

La chimie et la mer,  
ensemble au service de l'homme



Ce livre est issu du colloque « La chimie et la mer, ensemble au service de l'homme » qui s'est déroulé le 22 octobre 2007 à la Maison de la Chimie.

# La chimie et la mer, ensemble au service de l'homme

Stéphane Blain, Jean-Luc Charlou, Chantal Compère, Daniel Desbruyères,  
Yves Fouquet, Guy Herrouin, Catherine Jeandel, Michel Marchand,  
Georges Massiot, François-Xavier Merlin, Françoise Quiniou,  
Louis-Alexandre Romaña, Paul Tréguer

Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin



Conception de la maquette intérieure et de la couverture :  
Pascal Ferrari

Mise en page : Arts Graphiques Drouais (28100 Dreux)

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-0426-9

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2009

EDP Sciences  
17, avenue du Hoggar, P.A. de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

# Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

**Stéphane Blain**

*Laboratoire d'Océanographie  
et de Biochimie de Marseille*

**Jean-Luc Charlou**

*Ifremer – Centre de Brest*

**Chantal Compère**

*Ifremer – Centre de Brest*

**Daniel Desbruyères**

*Ifremer – Centre de Brest*

**Yves Fouquet**

*Ifremer – Centre de Brest*

**Guy Herrouin**

*Direction des Constructions  
Navales des Services  
et Systèmes (DCNS)*

**Catherine Jeandel**

*CNRS – Observatoire  
Midi-Pyrénées*

**Michel Marchand**

*Ifremer – Centre de Nantes*

**Georges Massiot**

*Institut Pierre Fabre*

**François-Xavier Merlin**

*Centre de Documentation  
de Recherche et  
d'Expérimentations sur  
les pollutions accidentelles  
des eaux (CEDRE) – Brest*

**Françoise Quiniou**

*Ifremer – Centre de Brest*

**Louis-Alexandre Romaña**

*Ifremer – Centre de Toulon*

**Paul Tréguer**

*Institut Universitaire Européen  
de la Mer – Brest*



# Sommaire

<b>Préface</b> : par <b>Paul Rigny</b> .....	7
<b>Préface</b> : par <b>Bernard Bigot</b> .....	9
<b>Introduction</b> : Les grandes questions en sciences chimiques de l'environnement marin par <b>Paul Tréguer</b> .....	13

## Partie 1 Comprendre la mer

<b>Chapitre 1</b> : Des clefs pour comprendre l'océan : les traceurs chimiques et isotopiques par <b>Catherine Jeandel</b> .....	29
<b>Chapitre 2</b> : Faut-il fertiliser l'océan pour contrôler le climat ? par <b>Stéphane Blain</b> .....	41

## Partie 2 Profiter de la mer

<b>Chapitre 1</b> : Les ressources minérales du futur sont-elles au fond des mers ? par <b>Yves Fouquet</b> .....	55
<b>Chapitre 2</b> : L'exploitation des nodules polymétalliques : utopie ou réalité ? par <b>Guy Herrouin</b> .....	81
<b>Chapitre 3</b> : Hydrates de gaz et Hydrogène : ressources de la mer du futur ? par <b>Jean-Luc Charlou</b> .....	99

<b>Chapitre 4</b> : Du minéral à la vie : les oasis des grands fonds par <b>Daniel Desbruyères</b> .....	121
<b>Chapitre 5</b> : Les médicaments de la mer : espoir ou illusion ? par <b>Georges Massiot</b> .....	135

### Partie 3

## La chimie pour aider la mer

<b>Chapitre 1</b> : L'homme, la chimie et la mer : connaître la contamination pour la combattre par <b>Louis-Alexandre Romaña</b> et <b>Michel Marchand</b> .....	151
<b>Chapitre 2</b> : La lutte physico-chimique contre les marées noires : trente ans d'expérience par <b>François-Xavier Merlin</b> .....	165
<b>Chapitre 3</b> : La chimie à l'assaut des biosalissures par <b>Françoise Quiniou</b> et <b>Chantal Compère</b> .....	177
<b>Glossaire</b> .....	195
<b>Crédits photographiques</b> .....	203
<b>L'institut français de recherche pour l'exploitation de la mer</b> .....	207

# Préface

*L'Actualité Chimique* veut contribuer à faire connaître à un large public l'impact qu'ont, par leurs résultats, les Sciences Chimiques pour leur vie quotidienne. Dans le même objectif, la Fondation de la Maison de la Chimie organise des colloques et autres manifestations scientifiques qui traitent chaque fois d'un domaine d'application particulier (la santé, l'art et le patrimoine... et beaucoup d'autres champs qui concernent la vie en société). La rencontre entre ces deux initiatives donne naissance aux ouvrages « La chimie et ... » dont le premier, « La chimie et la mer », est présenté ici dans le cadre de la collection *L'Actualité Chimique – Livres*. Cette collection, ouverte en janvier 2008 par la publication de « Radiation Chemistry – from basics to applications in Material and Life Sciences », s'enrichit ainsi d'une nouvelle catégorie d'ouvrages s'adressant non plus aux professionnels de la science mais au grand public curieux.

