

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 ».

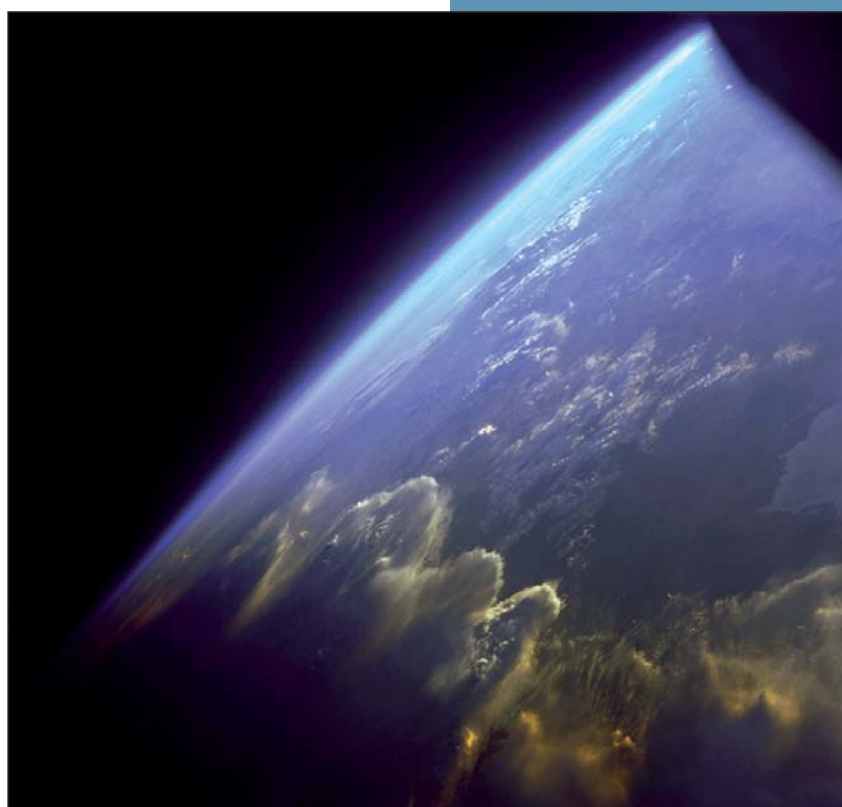


Figure 2

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.

