



L'océan, pompe à carbone

Laurent Bopp*,
(LSCE, Gif-sur-Yvette)

Chris Bowler*,
(ENS, Paris)

Lionel Guidi,
(CNRS UPMC,
Villefranche-sur-Mer)

Éric Karsenti,
(EMBL)

Colomban de Vargas
(CNRS UPMC, Roscoff)

* auteurs principaux

L'océan contient 50 fois plus de carbone que l'atmosphère et il échange chaque année des quantités importantes de carbone avec cette dernière. Au cours des dernières décennies, l'océan a ralenti le rythme du changement climatique anthropique en absorbant près de 30 % des émissions anthropiques de dioxyde de carbone. Alors que cette absorption de carbone anthropique est le résultat de processus physico-chimiques, la biologie marine joue un rôle clé dans le cycle du carbone naturel en séquestrant de grandes quantités de carbone dans les eaux de l'océan profond. Des modifications de ces processus physiques, chimiques ou biologiques, pourraient conduire à des rétroactions dans le système climatique et ainsi accélérer ou ralentir le changement climatique en cours. Ces rétroactions entre climat, l'océan et ses écosystèmes ont besoin d'être mieux comprises afin de pouvoir prédire de façon plus solide l'évolution des caractéristiques de l'océan du futur, et l'évolution combinée du CO₂ atmosphérique et de notre climat.

UN RÔLE MAJEUR POUR L'OCÉAN DANS L'ÉVOLUTION DU CO₂ ATMOSPHÉRIQUE

Le cycle du carbone implique toute une série de processus physiques, chimiques et biologiques, qui contribuent aux échanges de carbone entre plusieurs réservoirs du système Terre. Alors que le cycle global du carbone était à peu près équilibré avant les débuts de l'ère industrielle, le CO₂ atmosphérique a augmenté de près de 40 % au cours des derniers 200 ans, passant de moins de 0,03 % à plus de 0,04 % du réservoir atmosphérique. Cette augmentation s'explique par les émissions induites par la combustion des combustibles fossiles, par la production de ci-

ment, et par la déforestation et d'autres changements dans l'utilisation des terres. On considère aujourd'hui qu'un changement de cette rapidité est au moins dix fois plus rapide que les changements reconstruits pour les 65 derniers millions d'années au moins (Portner *et al.*, 2014; Rhein *et al.*, 2014.).

Depuis les débuts de la période industrielle, l'océan joue un rôle primordial dans l'évolution du CO₂ atmosphérique en absorbant une part significative du CO₂ émis dans l'atmosphère par les activités anthropiques. Au cours de la dernière décennie (2004-2013), l'océan mondial a absorbé 2,6 milliards de tonnes de carbone par an, ce qui représente près de 30 % des émissions anthropiques sur cette période. Depuis 1870, la quan-



tité de carbone absorbée par l'océan s'élève à 150 milliards de tonnes – également 30 % des émissions anthropiques sur cette période. En absorbant ce CO_2 , l'océan contribue ainsi à ralentir le changement climatique anthropique induit par l'augmentation de ce gaz à effet de serre.

UN CYCLE DU CARBONE OCÉANIQUE NATUREL IMPLIQUANT PHYSIQUE ET BIOLOGIE MARINE

Mais ce carbone anthropique absorbé à l'océan s'ajoute à un réservoir naturel de carbone considérable. L'océan contient près de 40 000 milliards de tonnes de carbone, principalement sous forme de carbone inorganique dissous dans l'eau de mer. Cette quantité représente 50 fois le réservoir atmosphérique. Chaque année, l'océan échange de façon naturelle près d'une centaine de milliards de tonnes de C, sous forme de CO_2 , avec l'atmosphère.

