

## Evolution du niveau de la mer

Auteur : Edouard Bard  
Professeur au Collège de France  
Membre de l'Académie des sciences

---

### Introduction

La montée du niveau de la mer est un enjeu planétaire car la moitié de la population mondiale vit à moins de 200 km d'une côte et une personne sur dix habite à moins de dix mètres au dessus du niveau marin actuel. Il est donc crucial d'étudier les variations de ce paramètre à plusieurs échelles de temps afin de comprendre et prévoir ses évolutions.

Chaque littoral est affecté par des processus multiples dont les amplitudes respectives sont spécifiques localement. On ne peut donc pas se contenter de la moyenne du niveau marin à l'échelle mondiale en invoquant le simple « principe des vases communicants » entre les différents bassins océaniques. Les spécificités locales sont en partie liées à l'histoire du niveau marin à long terme, la mémoire géophysique de notre planète continuant d'affecter toutes les côtes actuelles.

### Les évolutions naturelles du niveau marin à long terme

A long terme, les variations du niveau marin sont pilotées par le phénomène des glaciations. La cause principale est la cyclicité de la distribution saisonnière et en latitude de l'énergie reçue du Soleil. Ces variations sont dues aux changements de l'orbite terrestre et de son axe de rotation. Les trois cycles majeurs, bien connus des astronomes, sont ceux de l'excentricité de cette orbite, de l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre et, enfin, de la précession des équinoxes.

Excellents indicateurs de la variation du niveau marin, les coraux récifaux constituent de véritables archives de la dynamique des calottes polaires, de l'océan et du climat du passé. Nécessitant beaucoup de lumière pour se développer, ils vivent dans de faibles tranches d'eau, principalement entre la surface et une dizaine de mètres de profondeur. Lorsque la mer monte, le récif colonise la pente littorale et les coraux plus anciens, ennoyés sous une épaisse couche d'eau, périssent par manque de lumière.

L'étude des coraux fossiles indique que le niveau marin s'est abaissé de plus d'une centaine de mètres pendant les glaciations et a dépassé le niveau actuel de quelques mètres pendant quelques périodes rares et brèves, notamment lors du dernier interglaciaire, centré vers 125 000 ans BP (*before present*). La moitié de cette hausse serait liée à la réduction de moitié de la calotte groenlandaise.

Pour la dernière déglaciation, les enregistrements les plus complets sont ceux obtenus par la datation des coraux fossiles prélevés par forage de récifs coralliens des îles de la Barbade, dans les Caraïbes, et de Tahiti, en Polynésie (**Figure 1**). Le niveau marin suit le réchauffement postglaciaire entre 21 000 ans et 6 000 ans BP, avec une remontée d'environ 130 m.



