

**Édouard Bard** est professeur au Collège de France. Il travaille au Centre européen de recherche et d'enseignement de géosciences de l'environnement, à Aix-en-Provence. [bardl@cerege.fr](mailto:bardl@cerege.fr)



PATRICK IMBERT, COLLÈGE DE FRANCE

## Édouard Bard

# « L'océan atténue le réchauffement »

Il stocke et répartit la chaleur à la surface du globe. Il absorbe une bonne partie de nos émissions de dioxyde de carbone. Grâce à son inertie, l'océan a jusqu'à présent empêché que le changement climatique ne s'emballe.

### **LA RECHERCHE. Pourquoi faut-il s'intéresser aux océans pour comprendre le climat terrestre ?**

**ÉDOUARD BARD.** Parce que l'océan a quatre rôles principaux dans les processus climatiques. Tout d'abord, il absorbe environ le tiers du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) que nous rejetons. Ensuite, c'est un « tampon » thermique. Du fait de son volume et de la capacité thermique massique\* de l'eau, l'océan stocke d'énormes quantités de chaleur, bien plus que l'atmosphère ou les terres émergées. Depuis la fin des années 1950, plus de 80% du réchauffement,

soit environ  $16 \times 10^{22}$  joules, s'est retrouvé stocké dans l'océan. Troisièmement, par ses mouvements en surface et en profondeur, l'océan transporte la chaleur. La Terre reçoit bien plus de chaleur à l'équateur qu'aux hautes latitudes. En parallèle à la circulation atmosphérique, les courants marins répartissent cette énergie vers les Pôles. Enfin, les océans gèlent en surface, ce qui forme la banquise. Cette immense étendue de glace de mer réfléchit bien mieux les rayons du Soleil que l'eau de mer. Elle a une influence importante sur le bilan radiatif des zones polaires et par là même sur le climat de la planète.

### **Le réchauffement pourrait-il perturber les courants marins ?**

**É. B.** De la surface jusqu'à plusieurs centaines de mètres de profondeur, l'essentiel du mouvement des masses d'eaux est lié à l'énergie mécanique des vents de surface, qui ne devraient pas trop changer, en moyenne. ▶



▷ Mais les circulations plus profondes sont aussi liées aux contrastes de densité des masses d'eau. Ainsi, dans l'Atlantique, les eaux de surface, chaudes et salées, des régions tropicales remontent très loin vers le nord. Ce faisant, elles se refroidissent, ce qui entraîne leur densification. Arrivées en mers du Groenland, d'Islande, de Norvège et du Labrador, elles deviennent si denses qu'elles plongent dans les abysses, permettant l'oxygénation des couches profondes de l'océan Atlantique. Peu à peu, les différentes plongées d'eau profonde se mélangent et forment la masse d'eau profonde Nord-Atlantique, qui transporte environ 15 à 20 millions de mètres cubes par seconde. Cette masse d'eau fait partie d'une circulation océanique à grande échelle souvent représentée, pour la simplifier à l'extrême, par un énorme « tapis roulant » connectant les différents bassins profonds des océans Atlantique, Indien et Pacifique. Cette circulation profonde pourrait être perturbée par le réchauffement, car les changements conjugués de la température et du cycle de l'eau sont de nature à diminuer la densité des eaux de surface de l'Atlantique nord. Une telle diminution pourrait donc déstabiliser une ou plusieurs zones de plongée d'eau profonde. Quelques modélisations suggèrent même qu'une perturbation de la circulation

## La hausse de la concentration de l'eau en dioxyde de carbone générera plus de zones où la vie marine sera impossible

de l'Atlantique a déjà commencé. Mais cette conclusion ne fait pas l'unanimité. Les mesures actuelles montrent, certes, une diminution de la salinité en Atlantique nord, ainsi qu'une augmentation pour la zone intertropicale. On observe aussi quelques fluctuations en Atlantique nord, notamment pour le courant du Labrador ou le transport des masses d'eau en profondeur. Mais s'agit-il de cycles naturels ou d'une tendance à long terme ? Il est encore trop tôt pour avoir des certitudes.

