

UNE CHIMIE DE LA MER POUR L'AVENIR DE LA TERRE

Emmanuel Durocher, Jean-Pierre Labbé, Jean-Claude Bernier

D'après l'article *Les grandes questions en sciences chimiques de l'environnement marin* de Paul Tréguer publié dans l'ouvrage « La chimie et la mer » EDP Sciences, 2009, ISBN : 978-2-7598-0426-9

INTRODUCTION

Cette fiche va s'intéresser aux océans de la planète terre en rappelant d'abord leur étendue et leur importance, puis leur influence sur le climat par leur dynamique. L'activité humaine et notamment l'utilisation de ressources naturelles et l'augmentation des gaz à effet de serre peuvent perturber la physicochimie des océans qui restent cependant une source de richesses.

L'OCÉAN, UN ACTEUR MAJEUR DANS L'ENVIRONNEMENT PLANÉTAIRE

L'océan, qui occupe plus de 70 % de la surface terrestre, peut être mieux connu grâce à l'étude

conjointe de la Terre et de son océan : notamment en étudiant la variation mensuelle du couvert végétal de l'océan mondial et des continents (Figure 1), et les variations du climat pour mieux comprendre les interactions avec l'océan (1) (Figure 2).

La chimie permet de comprendre les échanges de matière et d'énergie – au passé et au présent – qui ont lieu entre les différentes composantes du système Terre (Figure 3). On espère ainsi prévoir notre avenir.

L'océan est une composante importante qui peut être caractérisée par différents facteurs :

- **physique** : l'océan obéit aux lois de la mécanique des fluides et son volume est variable : en fonction

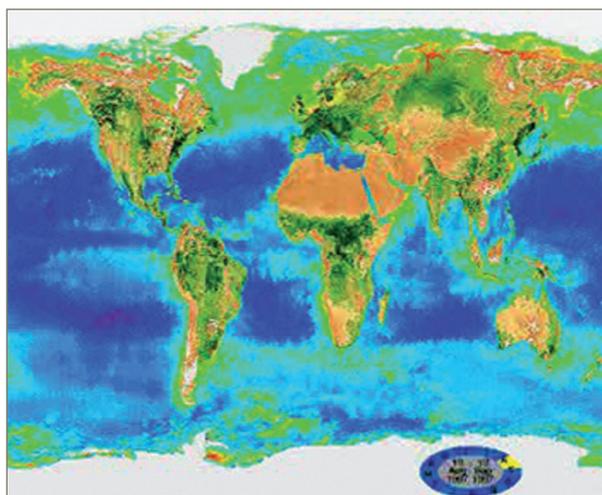


Figure 1 – Des capteurs embarqués à bord de satellites nous permettent de connaître la distribution du couvert végétal des continents et des océans, et sa variabilité temporelle à l'échelle mensuelle et annuelle. Les zones peu productives (en bleu ou violet, au centre des grands tourbillons océaniques des hémisphères Nord et Sud) sont celles qui sont pauvres en matières nutritives.
Source : SeaWifs.

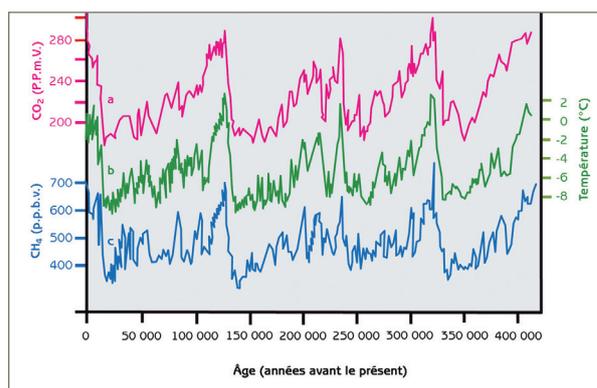


Figure 2 – Grâce aux enregistrements des calottes glaciaires, en particulier dans l'Antarctique, nous pouvons reconstituer la variation des principaux paramètres caractéristiques du climat de la Terre à l'échelle globale. À noter la croissance spectaculaire et rapide des teneurs en dioxyde de carbone CO_2 et en méthane CH_4 au temps présent. Ces teneurs sont bien plus élevées que celles des quatre précédents cycles glaciaires (minimum thermique) et interglaciaires (maximum thermique).
p.p.m.v. = partie par million en volume ;
p.p.b.v. = partie par milliard en volume.