## Remontée du niveau marin (> 120m) pendant la dernière déglaciation

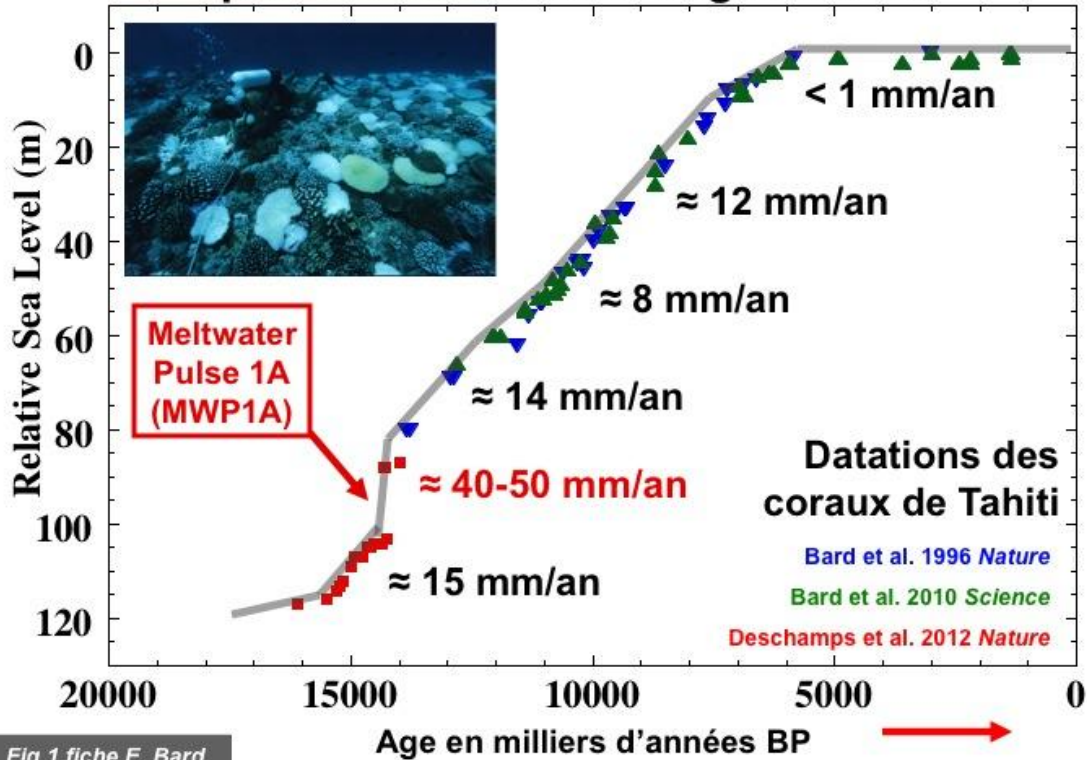


Fig.1 fiche E. Bard

Figure 1 : Remontée du niveau marin pendant la dernière déglaciation (données de Tahiti ; Bard et al. 1996, 2010, Deschamps et al. 2012).

Au cœur de la dernière déglaciation, le niveau est monté continûment de plus de 50 m en cinq millénaires (l'équivalent de presque toute la glace actuelle de l'Antarctique). L'essentiel de cette glace provenait de la calotte Laurentide centrée sur le Canada. Le rythme moyen de remontée du niveau marin était d'une douzaine de mm/an.

Un autre fait majeur est l'existence d'un saut important du niveau marin, correspondant à une intense débâcle glaciaire (*Meltwater Pulse 1A*). Cet événement centré vers 14 600 ans BP a été marqué par une hausse rapide à un taux d'environ 40-50 mm/an (Figure 1).

On ne sait pas encore précisément quelle calotte de glace s'est effondrée à l'époque, mais les soupçons se portent vers les calottes Laurentide et Antarctique. La comparaison et la modélisation géophysique des différences des niveaux marins observés en Atlantique et dans le Pacifique permettent de localiser les sources de glace et la chronologie de la fonte des différentes calottes.

Pour toutes les périodes depuis 21 000 ans jusqu'à la période actuelle, on observe de grandes différences entre les enregistrements locaux du niveau marin. Aujourd'hui, le niveau marin monte dans de nombreuses zones mais descend aussi rapidement dans d'autres. Ces différences de comportement sont généralement liées au réajustement glacio-hydro-isostatique postglaciaire (ou rebond isostatique postglaciaire).

En effet, la Terre se déforme sous le poids des calottes de glace, un volume de glace de plusieurs kilomètres d'épaisseur créant une dépression de la croûte continentale d'environ un kilomètre. Ceci entraîne des déplacements de masse à grande échelle à l'intérieur de la Terre. Après la fonte des calottes, le globe terrestre reprend lentement sa forme initiale. Les enregistrements du niveau marin à long terme et les mouvements actuels par mesure GPS sont utilisés pour ajuster les paramètres des modèles numériques de géophysique simulant la réponse visco-élastique de la Terre à la déglaciation.

Les observations et modélisations du rebond postglaciaire permettent de corriger les données du niveau marin des derniers siècles, afin de n'en retenir que la composante liée au changement climatique récent. Pour le dernier millénaire, les observations sont fondées sur des marqueurs géologiques spécifiques aux zones d'études, par exemple les microatolls des îles coralliennes ou des sédiments côtiers - les marais salés (*salt marshes*) - aux moyennes et hautes latitudes. Ces enregistrements montrent de faibles variations au cours de la période historique, une vingtaine de centimètres depuis un millénaire, avec une nette accélération au cours des deux derniers siècles, corroborées par les données plus précises des marégraphes dont certaines séries remontent jusqu'au XIX<sup>e</sup> siècle.

### Une accélération de la remontée du niveau marin depuis un siècle

La couverture spatiale des marégraphes est loin d'être idéale, mais elle a été améliorée considérablement ces dernières décennies. Différentes compilations régionales et globales confirment une accélération récente de la hausse du niveau des mers avec un taux moyen inférieur à 1,5 mm/an avant les années 1950 jusqu'à atteindre plus de 3 mm/an durant les dernières décennies (**Figure 2**).