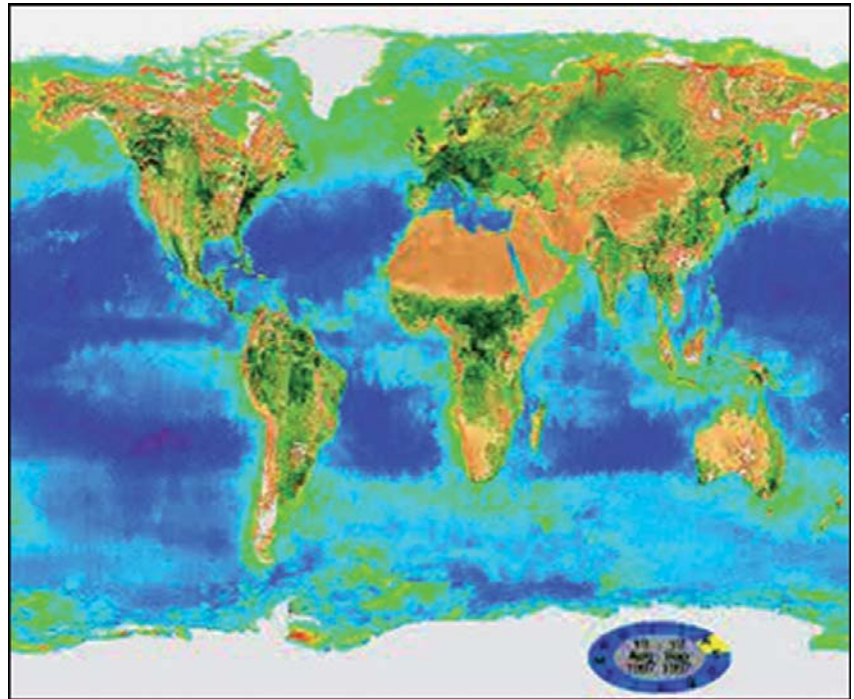


Figure 3

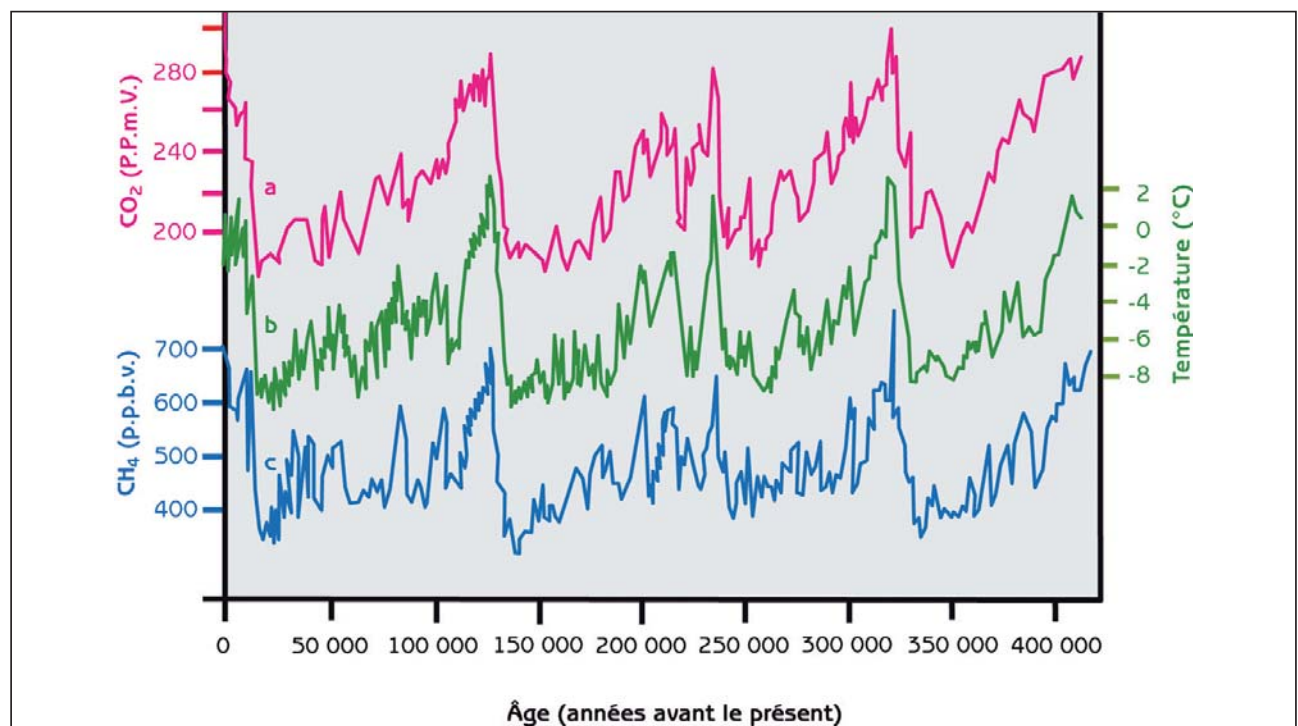
Grâce aux enregistrements des calottes glaciaires, en particulier dans l'Antarctique, nous pouvons reconstituer la variation des principaux paramètres caractéristiques du climat de la Terre à l'échelle globale. À noter la croissance spectaculaire et rapide des teneurs en dioxyde de carbone CO_2 et en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

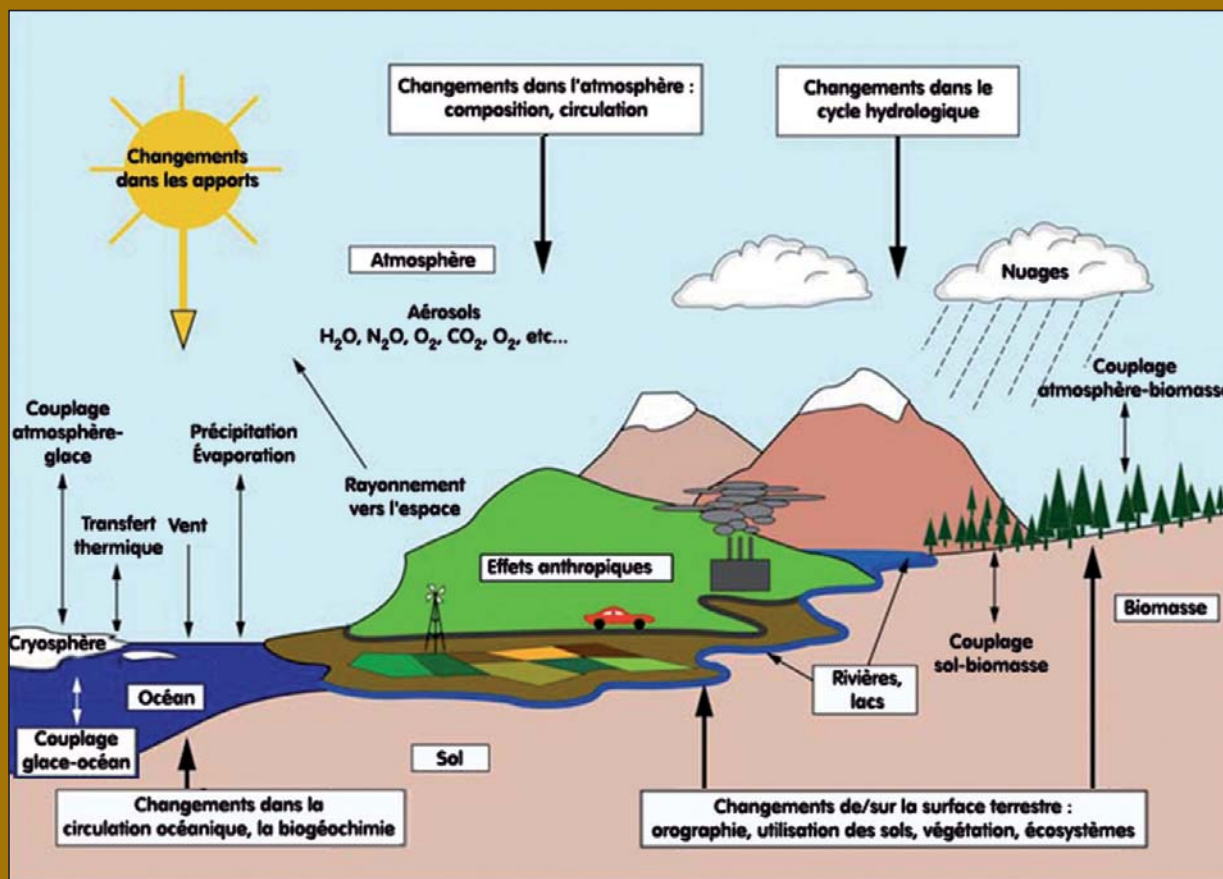
L'océan est ensuite **un milieu chimique** : la mer est composée d'eau et de sels ; la quantité totale de sels est relativement

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.