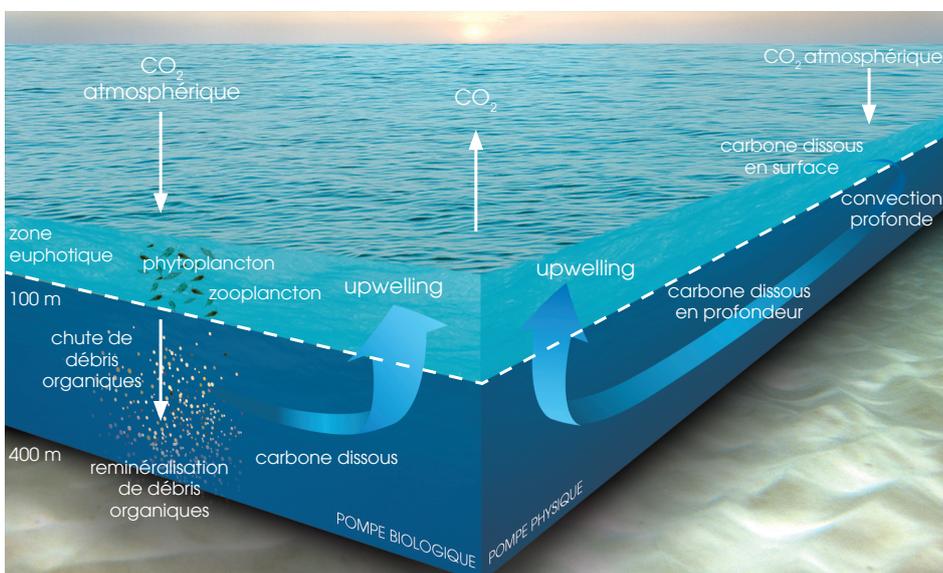
Ce carbone dans l'océan, en grande majorité sous forme d'ions bicarbonates (HCO_3^-), n'est pas réparti de façon homogène. Les concentrations sont plus élevées en profondeur qu'en surface et cette inégale répartition du carbone entre surface et fond exerce un contrôle sur le CO_2 de l'atmosphère parce que seul le carbone inorganique de la couche de surface est

au contact avec l'atmosphère et contribue aux échanges de CO_2 avec l'atmosphère.

Ce gradient vertical de carbone dans l'océan s'explique à la fois par des processus physico-chimiques et des processus biologiques.

• Processus Biologiques

Le phytoplancton océanique vit dans la couche éclairée de l'océan et utilise l'énergie du soleil pour effectuer la photosynthèse. Ces organismes utilisent les nutriments disponibles dans l'eau de mer, ainsi que carbone inorganique dissous, pour produire de la matière organique. La production de cette matière organique est appelée production primaire. Elle représente la base des chaînes trophiques dans l'océan, socle à partir duquel d'autres organismes non photosynthétiques peuvent se nourrir. Cette activité photosynthétique est donc un mécanisme efficace pour extraire le CO_2 de l'atmosphère et le transférer vers les organismes vivants. Étonnamment, les organismes marins qui contribuent à la production primaire ne représentent qu'une petite fraction du carbone organique (~ 3 milliards de tonnes de carbone) dans l'océan, mais ils sont capables de générer de grandes quantités de carbone organique chaque année (près de 50 milliards de tonnes par an ou 50 PgC) pour soutenir les chaînes alimentaires, car leur taux de renouvellement est très rapide, de quelques jours à plusieurs semaines.



Cycle du carbone naturel et représentation des pompes biologique et physique (Bopp *et al.* 2002).

Avant d'être séquestré en profondeur, le carbone atmosphérique fixé par les organismes photosynthétiques subit une série de transformations: le phytoplancton peut être directement consommé par le zooplancton, ou indirectement par des bactéries hétérotrophes, qui seront à leur tour mangés par les plus grands organismes. Au total, seule une fraction de la matière organique ainsi



produite quitte la couche de surface sous forme de particules (cellules mortes, détritiques, pelotes fécales...), transférant ainsi le carbone de surface vers les couches profondes de l'océan (Figure). Chaque année, près de 10 milliards de tonnes de carbone sont ainsi exportées à partir de la couche de surface et sont responsables de la plus grande partie du gradient vertical de carbone. Tous ces processus qui contribuent au rôle de la biologie marine sur le cycle du carbone dans l'océan et constituent ce que l'on appelle la pompe biologique de carbone (Figure).

Seule une toute petite fraction ($\sim 0,2 \text{ PgCyr}^{-1}$) du carbone exporté par des processus biologiques atteint le fond des océans et peut être stocké dans du matériel sédimentaire pour des millénaires. (Denman *et al.*, 2007; Ciais *et al.*, 2014); ce mécanisme biologique permet de soustraire du carbone du système océan-atmosphère pour de très longues périodes de temps.

Au cours des échelles de temps géologiques, la pompe biologique de carbone a conduit à la formation de dépôts pétrolifères qui alimentent aujourd'hui notre économie. Considérant que, chaque jour, de grandes quantités de CO_2 , piégées pendant des millions d'années, sont rejetées dans l'atmosphère (l'ordre de grandeur est maintenant probablement d'environ un million d'années de carbone piégé brûlé par l'humanité chaque année), il est plus aisé de comprendre la rapidité du changement climatique en cours.