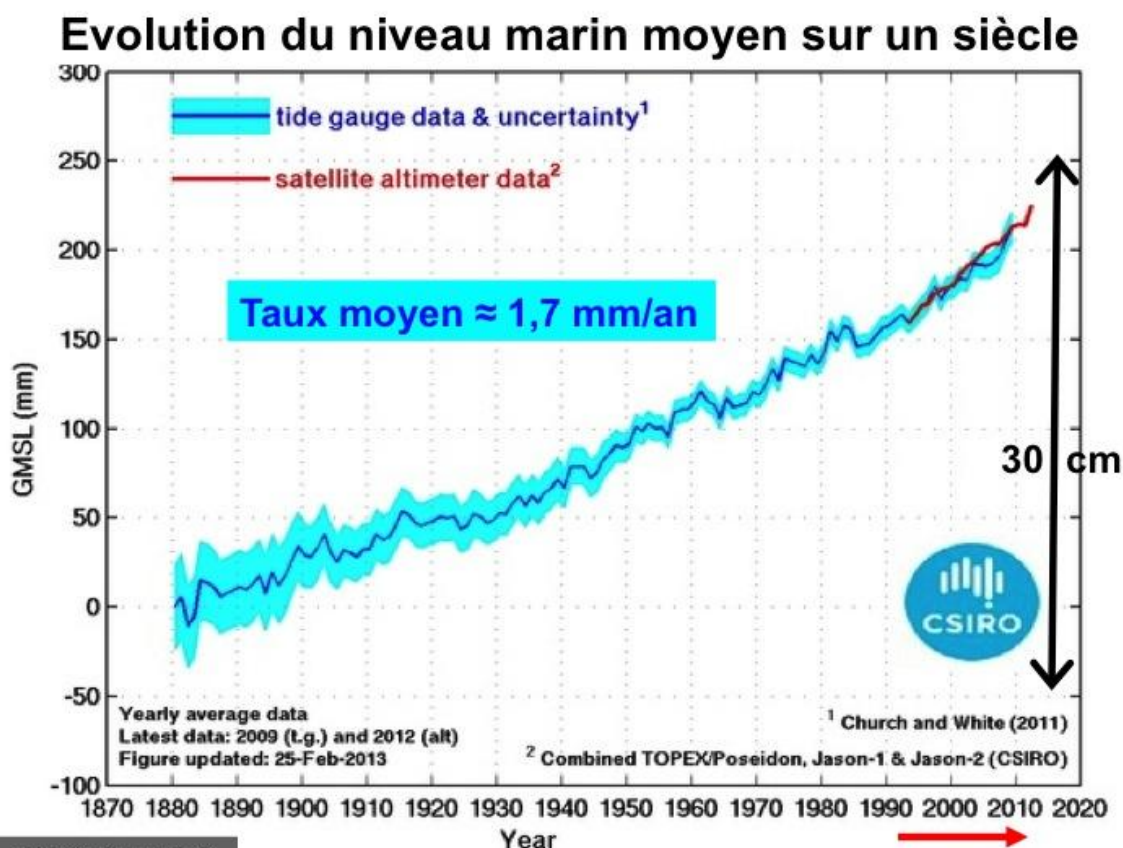


Fig.2 fiche E. Bard

Figure 2 : Evolution du niveau marin moyen sur un siècle (données des marégraphes et des satellites altimétriques ; Church & White 2011).



Depuis le début des années 1990, des satellites permettent de mesurer la topographie de l'océan à l'aide de radars altimétriques. La « hauteur de mer » est donnée par la distance entre le satellite et la surface de la mer en connaissant précisément la position du satellite. Ce positionnement précis est effectué par rapport aux satellites GPS et à des balises au sol. Les données brutes doivent être corrigées de nombreux paramètres physiques. Par exemple la propagation de l'onde radar est perturbée pendant sa traversée de l'atmosphère ainsi qu'à la surface de l'océan en fonction de la météorologie et de l'état de la mer. Il faut aussi les corriger de phénomènes géophysiques comme les marées et le rebond isostatique postglaciaire.

Les données altimétriques ont permis de confirmer la hausse du niveau marin observée par les marégraphes et de préciser un taux d'évolution qui est actuellement de 3,2 mm/an, avec de petites fluctuations interannuelles et décennales principalement liées à l'Oscillation australe (hausse pendant les événements El-Niño et baisses pendant les phases La Niña).