LE SYSTÈME TERRE ET SES DIFFÉRENTES COMPOSANTES



Atmosphère : enveloppe gazeuse de la planète Terre.

Hydrosphère : partie de la planète occupée par l'eau liquide (océans, mers, lacs, fleuves, nappes phréatiques) et solide (calottes polaires, glaciers, banquise). Cette partie solide constitue la **cryosphère**.

Cryosphère : partie de la planète occupée par de l'eau à l'état solide.

Lithosphère : littéralement, la « sphère de pierre », est la partie superficielle et rigide du **manteau terrestre**. Elle est divisée en un certain nombre de plaques tectoniques.

Biosphère : système planétaire incluant l'ensemble des organismes vivants et des milieux où ils vivent. La partie occupée par l'homme est l'**anthroposphère**.

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].

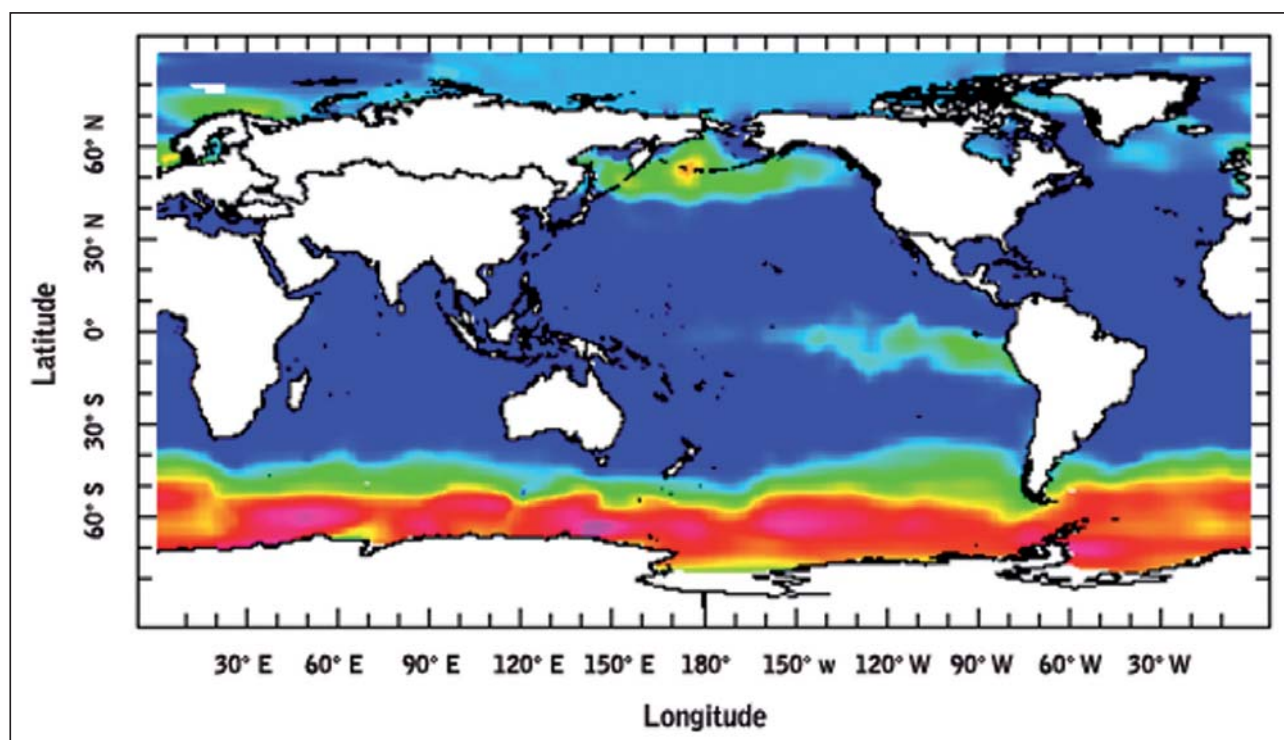
Enfin, l'océan est producteur de **ressources marines**, qui sont actuellement très sévèrement exploitées par l'homme, comme le décrivent les Chapitres de Y. Fouquet, G. Herrouin, J.-L. Charlou et G. Massiot.

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 :

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).



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.

