

Océan mondial, effet de serre et changement climatique: étude des interactions

Les scientifiques recourent à des méthodes et outils novateurs pour comprendre l'importance des océans dans le système climatique de la Planète

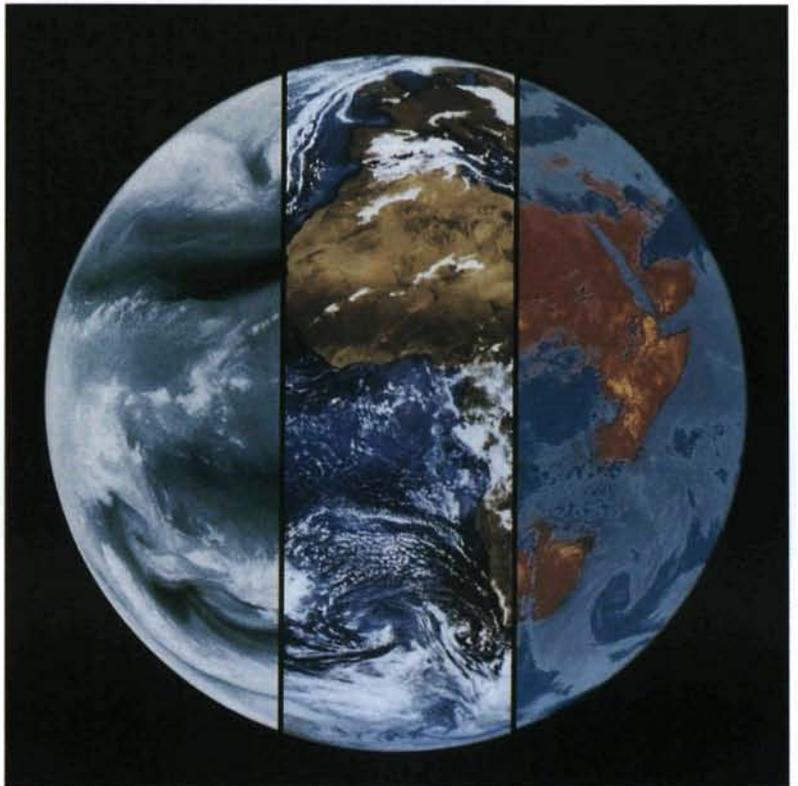
La masse océanique mondiale se compose de 1,3 milliard de kilomètres cubes d'eau salée recouvrant 71% de la superficie de la Planète. Cet énorme volume d'eau exerce une forte influence sur l'écosystème mondial. Il alimente le cycle hydrologique des continents, joue le rôle de thermostat mondial qui atténue les gradients thermiques résultant des variations temporelles et spatiales des rayonnements solaires, régule la teneur de l'atmosphère en certains gaz à l'état de traces et sert de décharge à de nombreux contaminants d'origine humaine.

Les fluctuations climatiques sont couramment assimilées aux changements qui se produisent dans l'atmosphère. Pourtant, on ne peut se borner à l'étude de l'atmosphère. Les phénomènes atmosphériques sont étroitement liés aux continents, aux océans et aux zones recouvertes de glace (qui constituent la cryosphère). Il existe aussi une liaison étroite avec la biosphère qui comprend les organismes vivants sur les continents et dans les océans. L'atmosphère, les continents, les océans, la cryosphère et la biosphère forment à eux tous la structure fondamentale du système climatique (voir schéma, page 27).

Pour comprendre le système climatique, il faut, entre autres, savoir comment s'opèrent les échanges de chaleur, d'eau et de gaz à effet de serre entre l'océan et l'atmosphère. Par exemple, il faut savoir quelles sont les principales caractéristiques de la circulation des océans; à quel rythme l'océan profond réagit aux changements atmosphériques et quels

sont les phénomènes à l'origine de la formation et de la résorption de la glace de mer. Les concentrations atmosphériques de plusieurs gaz à effet de serre importants (dioxyde de carbone (CO₂), méthane, oxyde de diazote) ont évolué naturellement depuis l'ère glaciaire et augmentent depuis l'ère préindustrielle par suite des activités humaines. L'océan joue un rôle important dans le rythme du réchauffement dû à l'effet de serre qu'il contribue à ralentir en absorbant les excédents de gaz à effet de serre de l'atmosphère ainsi qu'une partie de la chaleur induite par cet effet. Sans l'effet tampon de l'océan, la température globale de l'atmosphère au niveau du sol

par K. Rozanski,
S.W. Fowler et
E.M. Scott



M. Rozanski travaille à la section de l'hydrologie isotopique de la Division des sciences chimiques et physiques de l'AIEA; M. Fowler dirige le Laboratoire de radioécologie du Laboratoire d'étude du milieu marin de l'AIEA à Monaco (LEMM), et M. Scott est maître de conférences au Département de statistiques de l'Université de Glasgow (Ecosse).

