, régionale et locale, et amplifier les recherches sur les impacts côtiers de la hausse du niveau marin tenant compte de la complexité des systèmes littoraux, constituent plusieurs défis majeurs pour la communauté scientifique internationale impliquée dans cette thématique.

#### Références citées

– Abraham J.P., Baringer M., Bindoff N.L., Boyer T., Cheng L.J., Church J.A., Conroy J.L., Domingues C.M., Fasullo J.T., Gilson J., Goni G., Good S.A., Gorman J.M., Gouretski V., Ishii M., Johnson G.C., Kizu S., Lyman J.M., Macdonald A.M., Minkowycz W.J., Moffitt S. E., Palmer M.D., Piola A.R., Reseghetti F., Schuckmann K., Trenberth K.E., Velicogna I., Willis J.K. (2013). A review of global ocean temperature observations: implications for ocean heat content estimates and climate change, *Rev. Geophys.*, 51 : 450-483.

– Church J.A., Clark P.U., Cazenave A., Gregory J.M.,

Jevrejeva S., Levermann A., Merrifield M.A., Milne G.A., Nerem R.S., Nunn P.D., Payne A.J., Pfeffer W.T., Stammer D., Unnikrishnan A.S., 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*, edited by: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013.

– Dieng H., Palanisamy H., Cazenave A., Meyssignac B. and von Schuckmann K. (2015). The sea level budget since 2003:

inference on the deep ocean heat content, *Surveys in Geophysics*, 36 : 1.

– IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013.

– Shepherd A *et coll.* (2012). A reconciled estimate of ice sheet mass balance, 338 : 1183, *Science*.

#### Pour en savoir plus :

– Cazenave A., Le Cozannet G. (2014). Sea level rise and coastal impacts, *Earth's Future*, 2 : 15-34.

– Cazenave A., Berthier E., LeCozannet G., Masson-

Delmotte V., Meyssignac B., Salas y Melia D. (2015). Le niveau de la mer : variations passées, présentes et futures, *Journal La Météorologie*, vol 8.

– Stammer D., Cazenave A., Ponte R., Tamisiea M. (2013).

Contemporary regional sea level changes, *Annual Review Marine Sciences*, 5 : 21-46.