Les données indépendantes de changement de température des eaux de surface et profondes de l'océan permettent de conclure qu'environ un tiers de cette hausse est lié à l'expansion thermique de l'océan (**Figure 3**). Cette conclusion est corroborée par la correspondance des structures locales spatiales des variations positives ou négatives du niveau marin et des températures océaniques.

## Différentes composantes responsables de la remontée actuelle du niveau marin

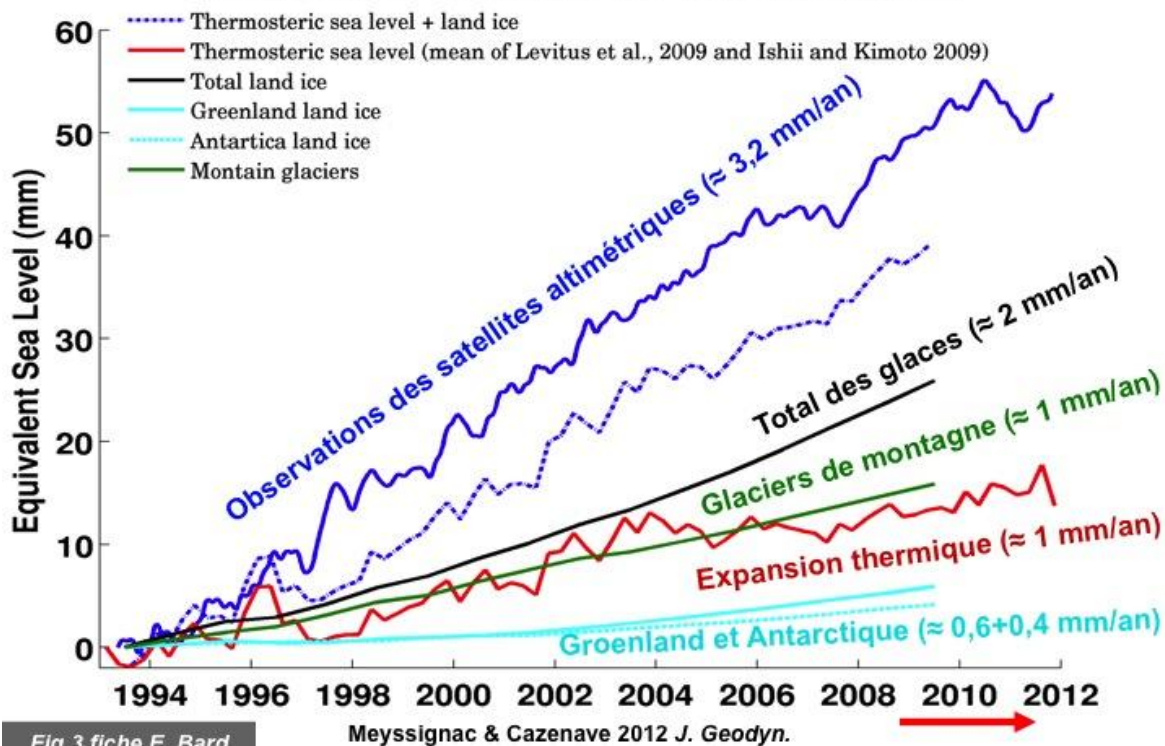


Fig.3 fiche E. Bard

Meyssignac & Cazenave 2012 J. Geodyn.

Figure 3 : Différentes composantes responsables de la remontée actuelle du niveau marin (Meyssignac & Cazenave 2012).



Les gravures et photographies anciennes des fronts des glaciers alpins illustrent un net recul depuis un siècle. Les climatologues ont aussi des données quantitatives montrant qu'il s'agit d'un phénomène généralisé à l'échelle de la planète. Cette fonte des glaciers de montagne contribue actuellement pour environ un millimètre par an de montée du niveau marin global (**Figure 3**).

En plus de ces glaciers, il faut aussi prendre en compte la contribution des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique. Des données de terrain et de télédétection montrent que les fontes estivales du Groenland ont augmenté environ de moitié au cours des trente dernières années. De plus, une grande partie de la perte de masse des calottes est concentrée géographiquement au niveau de glaciers débouchant sur la mer en produisant de grandes quantités d'icebergs.