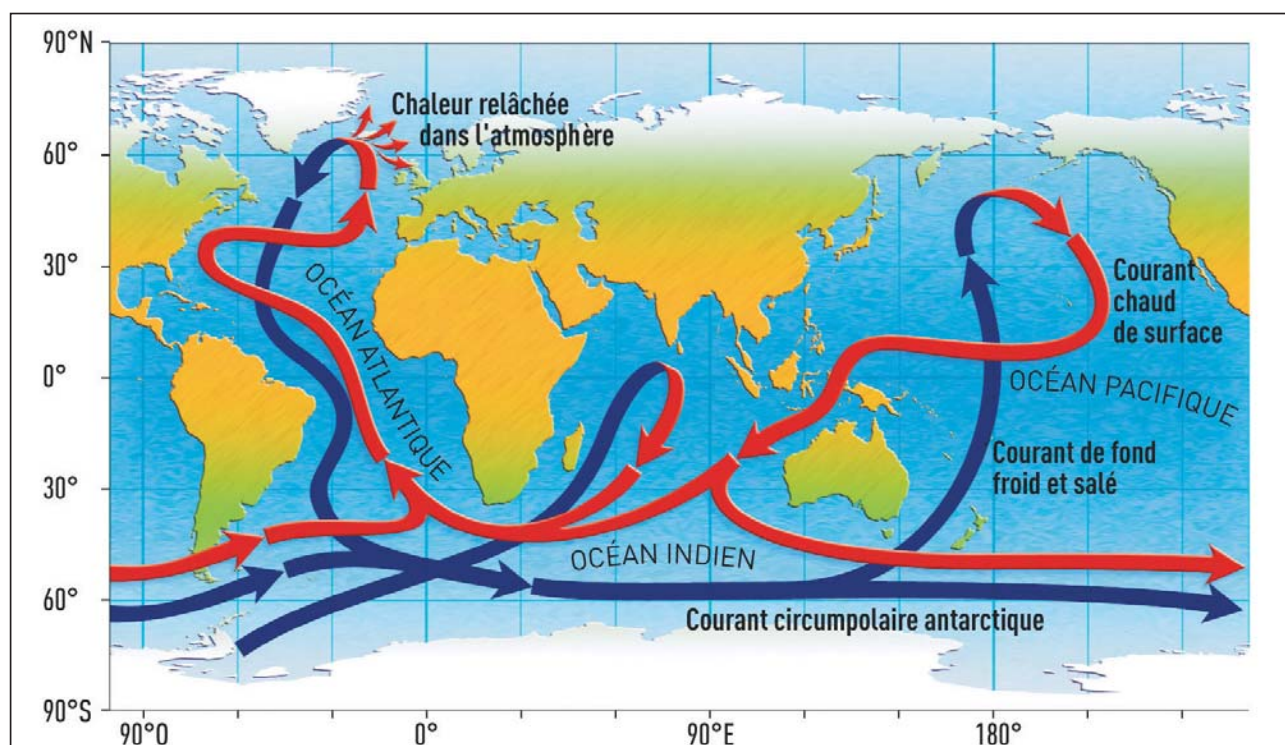
2.1. L'océan, régulateur de température pour la planète

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.



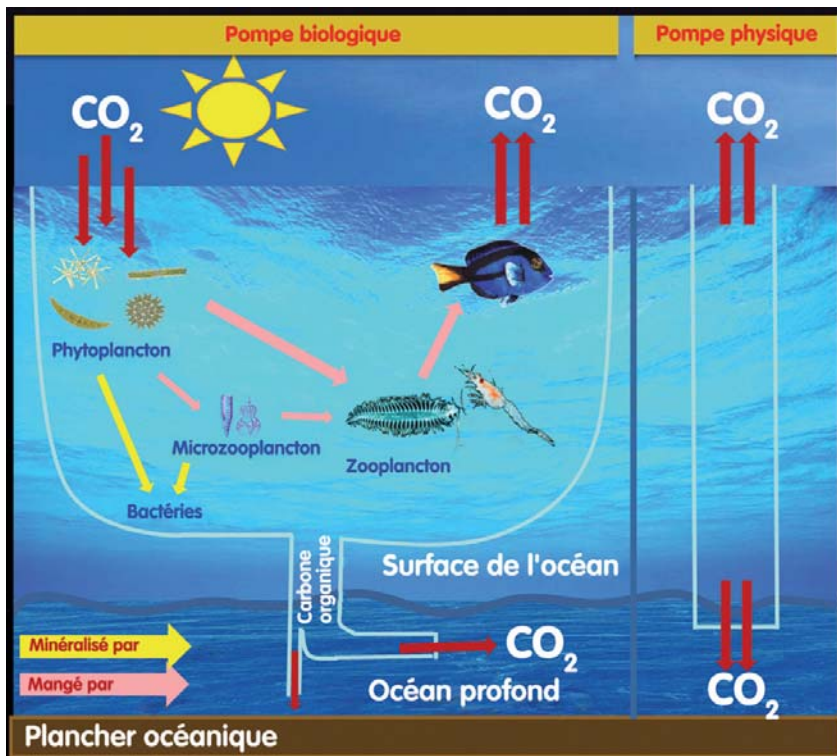


Figure 7

L'océan peut échanger du 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 CO_2

L'océan est également capable de dissoudre de grandes quantités de CO_2 , initialement présentes dans l'atmosphère. Or on sait que le climat évolue directement en relation avec la teneur atmosphérique en CO_2 , lequel est en grande partie responsable du réchauffement climatique par effet de serre. L'océan joue donc également par le biais du CO_2 un rôle dans la régulation du climat. Il contient soixante-cinq fois plus de 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 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 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 (H_2CO_3), qui se dissocie en ions hydrogène-carbonate (HCO_3^-), en ions carbonate (CO_3^{2-}) et en 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 CO_2 avec l'eau. Au final, les eaux polaires sont des « puits » de CO_2 (elles absorbent du CO_2 de l'atmosphère), et les eaux tropicales et équatoriales sont des « sources » (elles émettent du CO_2 vers l'atmosphère).