Ces ouvrages ne sont pas, *stricto sensu*, les comptes-rendus des colloques de la Fondation, même si les

éléments de base des chapitres sont bien les conférences qui y ont été présentées. Un soigneux travail de retouche, éventuellement des ajouts pédagogiques, a dû être fait pour harmoniser les niveaux de formation demandés aux lecteurs. Dans certains cas, un travail d'écriture a dû être fait à partir des simples enregistrements des conférences – une tâche dont on sous-estime régulièrement les pièges. Merci à Mme Minh-Thu Dinh-Audouin de s'être employée à ces tâches d'élaboration des contenus, qui nous permettent de vous proposer cet ouvrage. Merci aussi aux auteurs des conférences d'avoir apporté leur contribution à l'ajustement de leurs présentations.

Ce premier livre de la série « La chimie et ... » traite de l'un des thèmes scientifiques les plus populaires auprès de nos concitoyens. Les fonds sous-marins excitent les imaginations par l'étrangeté de la vie qu'on commence à y découvrir, et les rêves d'exploitation de ressources, qui de façon préoccupante se mettent à faire défaut à la surface de la planète dans le domaine

de l'énergie (nouveaux gisements de matières fossiles ?) et des matières minérales (dépôts métalliques naturels ?). Origine de la vie, la mer fournira-t-elle aussi la solution de nos problèmes ? Ce que la chimie nous apprend

sur la réalité de ces milieux permet de mieux appréhender ces questions.

**Paul Rigny**  
**Rédacteur en chef**  
*L'Actualité Chimique*

# Préface

La Fondation de la Maison de la Chimie, conformément à ses statuts établis il y a 75 ans, a pour mission de « développer les relations entre savants, techniciens et industriels, et de contribuer à l'avancement de la Science Chimique dans toute l'étendue de son domaine et aux développements de ses applications ». Elle ne peut donc rester en dehors d'un mouvement de réflexion en faveur de relations vraies et confiantes entre la Chimie et la Société. Elle doit s'impliquer dans les débats qui y sont associés, en favoriser leur tenue et les approfondissements qu'ils permettent.

C'est le sens d'une série de colloques intitulés « Chimie et... » qu'elle organise régulièrement sur des thèmes prenant en compte les préoccupations d'un grand nombre de nos concitoyens. « La Chimie et la Mer, ensemble au service de l'Homme » fut la première de cette série de rencontres scientifiques bisannuelles qui réunit les experts chimistes avec ceux des autres disciplines concernées par les domaines abordés. Ces colloques sont

très largement ouverts au public et permettent à tout un chacun de s'informer, de s'exprimer, de mieux comprendre la réalité des activités liées aux Sciences de la Chimie, leurs apports à la Société autant que leurs limites.

La chimie est une composante majeure des relations existantes ou à construire entre Nature, Science, Industrie et Société. Pour cette raison, la Chimie a besoin de l'attention de la Société, de son intérêt, de sa mobilisation vigilante et lucide pour donner le meilleur d'elle-même et attirer à elle entrepreneurs, ingénieurs, chercheurs, techniciens et enseignants de grande qualité pour mieux satisfaire les attentes et les demandes dont elle est, sous de multiples formes, l'objet incontournable. C'est avec cet objectif à l'esprit qu'en partenariat avec la revue « *L'Actualité Chimique* », nous avons souhaité créer une série d'ouvrages destinés à diffuser très largement le contenu des colloques « Chimie et... » en veillant à les rendre accessibles à un large public de non spécialistes, mais intéressés par les possibilités de progrès apportés par la Science dans notre vie quotidienne, dans la compréhension globale et la

connaissance du monde qui nous entoure.

Le thème de cet ouvrage, « La Chimie et la Mer, ensemble au service de l'Homme » est un sujet de grande actualité au moment où chacun prend la mesure que les ressources naturelles, et particulièrement maritimes, sont un bien précieux commun qu'il convient d'exploiter avec discernement, au moment où le rôle essentiel des océans dans le bon fonctionnement de notre planète est mis en évidence à l'occasion de la large diffusion des travaux du Groupe International d'Étude sur le Climat (GIEC) qui a reçu conjointement avec le Vice-Président Al Gore le Prix Nobel de la Paix, au moment enfin où l'opinion publique est particulièrement sensible aux questions d'environnement et de développement durable, à la préservation de la qualité des eaux maritimes et à la prévention des menaces que peuvent faire peser sur elles le transport ou les rejets côtiers.

Sur tous ces sujets, la chimie est présente, parfois en première ligne, parfois de manière plus discrète, soit parce que la Science Chimique permet de comprendre les grands phénomènes qui gouvernent le fonctionnement de la Mer, soit parce que la chimie valorise les ressources et produits marins pour différents usages au service de l'Homme, qu'ils soient alimentaires, thérapeutiques, énergétiques, agricoles, ou relèvent des industries métallurgiques, soit parce que la

Chimie au service de la Mer contribue à utiliser de manière raisonnable l'espace maritime pour les transports ou les loisirs, ou bien contribue à préserver la Mer de dégradations diverses ou bien encore contribue à remédier aux atteintes dont elle fait l'objet.