### Intéressons-nous maintenant à l'absorption du CO<sub>2</sub>. Comment s'effectue-t-elle ?

É. B. Le CO<sub>2</sub> diffuse à l'interface air-mer et se mélange dans une couche d'une centaine de mètres grâce à l'effet mécanique du vent. En se dissolvant, il forme de l'acide carbonique, qui se dissocie en ions et se mêle aux autres espèces chimiques du système des carbonates. Le CO<sub>2</sub> est ainsi transporté dans les couches profondes de l'océan par les différentes masses d'eau. Cette plongée des eaux n'a lieu que dans quelques zones bien particulières dites « de convection profonde et intermédiaire ». On a suivi cette plongée du CO<sub>2</sub> en mesurant l'évolution du CO<sub>2</sub> dissous ainsi qu'en analysant les taux de carbone-14 pour de nombreux sites et de multiples profondeurs des océans. La forte augmentation de la

[1] G. De'ath et al., *Science*, 323, 116, 2009.

[2] J. Silvermann et al., *Geophys. Res. Lett.* 36, L05606, 2009.

[3] Peter G. Brewer et Edward T. Peltzer, *Science*, 324, 347, 2009.

[4] L. Stramma et al., *Science*, 520, 655, 2008.

[5] L. Pichevin et al., *Global Biogeochem. Cycles*, 21, GB4008, 2007.

concentration atmosphérique en carbone-14 au début des années 1960, à cause des essais nucléaires atmosphériques, sert en effet de marqueur pour l'absorption océanique du CO<sub>2</sub>. Les analyses ont montré que l'essentiel de l'excès de CO<sub>2</sub> anthropique est actuellement stocké dans la masse d'eau profonde de l'Atlantique nord, ainsi que dans les eaux intermédiaires plongeant dans l'océan Austral et le Pacifique nord. Le facteur qui limite la séquestration du CO<sub>2</sub> anthropique dans les profondeurs de l'océan est la plongée des eaux chargées en CO<sub>2</sub>. Si cette circulation océanique intermédiaire et profonde ralentissait, le CO<sub>2</sub> serait moins absorbé ce qui tendrait à augmenter encore la teneur atmosphérique. Pour l'instant une éventuelle diminution de la circulation profonde est encore un sujet de controverse, car les données hydrographiques ne nous donnent pas un recul ou une précision suffisants.

### Cette absorption du CO<sub>2</sub> risque-t-elle de ralentir, voire de s'arrêter ?

É. B. Pour l'instant, on n'observe pas de ralentissement significatif du « pompage » océanique lorsque l'on compare les bilans en CO<sub>2</sub> depuis le XIX<sup>e</sup> siècle ou sur les deux dernières décennies. La difficulté des prévisions est aussi liée au fait que le pompage n'est pas uniforme à la surface des océans. Indépendamment des changements récents, l'absorption dépend, naturellement, de la température qui agit sur la solubilité, de la turbulence en surface qui favorise les échanges de gaz ou de la banquise qui les freine. Elle dépend aussi fortement de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'eau de surface qui est liée à son « histoire » océanographique, en particulier à la reminéralisation progressive de la matière organique synthétisée par le plancton (lire « Turbulences en haute mer », p. 74). Certaines zones de l'océan fonctionnent donc comme des puits de carbone alors que d'autres constituent des sources. Néanmoins, l'océan global est le principal puits de carbone qui devrait continuer de stocker le CO<sub>2</sub> anthropique. Le problème pour le prochain siècle est que l'océan est trop lent pour éviter totalement l'augmentation de la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub>. D'autant plus que le bilan des rétroactions\* climatiques et chimiques va dans le sens d'une diminution de la capacité de l'océan à pomper et à stocker le CO<sub>2</sub> anthropique.

### Justement, quelles sont les conséquences sur les océans de l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> ?

É. B. En se combinant à l'eau, le CO<sub>2</sub> forme un acide faible. Cet acide carbonique tend à faire diminuer le pH\* des eaux de surface : une diminution d'environ 0,1 unité pH depuis un siècle. Des mesures directes de la chimie des eaux de surface ont été réalisées pour quelques stations océanographiques, indiquant une diminution progressive d'environ 0,02 unité pH par

\* La **capacité thermique massique** est la quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré la température d'un kilogramme d'une substance.

\* La **rétroaction** provoque des changements qui influencent le processus initial.