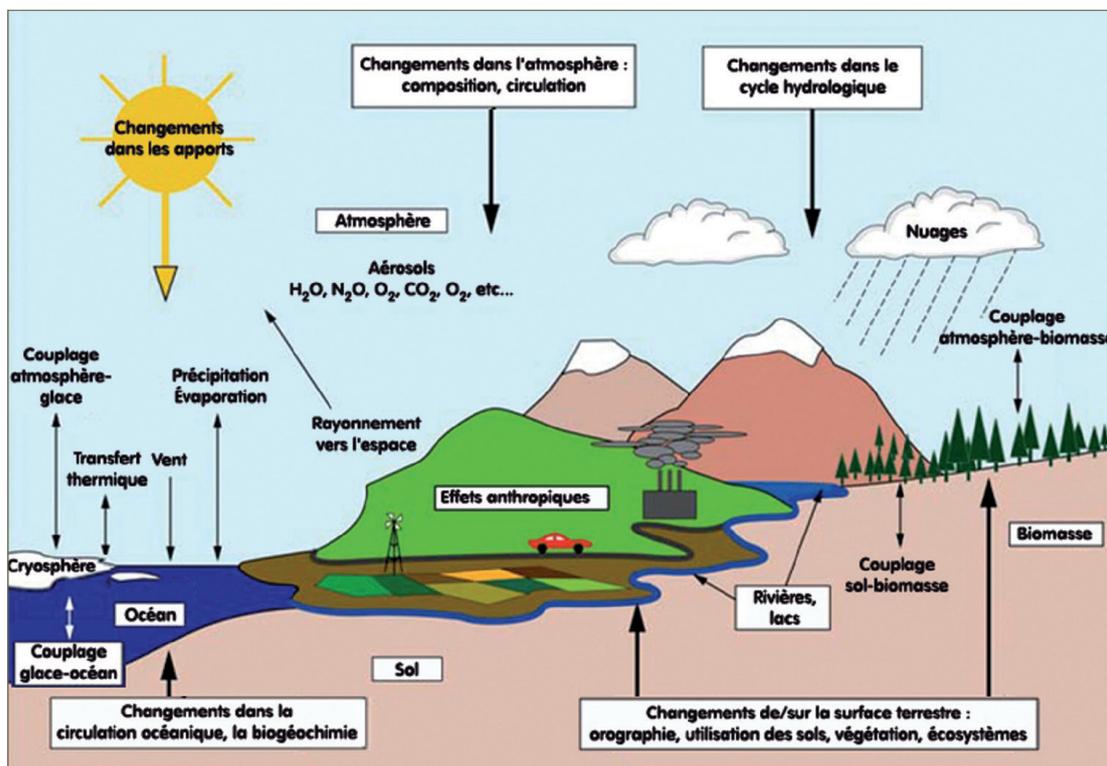


Figure 3 – Le système couplé atmosphère-hydrosphère-cryosphère-lithosphère-biosphère (dont anthroposphère) de la planète Terre, dont l’océan est une composante.
Source : International Panel for Climate Change, 1999.

des transferts thermiques, il est soumis à la dilatation qui conditionne actuellement, et pour une large part, les variations du niveau de la mer ;

- **chimique** : la mer est composée d’eau et de « sels minéraux » [2] dont la quantité totale est relativement constante (en moyenne environ 35 g/L pour le chlorure de sodium par exemple). Cependant, la mer Baltique est peu salée (environ cinq fois moins que la moyenne) alors que la mer Morte, fermée, l’est environ dix fois plus que la

moyenne. Certains ions (nitrates, phosphates) sont dits nutritifs et leur répartition est inégale (Figure 4).