Le contenu de cet ouvrage est organisé autour de ces trois grands axes, à travers les contributions des spécialistes des laboratoires universitaires, du CNRS, de l'IFREMER et de l'industrie que je veux remercier chaleureusement ici.

L'IFREMER s'est très largement associé aux chimistes de la Fédération Française des Sciences de la Chimie dans la réalisation du colloque et de cet ouvrage et je tiens à en remercier son Président-directeur général Jean-Yves Perrot.

La diffusion de connaissances devient mutualisée avec de nombreux acteurs et ne doit être accompagnée que par des spécialistes préparés à cet exercice. La Société ne veut plus être en marge de la Science. L'objectif de cet ouvrage, et plus généralement de la collection, est non seulement de communiquer et de faire partager les points de vue des chimistes, mais de répondre à ses légitimes questionnements et interrogations.

**Bernard Bigot**  
**Président de la Fondation de**  
**La Maison de La Chimie**

# Les grandes questions

## en sciences chimiques

### de l'environnement marin

Embarquons à bord d'un satellite de la Terre et jetons un œil à notre planète par le hublot : au cours d'une révolution nous voyons essentiellement de l'eau. L'océan occupe en effet 70 % de sa surface, et il faudrait donc rebaptiser notre planète la « planète Océan » (Figure 1).

#### 1 L'océan, un acteur majeur dans l'environnement planétaire

Aussi immense soit-il, l'océan commence à être mieux connu et mieux compris. Les scientifiques du monde entier étudient ce qui se passe à l'échelle planétaire. Depuis la dernière décennie, grâce à des programmes internationaux sur les changements qui affectent notre planète (comme l'*International Geosphere Biosphere Program*, IGBP), nous avons maintenant acquis une connaissance « globale » de la Terre et de son océan.

Par exemple, à partir de données satellitaires, nous sommes capables de reconstituer la variation mensuelle du couvert végétal de l'océan mondial et des continents (Figure 2) au temps présent.

Mais nous pouvons aussi, à partir des enregistrements conservés dans les calottes polaires, remonter dans le temps, décrire les variations du climat et mieux comprendre les interactions entre l'océan et le climat pendant les cycles climatiques passés (Figure 3).

Enfin, nous savons que de nombreux échanges de matière et d'énergie ont lieu entre les différentes composantes du système Terre qui communiquent en permanence entre

Figure 1

La Terre, la « planète bleue ».



Figure 2

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.