Le second mécanisme fait intervenir la biosphère marine et est appelé « pompe biologique » de 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 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 particulaire. 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 CO₂ 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 anthropiques¹ à l'échelle globale

Depuis le début de l'ère industrielle, de plus en plus de CO₂ est rejeté dans l'atmosphère. L'océan, grande pompe à CO₂, 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 CO₂ 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.

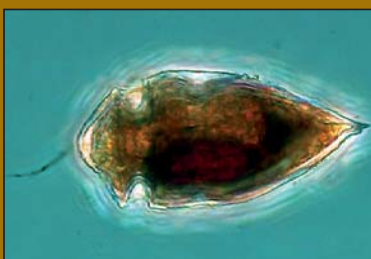


Figure 8

Oxytoxum constrictum, un dinoflagellé, algue microscopique. Il fait 70 microns et a été pêché à 30 mètres de profondeur dans la mer Ligure 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.

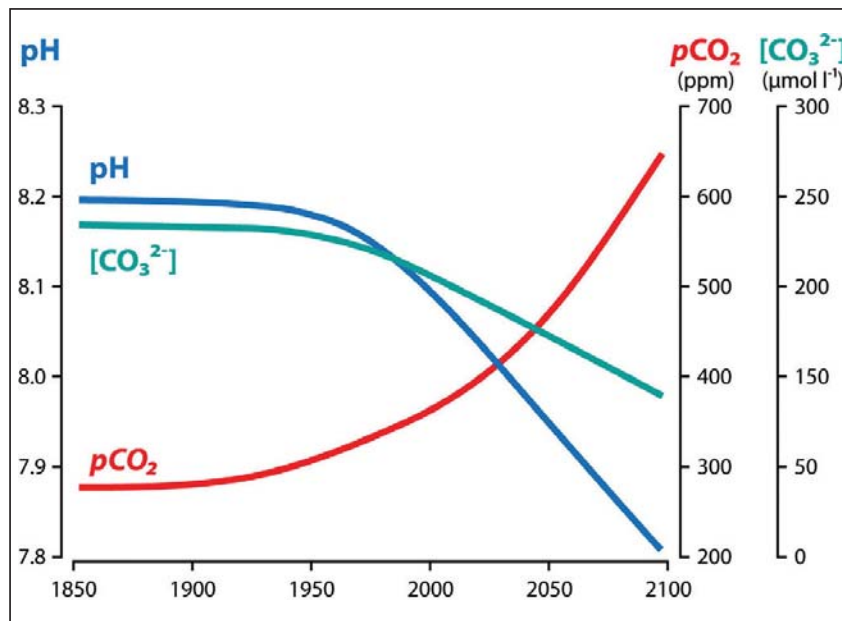


Figure 10

Au cours du ^{xxi}e siècle, la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère ($p\text{CO}_2$) 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 $[\text{CO}_3^{2-}]$.

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 ^{xxi}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

du réseau trophique et donc sur la biodiversité marine [2].

3.2. Les perturbations anthropiques à l'échelle locale

L'homme a-t-il perturbé chimiquement les milieux littoraux? Ceci affecte-t-il la biodiversité marine et la structure des écosystèmes marins? Pour répondre à ces deux questions, nous prendrons l'exemple des flux d'azote nitrique rejeté dans l'Atlantique Nord d'une part, et d'autre part le cas de la rade de Brest avec une modification de la composition du microphytoplancton.

À l'échelle globale, l'utilisation intensive d'engrais pour supporter des rendements élevés à l'hectare dans les pays développés a provoqué en moins de quarante ans le doublement des flux d'azote rejeté à la mer, par rapport au niveau naturel. 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'Amazonie, alors que le débit de ce fleuve est à lui seul dix fois supérieur à celui cumulé des grands fleuves européens (Figure 11).

Les apports anthropiques de nitrates dans les eaux côtières de la France, baignées par la Manche et l'Atlantique, sont à l'origine de spectaculaires « marées vertes » qui polluent de nombreuses plages. Ils contribuent également aux efflorescences de dinoflagellés (dont certaines sont toxiques pour l'homme) au détriment des populations