La quantification du bilan de masse des calottes polaires est réalisée aujourd'hui à l'aide de trois types de satellites indépendants permettant de cartographier les variations d'élévation des calottes par altimétrie laser, les variations de vitesse d'écoulement par interférométrie radar et enfin les variations de masse par gravimétrie. Toutes ces données indiquent des contributions importantes des calottes du Groenland et de l'Antarctique représentant actuellement environ un millimètre par an de niveau marin global (**Figure 3**). Des études récentes montrent l'accélération de ces pertes, localisées par gravimétrie spatiale au niveau du sud et de l'ouest du Groenland, ainsi que dans la partie ouest de la calotte Antarctique.

Le bilan des contributions au niveau marin est donc à peu près bouclé en tenant compte des incertitudes associées aux différentes mesures et moyennes. Le taux de 3,2 mm/an observé depuis deux décennies est expliqué par trois composantes, à peu près équivalentes, d'expansion thermique, de fonte des glaciers de montagne et de perte de masse des inlandsis polaires (**Figure 3**). Une vérification partielle de ce bilan est fournie par la quantification de l'augmentation de la masse de l'océan mesurée par les satellites gravimétriques (équivalent aux deux dernières composantes précitées).

### **Le niveau marin va continuer de monter**

En toute logique, les tendances actuelles devraient se poursuivre dans le futur à cause du réchauffement planétaire dû principalement aux émissions de gaz à effet de serre. Différents types de modèles numériques sont utilisés pour établir des projections en fonction des scénarios d'émissions. La composante d'expansion thermique calculée par les modèles océaniques est relativement faible de +20 à +30 cm en 2100.

Le bilan de masse d'un glacier ou d'une calotte doit tenir compte des changements des précipitations et des températures pour quantifier les variations d'accumulation et d'ablation. Les modèles numériques montrent que les glaciers de montagnes et le Groenland contribueront encore à la hausse du niveau marin, mais que l'Antarctique compensera partiellement cette hausse par une augmentation moyenne des précipitations.

Le cumul des effets de volume et de masse converge vers des augmentations allant de +40 à +60 cm pour les scénarios envisagés. Néanmoins, ces chiffres moyens masquent une complexité spatiale importante due aux variations de densité de l'eau de mer et de la circulation océanique, ainsi que de la modification de l'attraction gravitationnelle liée aux nouvelles répartitions de glace et d'eau à la surface de la planète.



L'observation des calottes actuelles et passées, ainsi que la comparaison entre le niveau marin et les simulations numériques depuis vingt ans, démontrent l'importance des phénomènes de dynamique glaciaire et suggèrent clairement leur récente déstabilisation. Ces processus ne sont pas encore modélisés explicitement dans des modèles tridimensionnels atmosphère-océan-glaces. Ce problème est lié à la petite échelle des phénomènes (par ex. production d'icebergs des glaciers émissaires) ou à des difficultés de la prise en compte de certains mécanismes (lubrification basale de la calotte du Groenland, effet de contrefort des plates-formes de glace autour de la calotte Antarctique).

En attendant ces modélisations explicites, des climatologues ont proposé d'approximer ces phénomènes à l'aide de lois simplifiées. Cette approche dite « semi-empirique » est fondée sur l'hypothèse qu'en régime transitoire la vitesse de changement du niveau marin est une fonction croissante du réchauffement mondial. Les valeurs numériques des coefficients de ces équations sont déterminées de façon statistique en utilisant les observations pour le dernier siècle et les derniers millénaires.

A partir des projections de réchauffement issues des modèles climatiques, il est ensuite possible d'extrapoler l'évolution du niveau marin à l'aide de ces lois statistiques. Les chiffres pour 2100 sont plus élevés (maximales supérieures au mètre) que ceux des modélisations climatiques sans prise en compte explicite des phénomènes de dynamique glaciaire (**Figure 4**).