- **Processus physico-chimiques**

Une deuxième série de processus, physico-chimiques cette fois, contribue aussi à cette inégale répartition du carbone sur la verticale. Le refroidissement des eaux de surface aux hautes latitudes augmente leur capacité à dissoudre du CO_2 atmosphérique (principalement en augmentant la solubilité du gaz) tout en augmentant leur densité. Ces eaux plongent alors en profondeur, emportant avec elles le CO_2 qui sera soustrait à tout contact avec l'atmosphère, contribuant ainsi au gradient vertical de carbone océanique. On parle dans ce cas de pompe physique ou de pompe de solubilité.

Mais même si les processus biologiques sont responsables de la majorité du gradient vertical du carbone naturel dans l'océan, ce sont des processus physico-chimiques qui expliquent le puits de carbone anthropique aujourd'hui. En effet, l'excès de CO_2 dans l'atmosphère va conduire à un flux net de carbone vers l'océan à cause du déséquilibre induit entre concentration atmosphérique et concentration océanique. Puis ce CO_2 anthropique, une fois dans les eaux de surface, va être transporté par les courants marins et mélangé avec les eaux de sub-surface.

UNE SATURATION DU PUIITS DE CARBONE OCÉANIQUE ?

Jusqu'à ce jour, et ce depuis les débuts de la période industrielle, l'océan a continué à absorber chaque une part à peu près constante du CO_2 anthropique émis par l'Homme. Mais de nombreuses études, basées sur des considérations théoriques, conduites à partir d'observations *in situ*, d'expériences contrôlées en laboratoire, ou à partir de l'utilisation de modèles, suggèrent que plusieurs processus pourraient amoindrir ou ralentir ce puits de carbone naturel.

La première série de processus est liée à la chimie des carbonates (les échanges entre CO_2 , HCO_3^- et CO_3^{2-}) et conduit à terme à une saturation du puits océanique de carbone. En effet, la dissolution du gaz carbonique anthropique diminue le contenu océanique en ions carbonates et donc le pouvoir tampon de l'océan, ce qui augmente la proportion de CO_2 vis à vis des autres espèces de carbone inorganique dissous et diminue l'efficacité du puits. Ce même phénomène conduit en parallèle à ce que l'on appelle l'acidification de l'océan et pourrait avoir des conséquences potentielles sur les écosystèmes océaniques.

La deuxième série de processus est liée à la rétroaction climat — cycle du carbone. Il s'agit de la rétroaction du changement climatique anthropique sur les différents phénomènes d'absorption du carbone. Le changement climatique se traduit par des modifications de la température de l'eau, des courants marins, de la production biologique océanique. Si ces



modifications augmentent le puits de carbone, elles freineront le changement climatique et induiront une rétroaction négative. Au contraire, dans l'hypothèse d'une diminution du puits, ces changements vont conduire à une rétroaction positive qui accélérera le phénomène.

Là encore, plusieurs processus sont en jeu. Le réchauffement des eaux par exemple réduit le puits de carbone océanique : une augmentation de 2 ou 3 °C de la température des eaux de surface diminue la solubilité du CO₂ de quelques pourcents, et donc la capacité de l'océan à absorber le gaz carbonique. Un autre effet pourrait encore accentuer la saturation du puits. En réponse à l'augmentation des températures, les modèles climatiques prédisent un accroissement de la stratification verticale de l'océan : autrement dit, le mélange vertical qui tend à homogénéiser les eaux profondes et superficielles diminuerait. Cette stratification limitera la pénétration du CO₂ anthropique vers les profondeurs...

Quant à la pompe biologique, son devenir est difficile à prédire. Une estimation de l'effet des modifications des écosystèmes marins sur le puits océanique de carbone, même qualitative, reste encore hautement spéculative. Parce que l'activité de la pompe biologique est fortement liée à la production primaire, il est important de tenir compte des effets du changement climatique sur l'activité photosynthétique. Sur les continents, comme la concentration en CO₂ est généralement un facteur limitant de la photosynthèse, l'augmentation du CO₂ anthropique tend à stimuler la croissance des plantes (effet connu comme un effet de fertilisation du dioxyde de carbone). Cela ne semble pas être le cas dans les systèmes marins en raison des concentrations élevées de carbone inorganique dissous (DIC). La photosynthèse est cependant fortement affectée par des modifications de la température de l'eau qui a considérablement augmenté au cours des 150 dernières années. En plus de la température, la lumière et la limitation par les nutriments (González-Taboada et Anadón, 2012; Portner *et al.*, 2014) sont susceptibles d'affecter l'activité photosynthétique, comme le sont l'oxygène, le pH et la salinité.