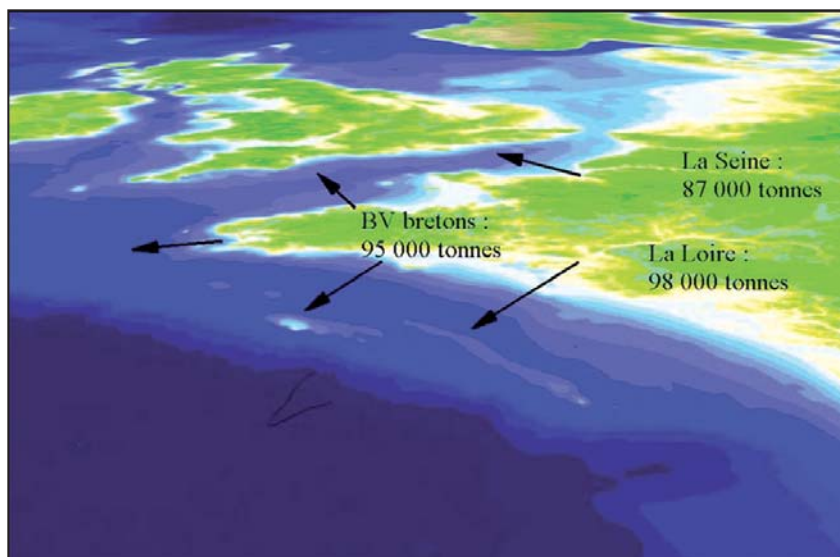


Figure 11

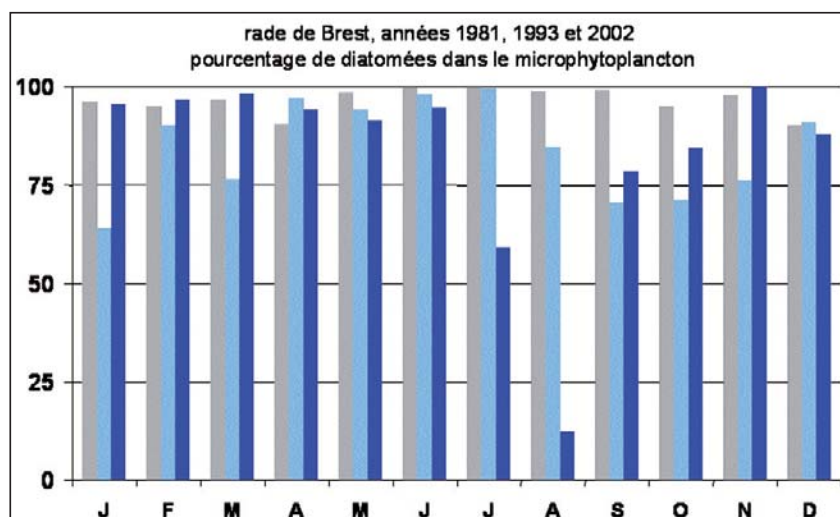
Les flux de nitrates (en tonnes par an) rejetés en Manche et Atlantique par les fleuves du pré-continent armoricain sont comparables, malgré leurs faibles débits, à ceux de la Loire ou de la Seine.

naturelles de diatomées, microalgues à carapaces siliceuses. Ceci est illustré dans le cas de la rade de Brest (Figure 12), où des suivis mensuels d'abondance de microphytoplancton réalisés en 1982, 1993 et 2003 montrent le basculement d'un scénario naturel où les diatomées dominent, en toute saison, à un scénario anthropisé où les dinoflagellés remplacent les diatomées en été. Ceci n'est pas sans conséquence pour le reste de la chaîne alimentaire.

Enfin, outre les rejets issus de l'agriculture, de nombreuses substances chimiques provenant des activités maritimes (pêche, navigation, ...) exposent la mer à des contaminations qui peuvent affecter profon-

Figure 12

La modification de la composition chimique des eaux de la rade de Brest, du fait en particulier de l'augmentation des rejets de nitrates d'origine anthropique, a induit un changement dans la dominance des diatomées par rapport aux dinoflagellés, de 1981 (gris), à 1993 (bleu pâle) puis 2002 (bleu profond).



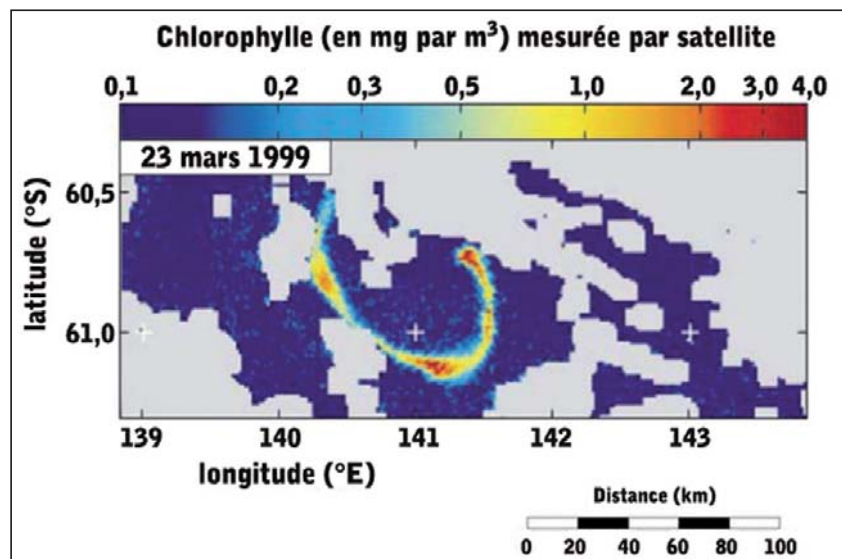
dément les écosystèmes. Des conséquences concrètement observées sur des organismes marins poussent l'homme à surveiller ses activités et à trouver des solutions pour préserver les océans des pollutions chimiques (Voir aussi les Chapitres de L.-A. Romaña et F. Quiniou).

4 L'homme est-il le maître des océans ? Peut-il le manipuler pour diminuer l'effet de serre ?

L'idée d'utiliser l'océan pour séquestrer du CO_2 n'est pas nouvelle. On vient de voir le grand potentiel de l'eau de mer pour dissoudre ce gaz. En matière de mitigation du CO_2 , C. Marchetti a formulé en 1977 différentes options proposées par les géo-ingénieurs [3]. S'agissant de l'océan, deux voies principales sont proposées. La première consiste à optimiser la pompe biologique de carbone dans certaines régions océaniques en les « fertilisant en fer », la seconde à utiliser l'océan profond comme réservoir de CO_2 .

Figure 13

Injection de fer dans les eaux de l'océan Austral : on « fertilise » l'océan en fer. Dans la tâche fertilisée (quelques dizaines de kilomètres carrés) se développe du phytoplancton, et la pompe biologique de dioxyde de carbone est activée.