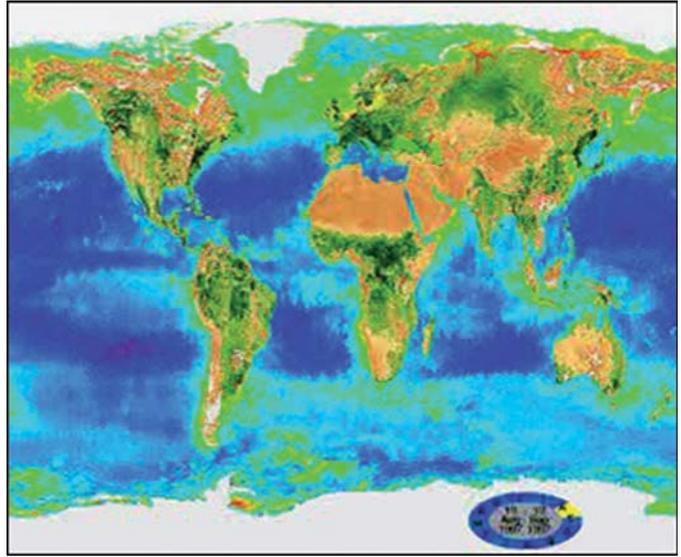


Figure 3

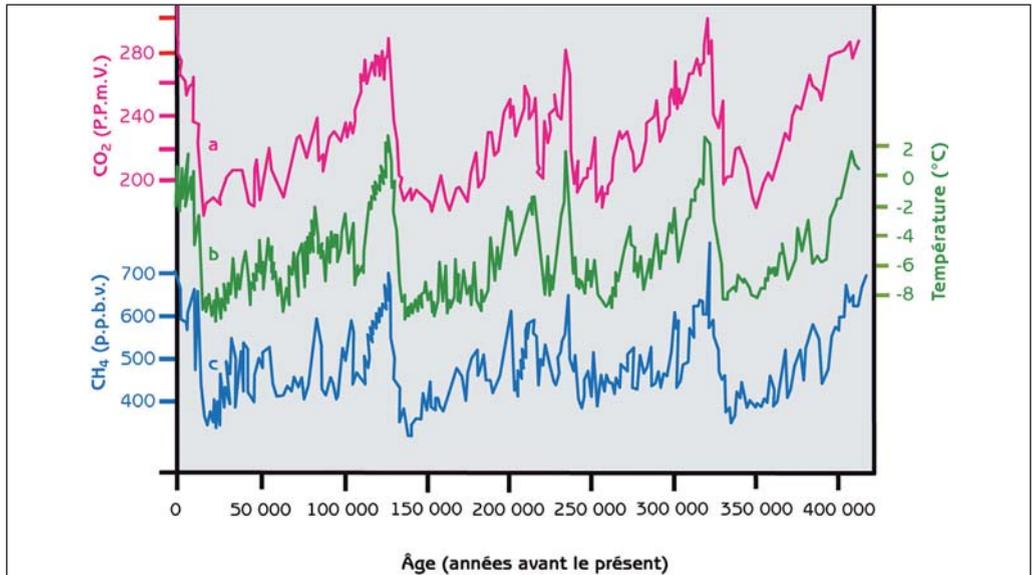
Grâce aux enregistrements des calottes glaciaires, en particulier dans l'Antarctique, nous pouvons reconstituer la variation des principaux paramètres caractéristiques du climat de la Terre à l'échelle globale. À noter la croissance spectaculaire et rapide des teneurs en dioxyde de carbone  $CO_2$  et 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.

elles [voir l'encart « Le système Terre et ses différentes composantes »]. Pour cela, les sciences chimiques sont à même de nous fournir des clés précieuses pour comprendre ces échanges comme le décrit le Chapitre de C. Jeandel. C'est ainsi qu'en étudiant au présent et au passé le fonctionnement du système couplé atmosphère-hydrosphère-cryos-

phère-lithosphère-biosphère (y compris anthroposphère) (Figure 4), nous pouvons espérer prédire notre devenir.

Si l'océan n'est qu'un élément de ce système complexe, c'est un composant important. Comment peut-il être caractérisé ?

L'océan est d'abord un milieu physique : il obéit aux lois de la mécanique des fluides.



Son volume est variable : en fonction des transferts thermiques, il est soumis à la dilatation qui conditionne actuellement, et pour une large part, les variations du niveau de la mer – variations que l'on peut suivre grâce au satellite franco-américain *Jason*.

L'océan est ensuite **un milieu chimique** : la mer est composée d'eau et de sels ; la quantité totale de sels est relativement

constante (en moyenne environ 35 grammes de sels par kilogramme d'eau de mer, quelle que soit la région considérée). Cependant, la mer Baltique est peu salée (environ cinq fois moins que la moyenne) mais la mer Morte, fermée, l'est beaucoup plus (environ dix fois plus que la moyenne). Certains sels de l'eau de mer, tels que les nitrates et les phosphates, sont dits nutritifs, ce qui veut dire qu'ils sont utiles à la vie [ils

**Figure 4**

*Le système couplé atmosphère-hydrosphère-cryosphère-lithosphère-biosphère (dont anthroposphère) de la planète Terre, dont l'océan est une composante.*