Par ailleurs l’acidité dépend principalement de la teneur en acide carbonique donc de la concentration en CO_2 :

- **géologique** : l’interaction avec la lithosphère (partie supérieure de la surface terrestre) conditionne l’expansion de l’océan et modifie sa composition

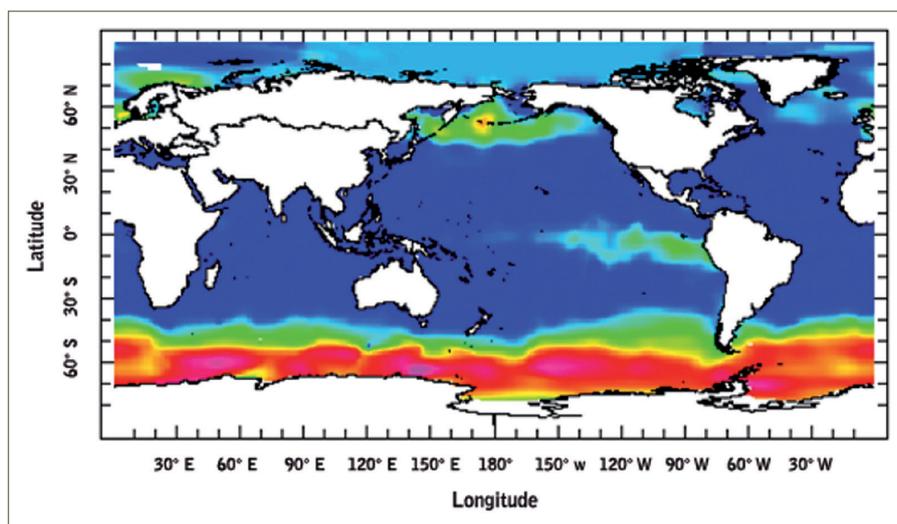


Figure 4 – Les quantités de sels nutritifs (ici les nitrates) dans les eaux de surface de l’océan mondial sont réparties de manière inégale : de façon générale, les eaux sont pauvres en nitrates (bleu), sauf dans l’Atlantique Nord, le Pacifique Équatorial Est, le Pacifique Nord, [vert et jaune] et l’Océan Austral (rouge). Source : base de données Levitus, LDEO, USA.

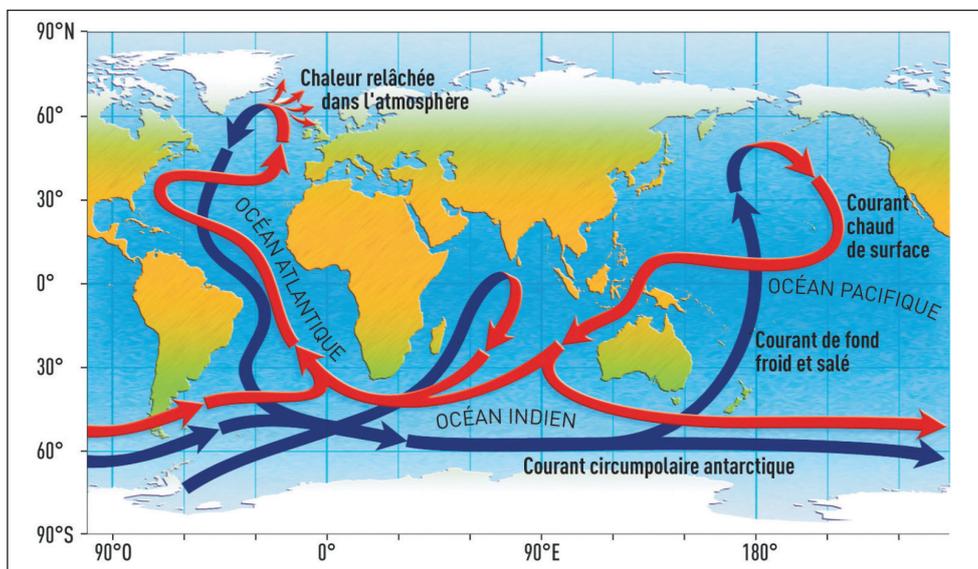


Figure 5 – La circulation « thermohaline » de l'océan mondial est composée de courants chauds (orange) dans le compartiment de surface et froids (en bleu) dans le réservoir profond. Cette circulation océanique est souvent appelée : le « tapis roulant ». Le temps de résidence de l'eau de mer dans l'océan profond est de l'ordre du millier d'années. Source : Sylvie Dessert.

(importants apports chimiques depuis les dorsales océaniques actives et les zones littorales) ;

- ▶ **biologique** : faune et flore, qui constituent les ressources marines (3).