Photo: Agence spatiale européenne.

serait probablement aujourd'hui supérieure d'un ou de deux degrés Celsius.

La question qui se pose est de savoir si l'océan continuera de ralentir le réchauffement et à quel rythme. Il faut pouvoir répondre à cette question avec suffisamment de précision pour être en mesure de prédire toute l'ampleur du changement climatique. C'est pourquoi il nous faut comprendre beaucoup mieux 1) les échanges de gaz à l'interface air-mer, en ce qui concerne en particulier le CO₂, 2) les voies de transfert des gaz à effet de serre de la surface vers les couches profondes de l'océan et les sédiments et 3) les facteurs régissant la circulation de l'océan.

L'océan en mouvement

La circulation océanique de surface induite par le vent n'entraîne qu'un déplacement horizontal de la chaleur et de l'eau. La circulation thermo-haline, beaucoup plus lente, résulte d'une très forte évaporation des eaux denses de surface, qui s'enfoncent dans l'océan profond, abaissant la température et/ou augmentant la salinité. Ce phénomène oblige d'une part les couches profondes de l'océan à interagir avec l'atmosphère et «ouvre» d'autre part le volume énorme de l'océan profond qui acquiert ainsi, entre autres propriétés, celle de stocker de la chaleur et du CO₂.

Cette immersion des eaux denses de surface ne se produit actuellement que dans quelques régions océaniques circonscrites. La mouvement de convection le plus profond a été enregistré dans la partie septentrionale de l'Atlantique Nord (Norvège et Groenland) et vers l'Antarctique (mer de Weddell). Dans l'Atlantique Nord, l'eau de surface, réchauffée par un long contact avec l'atmosphère, est refroidie et dissout encore du CO₂ avant de s'enfoncer sous forme d'eau relativement salée dans l'océan profond. Dans l'hémisphère Sud, l'eau profonde remontée à la surface, qui depuis relativement longtemps n'était plus en contact avec l'atmosphère, se transforme rapidement en eau froide dense à forte teneur en CO₂ avant de replonger dans les couches profondes de l'océan. Ces deux masses d'eau, qui ont chacune

leurs caractéristiques propres, se répandent dans tout l'océan et entraînent une remontée lente mais régulière des eaux profondes «résidentes».

Ces eaux profondes «résidentes» se composent d'eaux plus anciennes qui ont été modifiées par des processus de mélanges verticaux, par les matières organiques en provenance de la surface des mers et par le contact avec les sédiments du fond des océans. Pour finir, les remontées d'eau retournent vers leur région d'origine, bouclant ainsi le cycle de la circulation (voir diagramme).

Le rythme et le mode de formation des eaux profondes dans l'Atlantique Nord et du transfert de chaleur océanique vers les hautes latitudes sont fonction de la circulation des eaux de surface dans la région. La salinité excessive (avec les flux de chaleur qui l'accompagnent et qui dépendent de l'écoulement de l'eau de surface dans l'Atlantique) crée de puissants fronts océaniques, définit les limites des glaces de mer et réchauffe la région adjacente de l'Europe septentrionale. L'ensemble du système s'est révélé hautement instable, que l'on compte en décennies ou qu'on se place à l'échelle historique ou géologique. Ainsi, on sait d'après l'histoire que des perturbations, même mineures, des limites des glaces et de la salinité, de la température et de l'apport des eaux de surface peuvent avoir de graves incidences sur le climat, l'économie et les conditions de vie en Europe. On en a eu un exemple entre le 15^{ème} et le 18^{ème} siècle, ère que l'on appelle le Petit âge glaciaire.