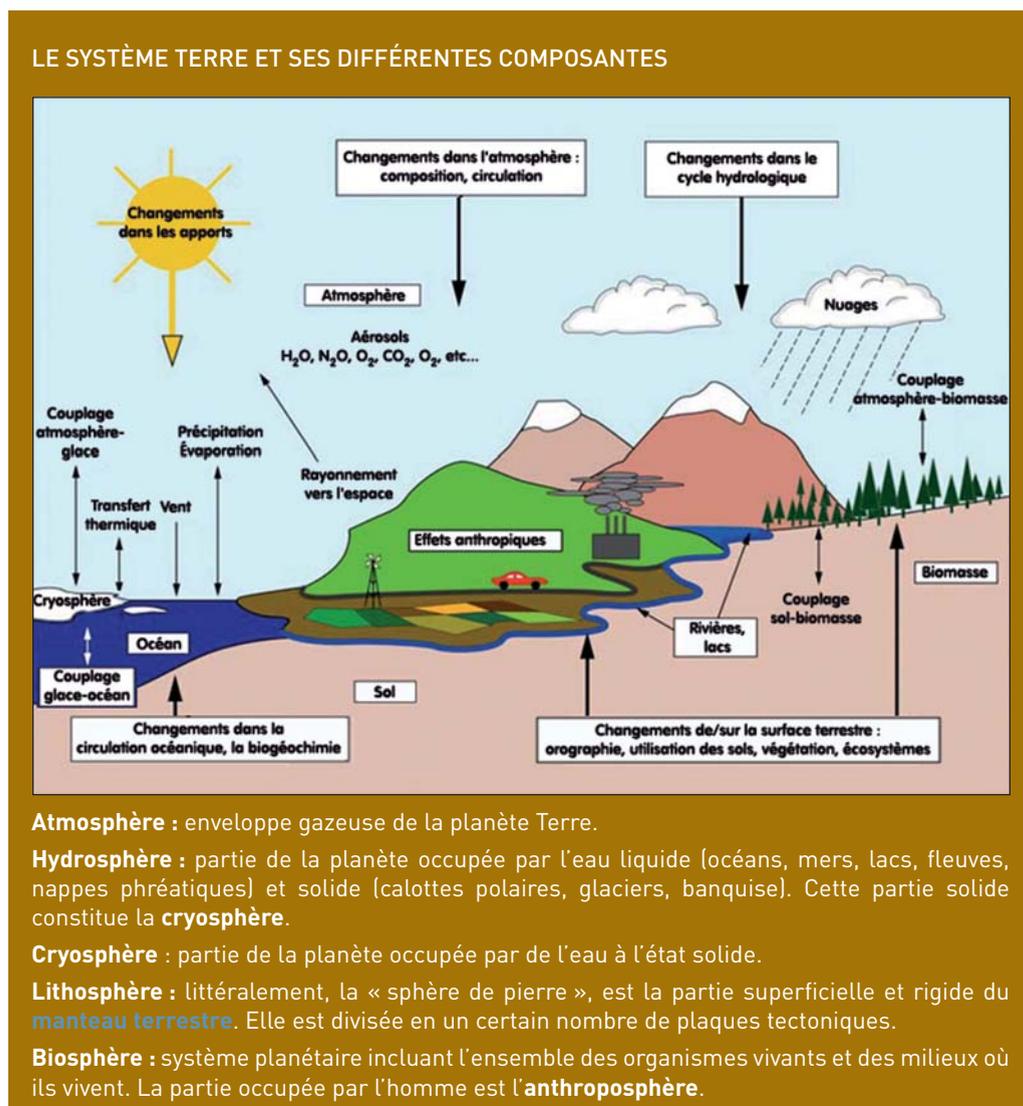


Figure 5

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).

entrent dans les cycles biologiques des organismes vivants). De façon générale, s'agissant de la teneur en matières nutritives dans la couche de surface des océans, le contraste est grand entre les zones pauvres (au centre des grands tourbillons océaniques) et les eaux riches comme celles de l'océan Austral (Figure 5).

L'océan est délimité par un **environnement géologique** (la lithosphère forme l'enveloppe rocheuse de la Terre, de nature continentale ou océanique) qui conditionne son expansion et interagit avec lui par exemple en modifiant sa composition. Ceci se fait à partir des rejets de matières diverses depuis les dorsales océaniques actives, dont l'activité hydrothermale engendre d'importants apports chimiques à l'océan, mais aussi depuis les zones littorales et les bassins versants. Le Chapitre de Y. Fouquet donne l'occasion de prendre connaissance de cette activité

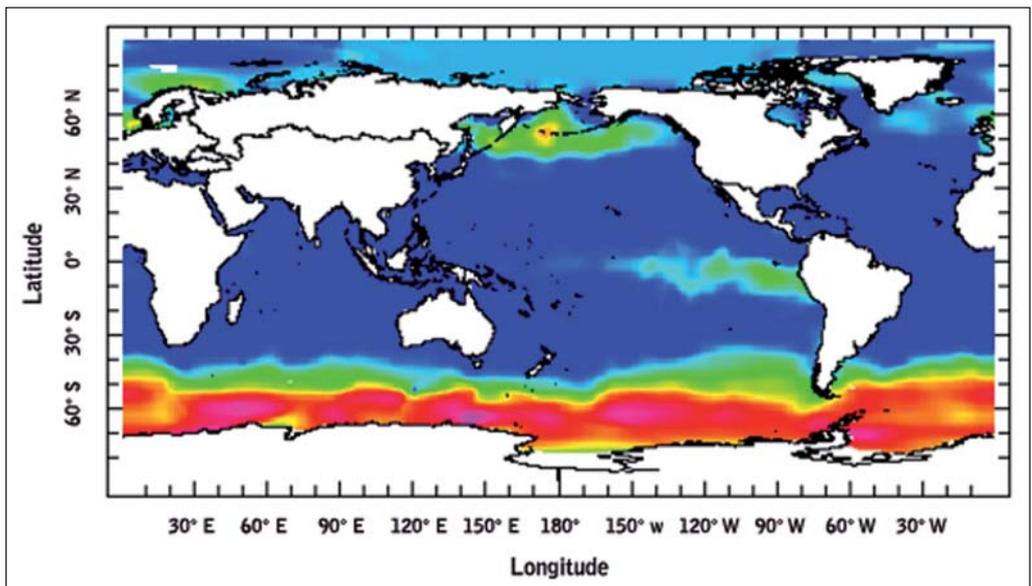
géologique intense qui règne au fond de l'océan.

L'océan est enfin le support **d'activités biologiques** – y compris humaines – qui sont directement impactées par les changements climatiques. L'océan est lui-même capable de réponse à ces activités [1].

Enfin, l'océan est producteur de **ressources marines**, qui sont actuellement très sévèrement exploitées par l'homme, comme le décrivent les Chapitres de Y. Fouquet, G. Herrouin, J.-L. Charlou et G. Massiot.