Les approches de modélisation prédisent une réduction globale de la production primaire de l'océan en réponse au changement climatique, mais avec des variations importantes en fonction de la latitude. L'un des facteurs conduisant à cette réduction est lié à l'expansion prévue des gyres oligotrophes et à la diminution des concentrations de nutriments en surface de l'océan à cause d'une intensification de la stratification océanique. Les projections climatiques indiquent par contre une augmentation de la production primaire aux hautes latitudes en raison de la fonte de la banquise.

Enfin, il faut aussi estimer quels types d'espèces planctoniques vont dominer l'écosystème en réponse à ces modifications. Car la composition du plancton peut influencer considérablement sur l'absorption du CO₂. Le cas de certaines algues phytoplanctoniques, les diatomées, est particulièrement significatif. Du fait de leur taille relativement importante par rapport aux cellules du phytoplancton (de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres), ces cellules peuvent couler assez facilement et sont donc responsables d'une part importante du carbone exporté vers l'océan profond. Or, les diatomées sont particulièrement sensibles à une diminution des concentrations en sels minéraux. D'autres cellules phytoplanctoniques, abondantes dans l'océan, mais de très petit diamètre (< 10 µm), sont moins gourmandes et pourraient les remplacer. Leur taille fait qu'elles sont majoritairement recyclées dans la couche de surface, et ne participent donc que peu au stockage du carbone dans les profondeurs. Un déséquilibre du rapport diatomées/petites cellules pourrait singulièrement perturber l'intensité de la pompe biologique.

Malgré ces multiples niveaux d'incertitude, dont le plus important est la réponse du vivant au changement climatique, les différentes projections réalisées avec des modèles numériques couplant système climatique et cycle du carbone, mettent tous en évidence un amoindrissement du puits océanique sous l'effet du réchauffement actuellement en cours. Sans aller jusqu'à transformer ce puits océanique en source, cette diminution affectera l'évolution



du CO₂ dans l'atmosphère et, à terme, le changement climatique lui-même. Les rétroactions climat/cycle du carbone (incluant également la réponse de la biosphère terrestre au changement climatique) pourraient être responsables d'une augmentation « supplémentaire » du CO₂ atmosphérique de plusieurs dizaines de ppm à l'horizon 2100!

L'évolution du puits de carbone océanique, tel que prédit par les modèles couplant climat et cycle du carbone à l'échelle globale, reste largement incertaine. Le dernier rapport du GIEC pointe un certain nombre de processus, très mal contraints, et qui explique la forte gamme d'incertitude associée à ces projections: on peut citer en premier lieu la réponse du vivant au changement climatique et les modifications de la pompe biologique, mais d'autres séries de processus liées à la représentation des petites échelles spatiales (tourbillons), à la prise en compte des zones côtières particulièrement complexes sont également mentionnées.

UN RÔLE DANS D'AUTRES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES

Enfin, il faut souligner qu'au-delà son rôle dans le cycle du carbone et dans l'évolution du CO₂ atmosphérique, l'océan joue également un rôle clé dans d'autres grands cycles biogéochimiques, pouvant influencer le climat de notre planète.

Au milieu des années 1980, plusieurs scientifiques dont le Britannique James Lovelock, proposent que les écosystèmes océaniques, et en particulier le phytoplancton, soient capables de réguler le climat de notre planète en libérant un gaz soufré, le sulfure de diméthyle ou DMS. Une fois dans l'atmosphère, ce gaz s'oxyde et conduit à la formation de toutes petites particules sulfatées, qui jouent le rôle de noyau de condensation pour les nuages et contribuent donc à augmenter la couverture nuageuse. L'hypothèse proposée, que l'on appelle encore hypothèse CLAW (d'après la première lettre du nom de chacun des auteurs), stipule que l'écosystème océanique réagit à une augmentation de tem-

pérature en augmentant sa productivité, ce qui conduit à une augmentation des émissions de DMS, et donc à un refroidissement grâce à l'augmentation de couverture nuageuse. C'est une boucle de rétroaction négative, auto-régulatrice. C'est un des exemples de régulation qui ont permis à Lovelock de construire la théorie de Gaïa selon laquelle plusieurs processus auto-régulateurs, dont celui impliquant le cycle du soufre, permettent de considérer la Terre comme un organisme vivant.