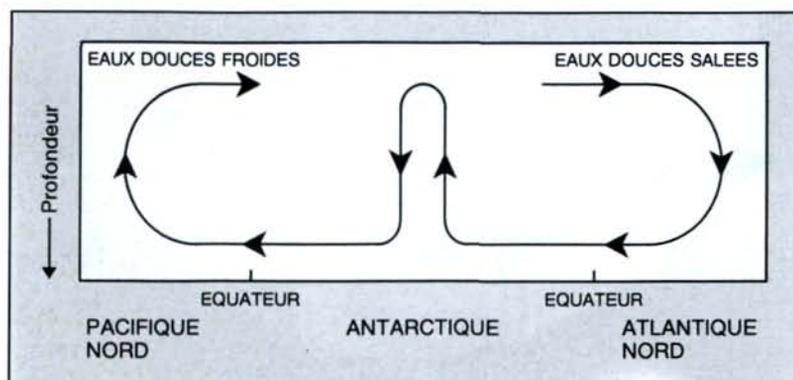
Modélisation de la dynamique de l'océan

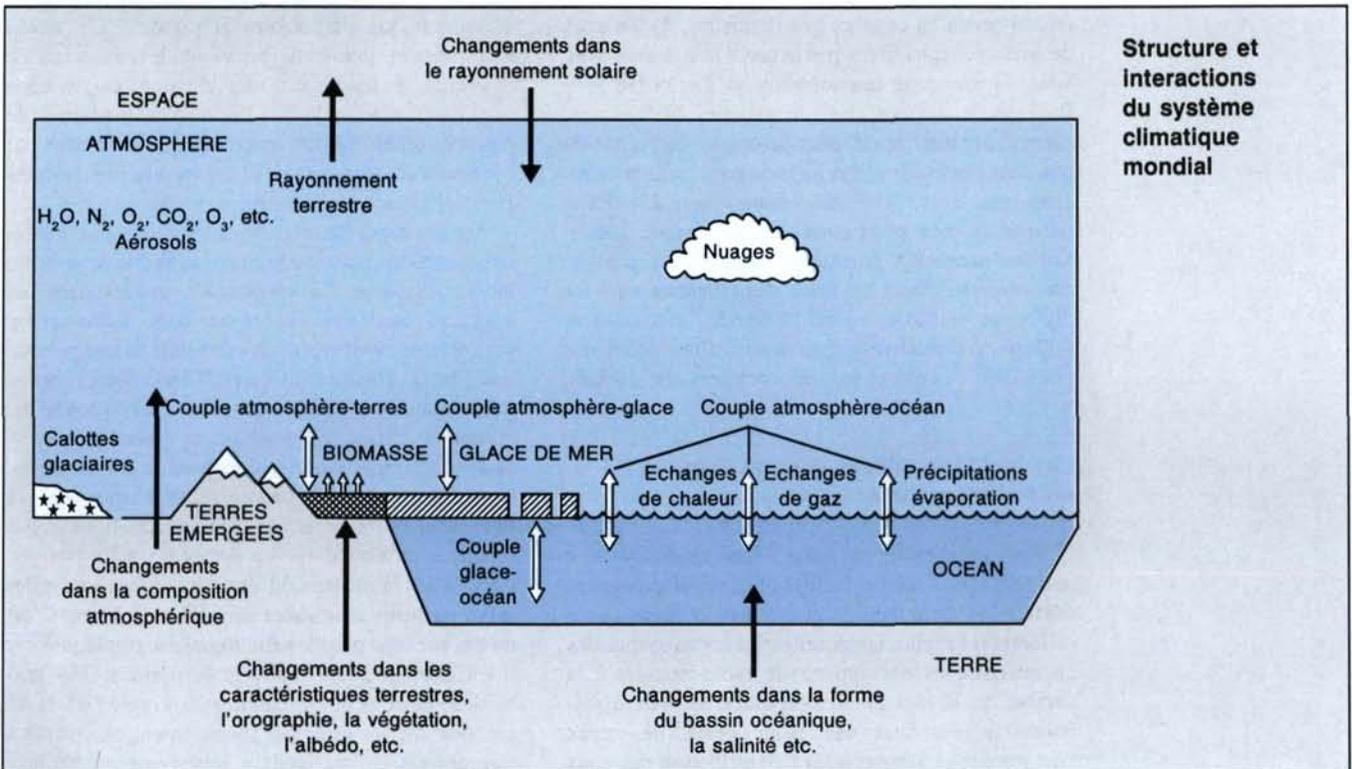
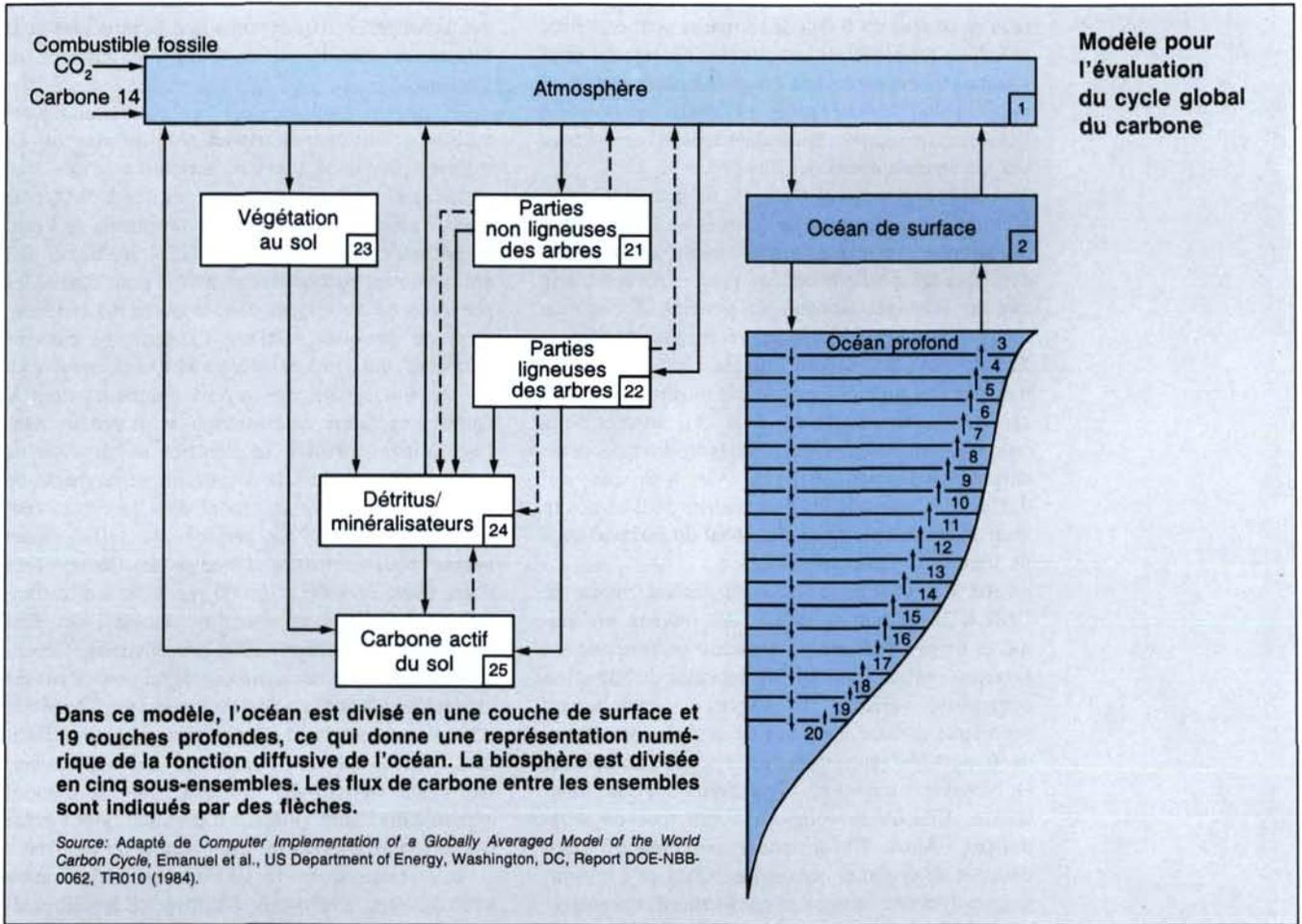
Deux activités interdépendantes permettent de mieux comprendre la dynamique de l'océan et le rôle qu'il joue dans le cycle global du carbone: la modélisation mathématique du système, et les études expérimentales et observations détaillées.