Devant ces multiples rôles joués par notre immense océan, les **chimistes marins** se posent des questions fondamentales, dont la plupart nous entraînent même dans le débat : « Science ou éthique ? »

Avant d'entrer dans le vif du sujet que nous présente cet ouvrage, arrêtons-nous sur quatre questions fondamentales, qui seront illustrées par des exemples concrets :



1 - L'océan est-il le maître du climat de la planète Terre ? Contrôle-t-il la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère ?

2 - L'océan est-il perturbé par l'homme ? Comment y répond-il ?

3 - L'homme peut-il devenir le maître des océans ? Peut-on manipuler leur composition pour diminuer l'effet de serre ?

4 - L'océan est-il un réservoir inépuisable de ressources ? Peut-on les exploiter ?

## 2 L'océan est-il le maître du climat de la planète Terre ?

Nous pouvons prendre conscience du rôle majeur joué par l'océan dans la régulation du climat de la planète Terre à travers deux processus.

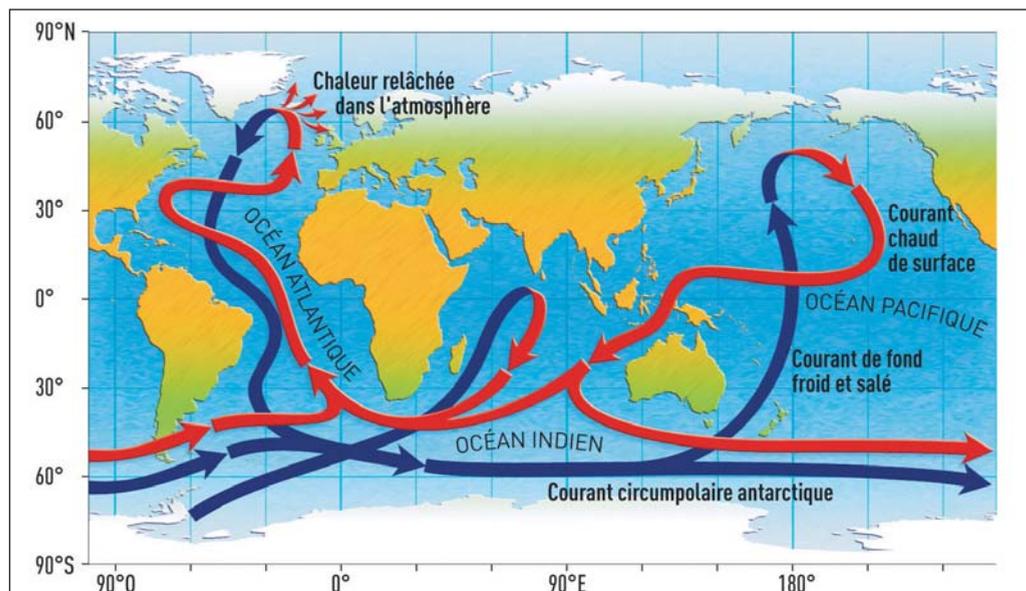
### 2.1. L'océan, régulateur de température pour la planète

Pour notre planète, l'océan est un gigantesque réparti-

teur d'énergie thermique. On sait en effet qu'à l'équateur, la Terre reçoit plus d'énergie qu'elle n'en émet vers l'espace : la zone équatoriale est donc une source chaude. Le bilan est dans l'autre sens aux pôles, qui sont donc une source froide. Le maintien de la température moyenne dans ces deux régions exige un transfert thermique de l'équateur vers les pôles, auquel contribue la circulation « méridienne », encore appelée circulation « thermohaline » de l'océan (Figure 6). Dans l'Atlantique Nord par exemple, le courant chaud du Gulf Stream alimente la dérive Nord Atlantique puis le tourbillon subarctique qui entre en mer de Norvège, du Groenland et du Labrador. Les vents violents et froids soufflant sur les zones Arctiques rendent l'eau de surface plus froide et donc plus dense : cette eau coule et alimente la circulation profonde de l'océan Atlantique Nord qui s'écoule

Figure 6

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.



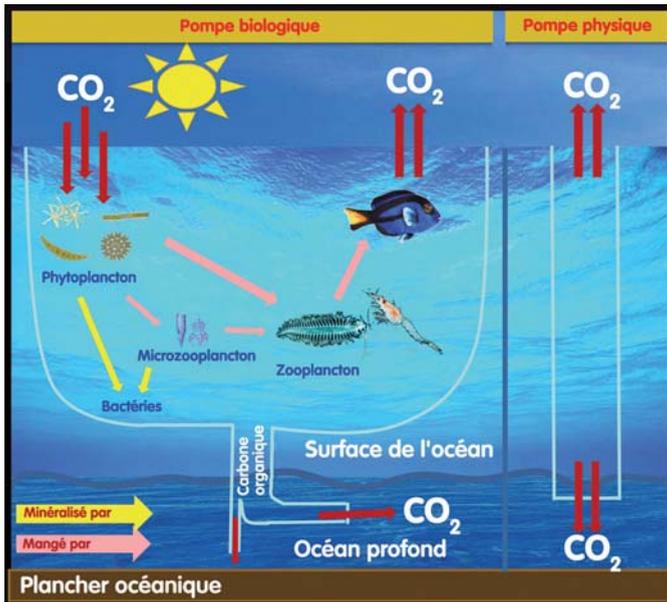


Figure 7

L'océan peut échanger du  $\text{CO}_2$  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, 3700 mètres de profondeur) à l'échelle du millénaire.

vers le Sud. 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.