Plus de 20 ans plus tard, les recherches menées ont révélé la complexité du cycle du soufre dans l'océan, mais elles n'ont pas permis de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. Nous ne savons toujours pourquoi le phytoplancton libère certains composés soufrés, précurseurs du DMS. Nous ne savons pas non plus si le changement climatique anthropique conduira à une diminution ou à une augmentation des émissions de DMS par l'océan...

UNE MANIPULATION DE LA POMPE À CARBONE POUR COMPENSER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les activités humaines ont perturbé l'équilibre du cycle du carbone et ont brutalement contribué à la modification de la composition de l'atmosphère de la Terre, comme les bactéries, protistes et la biosphère en général ont joué un rôle dans la formation de l'atmosphère de la Terre dans le passé.

Comme d'autres événements qui ont marqué l'histoire de notre planète dans le passé, ces changements provoqués par les activités humaines affectent de manière significative le système terrestre. Notre devoir en tant qu'habitants de la planète Terre est maintenant de formuler des prévisions les plus fiables possibles des changements à venir, et de réagir de la meilleure façon possible pour limiter ces modifications et s'adapter aux modifications inévitables.

Des études ont suggéré que l'augmentation artificielle de la pompe à carbone océanique



pourrait améliorer la séquestration du carbone dans l'océan, contrebalançant ainsi le changement climatique induit par le CO₂. Par exemple, la productivité primaire du phytoplancton pourrait être stimulée par l'ajout de nutriments tels que le fer dans les eaux où ce nutriment limite la productivité du phytoplancton. Il n'existe actuellement pas de consensus sur l'efficacité de ces méthodes, qui se sont limitées pour l'instant à quelques expériences de terrain. En outre, les approches de géo-ingénierie alternatives axées sur la gestion du rayonnement solaire ne sont

pas capables de résoudre le problème de l'acidification des océans.

Pour conclure, il reste essentiel de protéger la pompe à carbone océanique qui contribue à plus de la moitié du CO₂ séquestré chaque jour. Cela ne peut se faire en préservant les océans, leur vie marine et leurs écosystèmes planctoniques. Le bilan carbone des différentes parties du cycle du carbone doit également être mieux caractérisé par la réalisation de nouvelles recherches fondamentales dans ce domaine.

RÉFÉRENCES

- BOPP L., LEGENDRE L. et MONFRAY P., 2002 - *La pompe à carbone va-t-elle se gripper*. *La Recherche*, 355, 48-50.
- CHARLSON R. J., LOVELOCK J. E., ANDREAE M. O. and WARREN S. G., 1987 - *Oceanic Phytoplankton, Atmospheric Sulphur, Cloud Albedo and Climate*. *Nature*, 326, 655-661.
- CIAIS P., SABINE C., BALA G., BOPP L., BROVKIN V., CANADELL J., CHHABRA A., DEFRIES R., GALLOWAY J., HEIMANN M., JONES C., LE QUÉRÉ C., MYNENI R. B., PIAO S. and THORNTON P., 2013 - *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*. 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.
- DENMAN K. L., BRASSEUR G., CHIDTHAISONG A., CIAIS P., COX P. M., DICKINSON R. E., HAUGLUSTAINE D., HEINZE C., HOLLAND E., JACOB D., LOHMANN U., RAMACHANDRAN S., DA SILVA DIAS P. L., WOFSY S. C. and ZHANG X., 2007 - *Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry*. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- GONZÁLEZ-TABOADA F. and ANADÓN R., 2012 - *Patterns of Change in Sea Surface Temperature in the North Atlantic During the Last Three Decades: Beyond Mean Trends*. *Climatic Change*, 115, 419-431.
- LE QUÉRÉ C. *et al.*, 2014 - *Global Carbon Budget*. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, 7, 521-610.
- PÖRTNER H.-O., D. KARL M., BOYD P. W., CHEUNG W. W. L., LLUCH-COTA S. E., NOJIRI Y., SCHMIDT D. N. and ZAVIALOV P.O., 2014 - *Ocean Systems*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- RHEIN M., RINTOUL S. R., AOKI S., CAMPOS E., CHAMBERS D., FEELY R. A., GULEV S., JOHNSON G. C., JOSEY S. A., KOSTIANOV A., MAURITZEN C., ROEMMICH D., TALLEY L. D. and WANG F., 2013 - *Observations: Ocean*. 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.