En effet, la modélisation permet de faire la synthèse des connaissances acquises grâce à des projets bio-géochimiques et de dresser un tableau de la structure et des caractéristiques générales des interactions du système à l'étude. Le cycle du carbone est complexe et l'échelle temporelle des phénomènes dont tout modèle doit tenir compte est comprise entre des années et des siècles. C'est pour cette raison qu'il importe de faire la synthèse des connaissances disponibles.

Un modèle, aussi complexe soit-il, est toujours une simplification du monde réel. C'est une description empirique d'un système, capable uniquement de figurer des phénomènes qui sont importants pour une échelle spatiale ou temporelle donnée. Les résultats du modèle sont entachés d'incertitudes par suite du nombre limité des processus physiques, chimiques et biologiques dont il peut tenir compte et de l'insuffisance du traitement qu'on leur accorde, notamment par manque de connaissances quantitatives sur le rythme auquel ils se produisent.

Représentation simplifiée de la circulation de l'océan mondial





La modélisation est liée aux travaux expérimentaux en ce sens qu'il faut des données pour étalonner et valider les modèles. Les données nécessaires pour chaque modèle dépendent des phénomènes étudiés et peuvent aller d'observations à l'échelle des océans à des séries de mesures hautement spécialisées portant sur un nombre limité de sites précis.

Compte tenu de ces réserves, on peut établir une hiérarchie des modèles applicables au cycle global du carbone. Au niveau le plus simple, on ne considère que les phénomènes les plus importants, tels que les échanges air-eau. En général, il s'agit de modèles à boîtes figurant des réservoirs spécifiques de carbone. Au niveau suivant, on élabore des modèles uni- ou bi-dimensionnels illustrant certaines caractéristiques stables du cycle. Au sommet de la hiérarchie se trouvent les modèles tri-dimensionnels chronologiquement évolutifs. Ce sont eux qui donnent la description la plus réaliste de la structure et de la dynamique du cycle global du carbone mais ils sont encore peu développés.

Au Laboratoire d'étude du milieu marin de l'AIEA à Monaco (LEMM), des travaux préliminaires de modélisation du cycle du carbone ont été entrepris en utilisant divers modèles à boîtes de complexité variable. Le cycle du carbone est représenté comme une série de milieux interdépendants dont les quatre principaux sont l'atmosphère, la biosphère terrestre, l'hydrosphère et la lithosphère. Chacun se compose à son tour de sous-milieux. Ainsi, l'hydrosphère se compose d'eau douce et de systèmes océaniques. Quoi qu'il en soit, pour le cycle du carbone, il nous suffit de considérer l'océan.

Aux fins de la modélisation, on divise généralement l'océan en couches fonctionnelles: 1) les eaux de surface, réchauffées par le soleil et agitées par le vent, 2) une zone intermédiaire et 3) l'océan profond. A la surface, les phénomènes biologiques, particulièrement actifs, sont de courte durée, tandis que dans l'océan profond les changements sont beaucoup plus lents. (*Voir diagramme, page 27*). Dans un modèle conceptuel donné, il faut ensuite quantifier les nombreux paramètres nécessaires, c'est-à-dire essentiellement la vitesse des échanges entre les différents milieux. Une méthode couramment utilisée est d'étudier la distribution d'une substance trace dans l'océan et de voir comment elle évolue.

Les isotopes utilisés comme traceurs en océanographie

Les radio-isotopes aussi bien artificiels que naturels sont l'outil principal dont on dispose pour étudier la dynamique de la circulation océanique à différentes échelles temporelles. La connaissance des caractéristiques des apports de radio-isotopes à la surface de la mer et de l'évolution de leur distribution à l'intérieur des eaux permet de mieux comprendre la formation et la distribution des eaux

profondes dans les zones de remontées, le rythme des échanges verticaux ainsi que la structure et la vitesse de circulation de l'eau à l'intérieur de l'océan.