L'OCÉAN, UNE POMPE À CO₂ ?

À l'équateur, la Terre reçoit plus d'énergie qu'elle n'en émet vers l'espace : cette zone est une source chaude, d'un point de vue thermodynamique. À l'inverse, les pôles sont des sources froides. Le maintien de la température moyenne dans ces deux régions exige un transfert thermique de l'équateur vers les pôles, entraînant des courants marins dans les océans appelés circulation « thermohaline » (Figure 6). La circulation thermohaline est très importante pour l'Europe occidentale grâce au *Gulf stream* qui y maintient une température optimale. C'est en effet un courant de surface qui prend sa source chaude dans les Caraïbes et continue en direction des côtes européennes pour finir dans les mers de Norvège, du Labrador et du Groenland (Figure 5).

Dans l'Atlantique Nord, ce courant chaud du *Gulf Stream*, rejeté vers le Nord, alimente la dérive Nord Atlantique puis le tourbillon subarctique. Les vents violents et froids soufflant sur les zones arctiques rendent l'eau de surface plus froide. Cette eau froide, plus dense, coule vers le fond et alimente la circulation profonde de l'Atlantique Nord qui, lui, s'écoule globalement vers le Sud et va longer les côtes américaines. Si le réservoir de surface de l'océan se renouvelle à l'échelle de l'année, il faut plus de mille ans pour renouveler le compartiment profond. Le « tapis roulant » océanique met donc plus d'un millénaire pour se boucler.

L'océan est capable de dissoudre de grandes quantités de dioxyde de carbone CO₂ (de l'ordre de 3 g/l à 0 °C) (4), gaz à effet de serre responsable partiellement du réchauffement climatique. Il joue donc un rôle dans la régulation du climat. Contenant bien plus de CO₂ dissous que l'atmosphère (0,2 % en moyenne contre 380 ppm), l'océan « impose sa loi » à l'atmosphère et non l'inverse. Les échanges de CO₂ entre atmosphère et l'océan se réalisent selon deux mécanismes (Figure 6) :

- ▶ la « pompe physique » : le CO₂ réagit avec l'eau et forme de l'acide carbonique (H₂CO₃), malgré

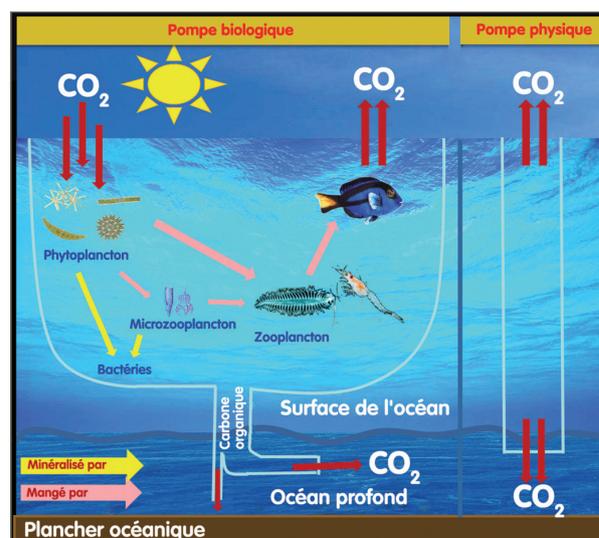


Figure 6 – L'océan peut échanger du CO₂ avec l'atmosphère grâce à deux principaux mécanismes dits « pompe physique » (à droite) et « pompe biologique » (à gauche). Le réservoir de surface (en bleu pâle, épaisseur 100 mètres environ) se renouvelle à l'échelle de l'année, le réservoir profond (en bleu foncé, 3 700 mètres de profondeur) à l'échelle du millénaire.