4.1. « Fertiliser » l'océan en fer

Malgré leur richesse en matières nutritives, l'océan Austral, le Pacifique Est Équatorial et le Pacifique Nord présentent une productivité primaire sub-optimale (Figure 5). Parmi les différentes hypothèses envisagées pour expliquer cette faible productivité, la carence en fer dissous des eaux de surface est généralement privilégiée. Dans le cas de l'océan Austral, les apports de matériel terrigène riches en métaux, déposés sur l'océan par les vents, sont particulièrement faibles. Ceci s'explique par la présence de la calotte glaciaire qui recouvre l'ensemble de la masse continentale. Plusieurs expériences d'injection de fer dans l'océan ont déjà été menées dans le Pacifique Équatorial (1993 et 1995), dans l'océan Austral (1999, 2000, 2002 et 2004) et dans le Pacifique subarctique (2001 et 2002). Ces expériences, décrites dans le Chapitre 2 de la Partie 1, 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 (Figure 13). Elles donnent ainsi un support concret à l'affirmation de John Martin (1988) : « Give me a half tanker of iron and I'll give you an ice age » (« Donnez-moi un demi-tanker de fer et je vous ferai un âge glaciaire ») ; en effet, les périodes glaciaires se caractérisent par une abondance de fer dispersé sur l'océan par les vents, et par une baisse du CO_2 atmosphérique (Voir figure 3).

Des chercheurs français ont aussi montré que cette exacerbation de la pompe biologique de CO_2 par manipulation de l'océan est particulièrement peu efficace, comparée à l'effet de la fertilisation naturelle en fer qui se produit par exemple au-dessus du plateau des Îles Kerguelen. Le Chapitre 2 de la Partie 1 décrit les travaux réalisés par l'équipe de S. Blain dans l'océan Austral. On se doute que cette manipulation de l'océan n'est pas sans conséquence sur le réseau trophique. En ajoutant du fer dans l'océan, on favorise la croissance des algues microscopiques avides de ce métal et on modifie les niveaux trophiques supérieurs.

4.2. Injecter du dioxyde de carbone dans l'océan profond

Nous avons vu précédemment que le temps de résidence des masses d'eaux profondes est de l'ordre du millier d'années. Plusieurs géo-ingénieurs ont donc proposé d'utiliser le réservoir profond pour stocker du CO_2 . À haute pression (on gagne une atmosphère tous les dix mètres de profondeur), le CO_2 se combine avec l'eau pour former un hydrate. Cet hydrate est plus dense que l'eau environnante et circulerait donc en tapissant d'abord le fond des océans. Si, à la sortie des centrales thermiques ou de tout système concentré brûlant des combustibles fossiles, on adaptait une unité de captation, de séparation et de compression, on pourrait récupérer le CO_2 et le faire passer sous forme liquide. On

pourrait imaginer un réseau d'unités de ce type réparties sur le littoral livrant du CO_2 liquide à des tankers, qui vont ensuite le disperser en eau profonde, ou à des pipelines délivrant directement du CO_2 au fond de l'océan.

Imaginons que nous traitions ainsi sous cette forme chaque année six milliards de tonnes de carbone (équivalent à ce nous rejetons actuellement dans l'atmosphère) et que nous les injectons dans les eaux profondes. Que se passerait-il ? En prenant un modèle simple pour simuler la circulation des masses d'eaux et les processus chimiques qui contrôlent le cycle du carbone inorganique dissous, Ken Caldeira (Livermore Marine Laboratory, États-Unis) a pu montrer que 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 [4]. Ce changement drastique du pH atteindrait alors les eaux de surface, avec les impacts majeurs que nous avons déjà signalés. En somme, nous aurions gagné quelques centaines d'années...

5 L'océan est-il un réservoir inépuisable de ressources et d'énergies fossiles ? Peut-on/doit-on les exploiter ?

5.1. De nouvelles sources d'énergie

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 de formule type $\text{CH}_4, 5,7 \text{H}_2\text{O}$. Ces hydrates de méthane se présentent sous forme d'un solide blanc, décomposable dans les conditions usuelles de température et de pression, et qui s'enflamme dans l'atmosphère en présence d'une étincelle. On a identifié d'importants gisements d'hydrates de méthane, non seulement dans les zones à permafrost de Sibérie ou d'Alaska, mais surtout et en abondance dans les océans, le long des pentes abyssales des continents. Les réserves ont été évaluées à 12000 milliards de tonnes, soit plus de deux fois les réserves de charbon au niveau mondial !

Les scientifiques explorateurs ont cherché le moyen de récupérer ces sources potentielles d'énergie (le Chapitre de J.-L. Charlon nous le raconte en détail). Actuellement, des technologies pour l'exploitation de ces gisements sont opérationnelles pour les zones à permafrost. Compte tenu des développements récents des technologies offshore pour l'exploitation des puits de gaz profond, on peut aussi envisager à terme la mise en exploitation de gisements d'hydrates de méthane au fond des océans. Cependant, à maints égards, de telles opérations sont risquées. En effet, la capacité calorifique du méthane est trente-cinq fois plus élevée que celle du CO_2 . Aussi, en cas de fuite importante de méthane au cours de l'exploitation, les conséquences pourraient ne pas être négligeables et contribuer à l'augmentation de l'effet de serre. De toute

façon, il s'agit d'une autre forme d'énergie fossile dont l'exploitation est peu compatible avec une perspective de développement durable.