Parmi les radio-isotopes les plus couramment utilisés, il faut citer le tritium et le carbone 14. Le tritium, produit des essais nucléaires passés, fait partie de la molécule d'eau et constitue à ce titre un traceur idéal pour étudier les mouvements de l'eau. Sa période relativement courte (12,4 années) en fait un instrument particulièrement utile pour étudier les phénomènes océaniques dont la durée est généralement de quelques dizaines d'années. Le carbone radioactif, qui a une période de 5730 ans, est produit par les interactions des rayons cosmiques dans la couche supérieure de l'atmosphère. Il pénètre dans l'océan par diffusion moléculaire de dioxyde de carbone 14 à travers la couche limite stagnante de surface et se trouve incorporé dans le cycle océanique du carbone. Sa période est suffisamment longue pour permettre d'étudier des phénomènes d'une durée de 1000 à 10 000 ans, c'est-à-dire comparable au temps de séjour moyen de l'eau dans l'ensemble de l'océan (1000 ans environ). Cependant, du carbone radioactif a aussi été produit par les explosions d'armes nucléaires des années 50 et 60 et plus récemment par la production d'énergie d'origine nucléaire et le retraitement du combustible. Ce signal de carbone artificiel, qui est d'abord apparu dans l'atmosphère, est essentiel pour l'étude des différents aspects du cycle global du carbone.

Les scientifiques du LEMM, en collaboration avec d'autres, s'efforcent d'utiliser ce traceur artificiel pour étudier les systèmes bio-géochimiques de l'océan et les échanges entre le carbone organique et inorganique particulaire et dissous. Ce travail extrêmement minutieux nécessite le recours à de nouvelles techniques d'identification du carbone organique ainsi qu'à des techniques modernes de mesure, telles que la spectrométrie de masse par accélérateur, convenant à la mesure de carbone radioactif des très petits échantillons.

Récemment, deux radio-isotopes de gaz nobles ont été utilisés pour étudier la dynamique de la circulation océanique. Le krypton 85, produit dans des réacteurs nucléaires et rejeté dans l'atmosphère durant le retraitement du combustible, a une période analogue à celle du tritium (10,7 ans). Son évolution dans l'atmosphère est bien connue. Le krypton 85 est considéré comme une solution de rechange intéressante pour remplacer le tritium produit par les explosions, qui a déjà été transféré de l'atmosphère à l'océan par l'intermédiaire des précipitations et des échanges moléculaires. Le deuxième radio-isotope, l'argon 39, n'est produit que de sources naturelles (rayonnements cosmiques dans l'atmosphère). C'est un traceur utile pour les études océanographiques car il est chimiquement inerte et sa période (269 ans) se situe entre celle du tritium, du krypton 85 et du carbone 14. Le principal inconvénient de ces deux traceurs est qu'une analyse relativement complexe

est nécessaire pour déterminer leur activité dans l'eau des océans.

L'utilisation de traceurs radioactifs tels que le carbone apporte de nouveaux éléments importants pour la compréhension de la transformation biochimique du carbone dans les océans. En outre, elle garantit que les nouveaux modèles qui pourront être élaborés comportent les données requises pour l'étalonnage et la validation.