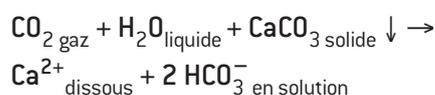
tout moins concentré que le CO_2 dissous, véritable vecteur de l'acidité de l'ensemble $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3$; les eaux polaires absorbent mieux le CO_2 de l'atmosphère (environ 3 g/l) et sont considérées comme des « puits » alors que les eaux tropicales et équatoriales sont des « sources » (environ 1,5 g/l) émettant du CO_2 vers l'atmosphère ;

- ▶ la « pompe biologique » : dans la couche de surface de l'océan, du printemps à l'automne, les conditions sont favorables pour le développement du phytoplancton qui, par photosynthèse, transforme du CO_2 (carbone « minéral ») dissous en carbone « organique » (5). À son tour, cette matière organique fait partie de la chaîne alimentaire et aboutit à un recyclage du carbone sous ses différentes formes minérales dissoutes. Le carbone ainsi transféré peut séjourner à l'abri de l'atmosphère pendant des centaines d'années.

L'HOMME : UN PERTURBATEUR DE L'OcéAN

L'océan absorbe de plus en plus le gaz CO_2 produit par l'activité humaine (transports, industrie, chauffage...). Lorsque que la concentration en CO_2 dissous augmente, le pH de l'eau diminue et l'océan s'acidifie (Figure 7). Depuis 1850, on estime que le pH moyen de l'océan de surface a diminué de 0,1 unité, passant à 8,1. Au cas où la teneur en CO_2 atmosphérique augmenterait d'un facteur 2 d'ici la fin du siècle, le pH de l'océan pourrait diminuer d'une unité (6)...

Or, le CO_2 en milieu aqueux réagit avec le carbonate de calcium CaCO_3 composant la coquille de nombreux organismes marins, cette réaction est modélisée par l'équation chimique suivante :



Cette réaction produit des ions calcium et des hydrogénocarbonates en solution aqueuse. Par conséquent, la coquille se dissout peu à peu menaçant de nombreux organismes marins.

La physico-chimie des océans est aussi menacée par l'utilisation intensive d'engrais qui a provoqué en moins de quarante ans le doublement des flux de nitrates rejetés à la mer. À l'échelle de l'Atlantique Nord, ces rejets sont importants : les flux de nitrates des fleuves de l'Europe du Nord sont nettement supérieurs à ceux de l'Amazone alors que le débit de ce fleuve est à lui seul dix fois supérieur

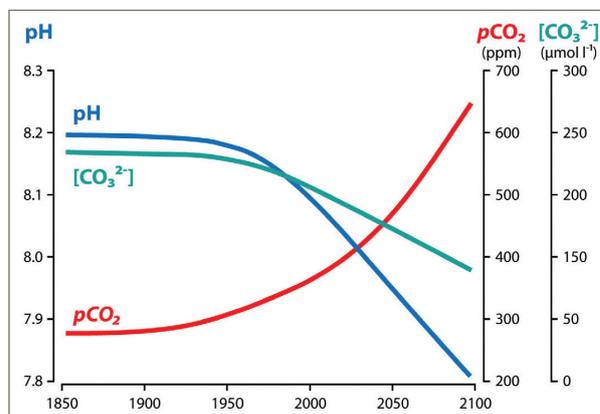


Figure 7 – Au cours du xxi^{e} siècle, la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère (pCO_2) devrait croître de façon spectaculaire. Ceci devrait engendrer un transfert accru de CO_2 dans l'eau de mer. En conséquence, le pH de la mer diminuera, de même que la teneur en ions carbonates $[\text{CO}_3^{2-}]$.

à celui cumulé des grands fleuves européens. Les conséquences concrètement observées (pollution de nitrates conduisant par exemple aux « marées vertes ») obligent l'homme à surveiller ses activités et à trouver des solutions pour préserver les océans des pollutions chimiques (?).

PEUT-ON DIMINUER L'EFFET DE SERRE GRÂCE AUX OcéANS ?

Deux voies principales sont à l'étude pour séquestrer le CO_2 :

- ▶ la première consiste à optimiser la pompe biologique de carbone dans certaines régions océaniques en les « fertilisant en fer ». Des expériences d'injection de fer dans des zones océaniques possédant des carences en fer dans les eaux de surface ont été menées entre 1993 et 2004 (Pacifique équatorial, océan austral, Pacifique subarctique). Ces expériences ont toutes montré que l'ajout de fer dans les eaux de surface d'un océan qui en est dépourvu favorise la photosynthèse et le pompage du CO_2 atmosphérique par les algues microscopiques. Cette abondance de fer et la baisse du CO_2 atmosphérique sont caractéristiques des périodes glaciaires (8). Cependant, il semble que cette manipulation de l'océan reste peu efficace par rapport à la fertilisation naturelle en fer et elle n'est pas sans conséquence sur le réseau trophique ;
- ▶ la seconde proposition serait d'utiliser l'océan profond comme réservoir de CO_2 : la circulation des eaux profondes est extrêmement lente. À ces profondeurs où la pression est très forte, le CO_2 se combine avec l'eau pour former un hydrate plus dense que l'eau environnante qui circule donc en tapissant d'abord le fond des océans.