## 2.2. L'océan, une pompe à $\text{CO}_2$

L'océan est également capable de dissoudre de grandes quantités de  $\text{CO}_2$ , initialement présentes dans l'atmosphère. Or on sait que le climat évolue directement en relation avec la teneur atmosphérique en  $\text{CO}_2$ , lequel est en grande partie responsable du réchauffement climatique par effet de serre. L'océan joue donc également par le biais du  $\text{CO}_2$  un rôle dans la régulation du climat. Il contient soixante-cinq fois plus de  $\text{CO}_2$  (sous forme inorganique dissoute) que l'atmosphère ; aussi, dans le contrôle du cycle du carbone, c'est lui qui va « imposer sa loi » à l'atmosphère et non l'inverse.

Les échanges de  $\text{CO}_2$  entre atmosphère et océan se réalisent selon deux mécanismes

(Figure 7). Le premier obéit aux lois de la thermodynamique et est appelé « **pompe physique** » ou « pompe de solubilité ». De façon générale, les gaz se dissolvent mieux dans les eaux froides que dans les eaux chaudes. Mais le  $\text{CO}_2$  est un gaz particulier car il réagit avec l'eau. Cette réaction aboutit à la formation d'espèces minérales du carbone : de l'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), qui se dissocie en ions hydrogène-carbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), en ions carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et en  $\text{CO}_2$  moléculaire dissous, selon un équilibre dépendant de la température et de la pression environnantes. Ceci rend complexe le processus de dissolution-réaction du  $\text{CO}_2$  avec l'eau. Au final, les eaux polaires sont des « puits » de  $\text{CO}_2$  (elles absorbent du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère), et les eaux tropicales et équatoriales sont des « sources » (elles émettent du  $\text{CO}_2$  vers l'atmosphère).

Le second mécanisme fait intervenir la biosphère marine et est appelé « pompe biologique » de  $\text{CO}_2$  (détaillée dans le Chapitre de S. Blain). Dans la couche de surface de l'océan, du printemps à l'automne, les conditions sont en général favorables pour le développement du phytoplancton (voir l'encart « **Le Phytoplancton** »). Celui-ci, par photosynthèse, transforme du  $\text{CO}_2$  dissous en carbone organique particulaire. Ces organismes microscopiques sont broutés par des crustacés planctoniques qui, eux-mêmes, servent de proies aux organismes des niveaux supérieurs de la chaîne alimentaire – on parle de « réseau trophique ». Les différents niveaux du réseau

trophique rejettent du carbone organique particulière. La matière particulaire, plus dense que l'eau, a tendance à sédimenter. Le carbone finit par être transféré de la couche de surface vers le réservoir profond de la mer, voire vers le sédiment. La matière organique est minéralisée par les bactéries présentes dans l'eau, ce qui conduit à un recyclage du carbone sous ses différentes formes minérales dissoutes. À travers ce mécanisme, l'océan apparaît comme une véritable « pompe biologique » de carbone qui fait disparaître du CO<sub>2</sub> de la couche de surface vers le réservoir profond (Figure 7). Le carbone ainsi transféré peut séjourner à l'abri de l'atmosphère pendant des centaines d'années.

### 3 L'océan est-il perturbé par l'homme ?

#### Comment y répond-il ?

Les preuves s'accumulent pour montrer aujourd'hui que notre mode de développement économique engendre de profondes perturbations de l'océan, à différentes échelles.

#### 3.1. Les perturbations anthropiques<sup>1</sup> à l'échelle globale

Depuis le début de l'ère industrielle, de plus en plus de CO<sub>2</sub> est rejeté dans l'atmosphère. L'océan, grande pompe à CO<sub>2</sub>, se retrouve à absorber de plus en plus ce gaz produit par l'activité humaine (trafic

1. Anthropique : du grec *anthropos* = homme, relatif à l'activité humaine.

## LE PHYTOPLANCTON

Le phytoplancton (du grec : *phyton* = plante, *planktós* = errant) est l'ensemble des petits organismes végétaux vivant dans les couches superficielles de la mer, le plus souvent en suspension. Cyanobactéries, diatomées, dinoflagellés, coccolithophoridés et autres algues unicellulaires sont dits **autotrophes** vis-à-vis du carbone : ils synthétisent eux-mêmes la matière organique (molécules à base de carbone) dont ils ont besoin pour vivre. Pour cela, ils réalisent la photosynthèse : au cours de ce processus de production primaire, ils transforment le carbone minéral CO<sub>2</sub> en carbone organique, en utilisant l'énergie du Soleil. Bien que le phytoplancton représente moins de 1 % de la **biomasse** d'organismes photosynthétiques sur la planète, il assure tout de même près de la moitié de la production primaire planétaire.