## Projections avec différents scénarios d'émission conduisant à des pCO<sub>2</sub> de 550 à 950 ppm en 2100

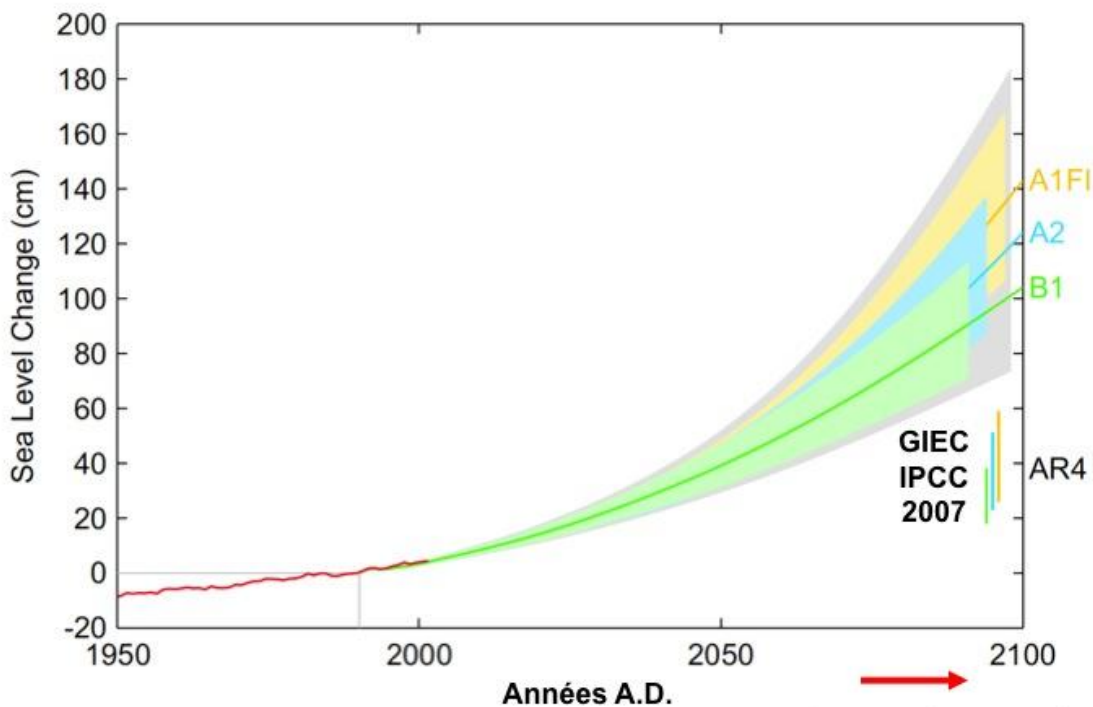


Fig.4 fiche E. Bard

Vermeer & Rahmstorf 2009 PNAS

**Figure 4 :** Projections du niveau marin (Vermeer & Rahmstorf 2009) avec différents scénarios d'émission conduisant en 2100 à des pCO<sub>2</sub> de 550 à 950 ppm (une partie par million en volume correspond à 0,0001 %).



Une autre source d'inquiétude vient du caractère potentiellement instable de l'Antarctique de l'Ouest. Cette instabilité inhérente est liée à la position de la base de cette calotte sous le niveau marin actuel et à la morphologie de la pente du substratum, généralement dirigée vers l'intérieur de la calotte (cette fraction représentant plus de 3 m de niveau marin mondial).

Une telle configuration topographique pourrait favoriser et accélérer la perte de masse de l'Antarctique de l'Ouest, notamment par contact direct avec l'océan environnant, en particulier après disparition des plateformes de glace périphériques. Une éventuelle contribution de l'Antarctique de l'Ouest dans les prochains siècles fait l'objet de recherches actives et de débats sur la probabilité d'un tel risque.

#### **Références citées dans les figures :**

Bard E., Hamelin B., Arnold M., Montaggioni L., Cabioch G., Faure G., Rougerie F. Deglacial sea level record from Tahiti corals and the timing of meltwater discharge. *Nature* 382, 241-244, (1996).

Bard E., Hamelin B., Delanghe-Sabatier D. Deglacial melt water pulse 1B and Younger Dryas sea-levels revisited with new onshore boreholes at Tahiti. *Science* 327, 1235-1237, (2010).

Church J.A., White N.J. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surveys of Geophysics* 32, 585-602, (2011).

Deschamps P., Durand N., Bard E., Hamelin B., Camoin G., Thomas A.L., Henderson G.M., Okuno J., Yokoyama Y. Ice sheet collapse and sea-level rise at the Bølling warming 14,600 yr ago. *Nature* 483, 559-564 (2012).

Meyssignac B., Cazenave A. Sea level: a review of present-day and recent-past changes and variability. *Journal of Geodynamics* 58, 96-109, (2012).

Vermeer M., Rahmstorf S. Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the National Academy of Science* 106, 21527-21532, (2009).

#### **Ouvrage destiné au grand public :**

Bard E. (sous la direction de). L'Océan, le climat et nous : un équilibre fragile ? Editions Le Pommier & Universcience, 168 pp. (2011).