Malheureusement, les modèles scientifiques ont montré qu'en traitant ainsi sous cette forme chaque année six milliards de tonnes de carbone (équivalent à ce nous rejetons actuellement dans l'atmosphère) dans les eaux profondes, la modification du pH des eaux de mers profondes gagnerait progressivement l'océan mondial avec une diminution du pH pouvant atteindre une unité (l'océan serait alors pratiquement à pH neutre) dans un millénaire... Avec les mêmes problèmes que ceux évoqués dans le paragraphe précédent mais quelques siècles plus tard.

L'OCÉAN : UN RÉSERVOIR DE RESSOURCES ET D'ÉNERGIES ?

À basse température et/ou sous haute pression, le méthane gazeux CH_4 peut se combiner avec l'eau pour former des « clathrates » de méthane : ce solide blanc s'enflamme dans l'atmosphère en présence d'une étincelle. Des gisements de méthane sous cette forme se trouvent en abondance dans les océans, le long des pentes abyssales des continents avec des réserves évaluées à 12 000 milliards de tonnes (plus de deux fois les réserves de charbon au niveau mondial !) [9]. Cependant, l'exploitation de cette énergie fossile est risquée avec des conséquences sur l'environnement (contribution à l'augmentation de l'effet de serre).

À travers la diversité des occupants des océans (poissons, éponges, anémones, coraux, ou encore des organismes microscopiques : bactéries, algues et champignons), on a découvert que certains produisent des molécules aux structures

insoupçonnées, des plus simples aux plus complexes, et présentant des vertus thérapeutiques (anticancéreux, antifongiques, antibiotiques comme la céphalosporine dans les années 1950).

Doit-on pour autant les exploiter ? sachant que ces organismes sont difficiles à élever, souvent peu accessibles et ne produisent que des quantités infinitésimales de molécules ?

Dans le souci de préserver la biodiversité marine, la chimie fournira les moyens nécessaires pour synthétiser en laboratoire des quantités appréciables de ces molécules, sans épuiser les ressources marines et sans porter atteinte à la biodiversité.

POUR EN SAVOIR PLUS

[1] Océan, glaces, niveau de la mer et climat

<http://www.mediachimie.org/node/1333>

[2] Les ressources minérales du futur sont-elles au fond des mers ?

<http://www.mediachimie.org/node/274>

[3] Les origines de la vie, du minéral aux biomolécules

<http://www.mediachimie.org/node/2245>

[4] Le CO_2 , matière première de la vie

<http://www.mediachimie.org/node/1755>

[5] Dioxyde de carbone et microalgues : pour une chimie renouvelable

<http://www.mediachimie.org/node/2327>

[6] Atmosphère ! Atmosphère ! Alerte !

<http://www.mediachimie.org/node/1555>

[7] La chimie en agriculture : les tensions et les défis pour l'agronomie

<http://www.mediachimie.org/node/313>

[8] Faut-il fertiliser l'océan pour contrôler le climat ?

<http://www.mediachimie.org/node/278>

[9] Hydrates de gaz et hydrogène ; ressources de la mer du futur

<http://www.mediachimie.org/node/276>

Jean-Claude Bernier, professeur émérite de l'Université de Strasbourg, ancien directeur scientifique des sciences chimiques du CNRS

Emmanuel Durocher, professeur de physique-chimie, formateur dans l'académie de Créteil

Jean-Pierre Labbé, ingénieur ENSCP, maître de conférences honoraire d'université, spécialité de recherches : chimie des solutions et chimie analytique

Grégory Syoën, professeur agrégé, chef de projet Mediachimie-Fondation de la maison de la chimie