Alors faut-il l'entreprendre ? Les industriels japonais ont répondu positivement à cette question. Dans le cadre d'une coopération franco-japonaise, une usine pilote fonctionne déjà dans le delta du Mackenzie (Canada) ; des plans d'exploitation industrielle au large du Japon sont tracés pour l'après 2012. Cependant, le Parlement allemand s'est engagé dans une perspective toute différente. Il a demandé en 2004 au gouvernement, d'une part de ne pas financer d'études pour l'exploration des ressources en énergies fossiles, d'autre part de restreindre le financement des études sur les hydrates de gaz à celles liées aux recherches sur le climat, mais d'exclure celles qui envisagent leur exploitation.

5.2. La mer et sa biodiversité, source de médicaments ?

La mer est aussi un immense habitat dont la diversité des occupants dépasse l'imagination, comme nous le découvrons dans le Chapitre de D. Desbruyères. Des poissons, éponges, anémones, coraux, ou encore des organismes microscopiques (bactéries, algues et champignons) ont été prélevés et étudiés en laboratoire. On a découvert que certains produisent des molécules aux structures insoupçonnées, des plus simples aux plus complexes, et présentant des vertus thérapeutiques pour l'homme ! Il s'agit d'anticancéreux, antifongiques, antibiotiques etc. Par exemple,

la céphalosporine a été le premier antibiotique d'origine marine, développé dans les années 1950.

Or actuellement, on ne connaît qu'une fraction infime de l'océan, ce qui conduit à se demander si les fonds sous-marins pourraient être la source des médicaments de demain. Et doit-on pour autant pêcher autant d'organismes pour en extraire les médicaments nécessaires à l'humanité, sachant que ces organismes sont difficiles voire impossibles à élever, souvent peu accessibles dans les fonds (certaines espèces

n'ont été rencontrées qu'une fois), et ne produisent que des quantités infinitésimales de molécules ? Dans le souci de préserver la biodiversité marine, la chimie fournit 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. Mais l'imagination sans limites dont est dotée la chimie permet également de créer des molécules thérapeutiques inédites, souvent inspirées de la nature, comme le montre le Chapitre de G. Massiot.

En conclusion

Le développement économique et l'explosion démographique en cours au xx^e siècle ne peuvent qu'engendrer de profonds bouleversements de notre environnement marin. Nous avons vu qu'à maints égards l'océan joue un rôle régulateur du changement climatique global, permettant d'atténuer ou de différer les impacts de ces bouleversements.

Les **sciences chimiques de l'environnement marin** sont **au cœur des grandes questions que se pose aujourd'hui notre civilisation**. Si l'on veut véritablement mettre en œuvre un **développement durable**, c'est à chaque citoyen d'élaborer sa propre réponse aux interrogations suivantes :

- À l'échelle globale, peut-on/doit-on modifier la composition chimique de l'océan pour augmenter son potentiel dans sa maîtrise du climat de la planète Terre ?
- À l'échelle locale, peut-on/doit-on continuer à modifier l'environnement chimique du littoral sans souci de l'impact sur la modification de la biodiversité ?

Bibliographie

[1] Tréguer P. (2004). La discrète alliance des algues et du vent. *La Recherche*, **355** : 40-42.

[2] Film « Acidification de l'océan », <http://www.euroceans.info/EN/medias/films.php>

[3] Marchetti C. (1977). On geoengineering and the CO₂ problem. *Climatic change*, **1** : 55-68.

[4] a) Film « Faut-il manipuler l'océan ? », <http://www.euroceans.info/EN/medias/films.php> ; b) Wolf-Gladrow P., Riebesell U., Burkhardt S., Bjima J. (1999). Direct effects of CO₂ concentration on growth and isotopic composition of marine phytoplankton. *Tellus B*, **518** : 461-476.

Crédits photographiques

- Fig. 2 : Document SeaWifs.
- Fig. 4 : D'après *International Panel for Climate Change*, 1999.
- Fig. 5 : D'après la base de données Levitus, LDEO, USA.
- Fig. 6 : Sylvie Dessert.
- Fig. 8 : CNRS Photothèque/ DOLAN John, UMR7093
 - Laboratoire d'océanographie de Villefranche (LOV)
 - Villefranche sur mer.
- Fig. 9 : CNRS Photothèque / LOPEZ GARCIA Purification, UMR8079 - Écologie, systématique et évolution (ESE)
 - ORSAY.
- Fig. 11 : P. Arousseau, comm. pers.
- Fig. 12 : Beucher C., Tréguer P., Corvaisier R., Hapette A.-M., Elkens M. (2004). Production and dissolution of biogenic silica in a coastal ecosystem (Bay of Brest), *Marine Ecology Progress Series*, **267** : 57-69.
- Fig. 13 : Boyd P. W., Watson A. J., Law C. S., Abraham E. R., Trull T., Murdoch R., Bakker D. C. E., Bowie A. R., Buesseler K. O., Chang H., Charette M., Croot P., Downing K., Frew R., Gall M., Hadfield M., Hall J., Harvey M., Jameson G., LaRoche J., Liddicoat M., Ling R., Maldonado M. T., McKay R. M., Nodder S., Pridmore S. P. R., Rintoul S., Safi K., Sutton P., Strzepek R., Tanneberger K., Turner S., Waite A., Zeldis J. (2000). A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. *Nature*, **407** : 695-702.