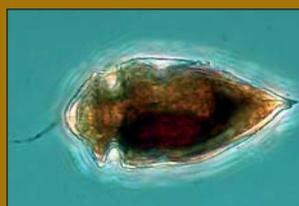


Figure 8

*Oxytoxum constrictum*, un dinoflagellé, algue microscopique. Il fait 70 microns et a été pêché à 30 mètres de profondeur dans la mer Ligurienne entre Nice et Calvi en septembre 2004 pendant le projet PÊCHE : Production and

*Exportation of Carbon : control by HETerotrophic organisms at small time scales (Dynaproc2).*



Figure 9

*Vue d'ensemble d'une communauté microbienne complexe d'une mare d'eau douce du campus universitaire d'Orsay montrant des filaments de cyanobactéries et deux cellules de diatomées Bacillariophyta (Heterokont/Stramenopiles). Microscopie optique, contraste interférentiel, X400. En explorant la diversité microbienne dans des environnements divers et souvent extrêmes, les chercheurs s'intéressent à la diversité globale du vivant et à son évolution.*

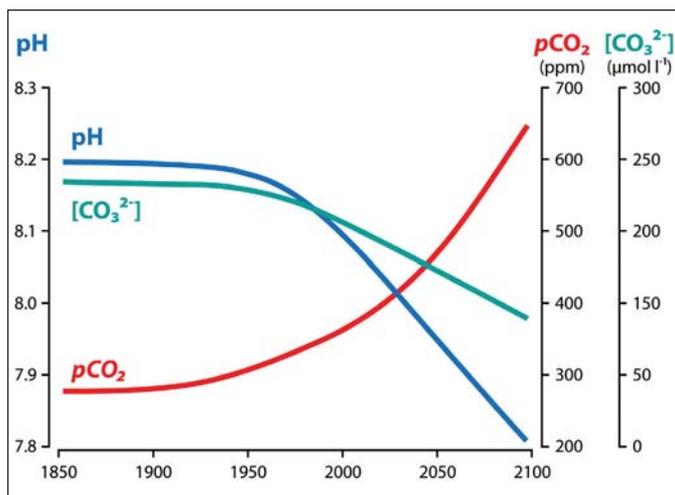


Figure 10

Au cours du  $xx^e$  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  $[CO_3^{2-}]$ .

urbain, usines...). Quels en sont les effets sur l'équilibre des océans ?

Lorsque la mer absorbe du  $CO_2$ , celui-ci réagit avec l'eau en formant des espèces minérales du carbone et en libérant des ions  $H^+$  (voir le paragraphe 2.2). Ainsi, dès que la concentration en  $CO_2$  dissous augmente, le pH de l'eau diminue : on dit que l'océan « s'acidifie » (Figure 10). Depuis 1850, on estime que le pH moyen de l'océan de surface a diminué de 0,1 unité, passant à 8,1. Si la teneur en  $CO_2$  atmosphérique augmente d'un facteur 2 d'ici la fin du siècle – selon l'hypothèse minimaliste –, le pH de l'océan pourrait diminuer d'une unité. Or, dissoudre davantage de  $CO_2$  dans l'eau de mer fait évoluer les équilibres des espèces minérales du carbone dissous en défaveur des ions carbonate  $CO_3^{2-}$ . Il en résulte une dissolution des carbonates de calcium  $CaCO_3$ , constituant la coquille de nombreux organismes marins, aussi bien planctoniques (flottant dans la colonne

d'eau) que benthiques (vivant sur le fond des mers).

Les océanographes ont l'habitude d'appeler « profondeur de saturation » celle au-delà de laquelle les carbonates de calcium se dissolvent. Dans le milieu marin ces carbonates se trouvent principalement sous deux formes : aragonite ou calcite, la première étant plus soluble que la seconde. Actuellement, la profondeur de saturation pour l'aragonite se situe à plus de 2000 mètres de profondeur dans l'Atlantique et à moins de 1000 mètres dans le Pacifique. Les organismes carbonatés peuvent donc croître sans problème dans les eaux de surface. Mais avec une augmentation du  $CO_2$  dissous, à la fin de ce siècle, ces profondeurs de saturation devraient remonter de façon spectaculaire. Ainsi, pour l'océan Arctique et pour l'océan Austral, les modèles montrent que la profondeur de saturation pour l'aragonite parviendra en surface avant la moitié du  $xx^e$  siècle. Autrement dit, les eaux de surface des océans polaires sont en train de devenir agressives pour les organismes carbonatés. Dans ces conditions, nous pouvons prévoir par exemple que les ptéropodes, petits animaux planctoniques à carapace d'aragonite, constituants des chaînes alimentaires marines des océans polaires, pourraient disparaître ! De même, les coccolithophoridés, organismes microscopiques phytoplanctoniques à coquille de calcite, seraient également menacés dans un océan plus riche en  $CO_2$ . Ceci n'est pas sans conséquence sur le reste