\* Le **pH**, abréviation du terme potentiel hydrogène, est d'autant plus faible que l'eau est acide.

décennie. Malheureusement, cela devrait continuer. Selon les quantités de  $\text{CO}_2$  qui seront émises au cours du siècle, le pH de l'océan devrait encore diminuer de 0,1 à 0,4. En plus des conséquences déjà mentionnées sur le « pompage » physico-chimique, l'acidification combinée au réchauffement des masses d'eau aura des conséquences sur la vie marine, en particulier les organismes dont la coquille est formée de calcaire. L'acidification entraîne un déplacement des équilibres acido-basiques et donc une diminution en ions carbonates. Ainsi, une étude, parue cette année, montre que la calcification des coraux de la Grande Barrière australienne a diminué depuis vingt ans [1]. Un autre article encore plus récent montre que si la teneur atmosphérique de  $\text{CO}_2$  dépasse 550 parties par million (elle est aujourd'hui d'environ 390 parties par million), les coraux pourraient s'arrêter de croître et commencer à se dissoudre [2]. Selon les scénarios d'utilisation des combustibles fossiles, cette concentration sera atteinte entre 2050 et 2100.

#### Les organismes de surface seraient-ils les seuls touchés ?

**É. B.** Non. Deux chercheurs du Monterey Bay Aquarium Research Institute, en Californie, préviennent que le nombre de « zones mortes » dans les océans, c'est-à-dire de zones où toute vie aérobie est impossible, va croître avec la hausse des concentrations de  $\text{CO}_2$  et la diminution des teneurs en oxygène [3]. On a détecté récemment une diminution généralisée de la teneur en oxygène dissous des masses d'eau intermédiaires, même si les causes physiques, chimiques et biologiques restent encore à quantifier [4]. L'extension de ces zones pauvres en oxygène devrait être favorable aux bactéries qui utilisent les nitrates dissous lorsque les teneurs en oxygène sont trop faibles pour permettre une vie aérobie. Leur métabolisme conduit à une diminution locale de la teneur en nitrates, mais aussi à la synthèse de protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) qui diffuse dans l'atmosphère. Ce fameux gaz « hilarant » ne l'est pas forcément pour le climat. Le  $\text{N}_2\text{O}$  est aussi un puissant gaz à effet de serre (environ 250 fois plus que la molécule  $\text{CO}_2$ ) dont la teneur a déjà augmenté de 20% à cause de nos activités agricoles et industrielles. Une nouvelle source océanique n'émerge pas encore, mais il est utile de se tourner vers les archives du passé ancien [5], sédiments marins et carottes de glace, pour étudier les relations complexes entre le climat, la circulation des eaux de surface et intermédiaires, leur acidité, teneur en oxygène et en nitrates, ainsi que dans l'atmosphère les pressions partielles en  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  et méthane [5].

Propos recueillis par Cécile Michaut

#### POUR EN SAVOIR PLUS

- ▷ « Climat, ce qui va changer », *La Recherche*, juillet 2006.
- ▷ « Le défi climatique », *Les Dossiers de La Recherche* n°31, mai 2008.

# Boutique

## La RECHERCHE

[www.larecherche.fr/boutique](http://www.larecherche.fr/boutique)

PAIEMENT CB SÉCURISÉ    EXPÉDITION RAPIDE    SIMPLICITÉ D'UTILISATION    PLUS DE 100 RÉFÉRENCES

### DVD : $E=MC^2$ , une biographie de l'équation

Basé sur le best-seller de David Bodanis, ce DVD raconte l'histoire des cinq grands scientifiques qui ont permis à Albert Einstein de parvenir à l'équation qui est à l'origine des applications les plus fondamentales en physique atomique et en astrophysique.



Prix : 24,57 €\*

### Ensemble électrostatique Produit Jeulin

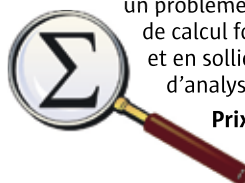


Cet ensemble vous permettra de mettre en évidence les phénomènes électrostatiques élémentaires : électrisation par frottement, existence des deux électricités (positive et négative), notion de charges électriques et de forces électriques.

Prix : 27,53 €\*

### DéTECTIVES en mathématiques CD-Rom ScienceActive

Evolution, cette publication interactive, livrée sur CD-Rom, rassemble plusieurs questions posées à l'oral des concours d'entrée aux grandes écoles scientifiques et propose une nouvelle façon d'aborder un problème en s'aidant de l'outil de calcul formel et numérique Mathcad et en sollicitant ses capacités d'analyse, de réflexion et de synthèse.



Prix : 54,88 €\*

\* Frais de port inclus en France métropolitaine

Toutes les informations sur nos produits sur [www.larecherche.fr](http://www.larecherche.fr)