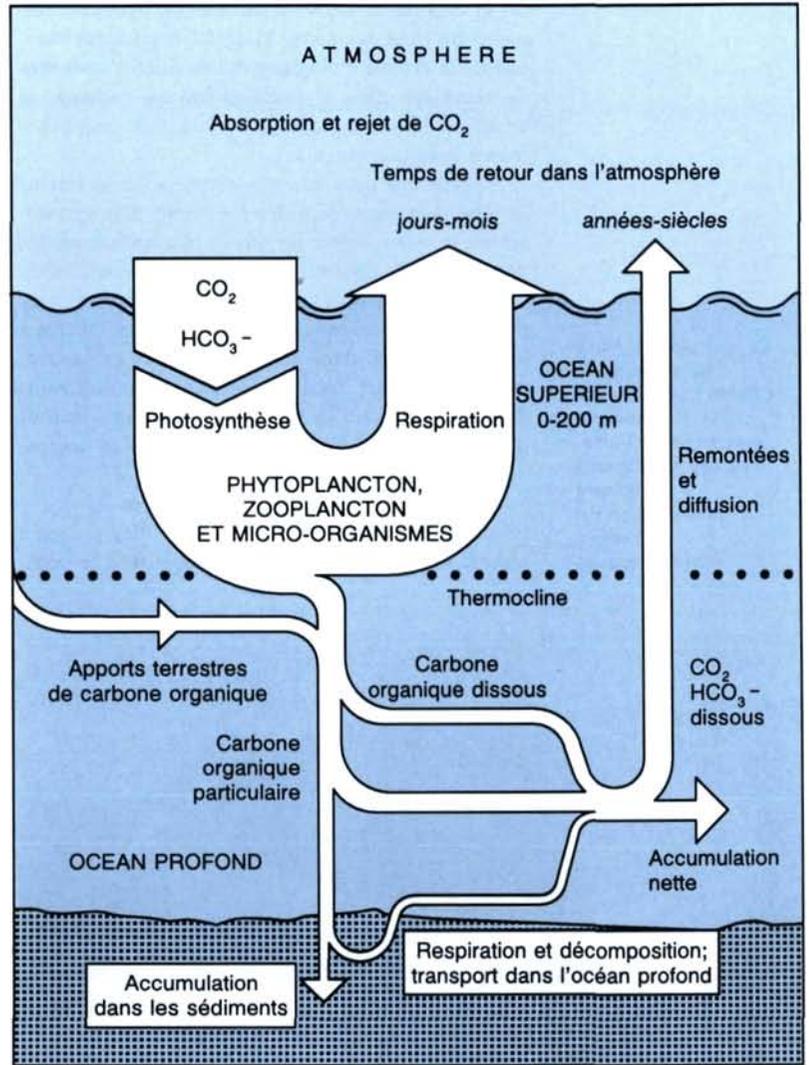
Cycle du carbone dans l'océan

Sur les quantités de CO_2 que l'on estime pouvoir attribuer à l'utilisation des combustibles fossiles et à l'évolution de l'utilisation des terres, moins de 60% se retrouvent actuellement dans l'atmosphère. Une grande partie du reste serait absorbée par l'océan, à un rythme d'environ 2 gigatonnes par an (une gigatonne de CO_2 équivaut à 10^{15} grammes de carbone). Du fait que l'océan stocke des quantités de carbone environ 50 fois supérieures à celles qui sont présentes dans l'atmosphère, un changement relativement peu important dans le cycle du carbone océanique — dû à un changement climatique et/ou à des variations dans la circulation océanique — peut se traduire par des variations sensibles de la teneur de l'atmosphère en CO_2 .

Ainsi, on a estimé que les quantités d'azote atmosphérique artificiel absorbées par un océan complètement stagnant seraient quatre fois inférieures à ce qu'elles sont actuellement. Une intensification de la circulation porterait par contre l'absorption de toutes les émissions actuelles de CO_2 dues à l'homme à près de 90%. Il ne s'agit là toutefois que d'une estimation grossière et on sait mal en réalité comment les capacités océaniques d'absorption du CO_2 évoluent à différentes échelles temporelles.

Ces problèmes sont actuellement abordés dans le cadre de l'Etude conjointe des flux océaniques mondiaux, l'un des projets centraux du Programme international concernant la géosphère et la biosphère (PIGB). Le programme est axé sur la dynamique du CO_2 , le cycle du carbone dans l'océan et sa sensibilité aux changements écologiques.

Le cycle du carbone dans l'océan est régi par une série de réactions réversibles d'oxydoréduction entre le CO_2 dissous et les matières organiques, les organismes marins jouant le rôle de principaux catalyseurs. Le carbone biogénique (organique et particulaire) est produit par photosynthèse dans les 100 mètres constituant la couche supérieure (appelée la couche euphotique). Ces petites particules biogéniques créées par un processus de «production primaire» entrent dans la chaîne alimentaire. Le résultat est que le carbone est incorporé par les organismes dans leur processus de croissance, respiré sous forme de CO_2 ou encore transformé en débris organiques qui sont exportés des couches de surface par gravité. Cette pluie ininterrompue de



particules — que l'on appelle la pompe biologique — est au centre de toutes les études biogéochimiques du milieu marin axées sur les changements écologiques mondiaux. (Voir figure).

Selon de récentes évaluations, la pompe biologique océanique peut exporter de la zone euphotique environ 7,4 gigatonnes de carbone organique sous forme de particules par an. Ce chiffre représente environ 15% de la production primaire mondiale estimée et équivaut approximativement à l'apport annuel de CO_2 dans l'atmosphère dû aux combustibles fossiles.

A mesure que les particules biogéniques détritiques s'enfoncent lentement vers les profondeurs, plus de 90% du carbone organique exporté est recyclé en carbone inorganique dissous par l'activité conjuguée des bactéries, de l'ingestion animale et de la reminéralisation mécanique. Ainsi, normalement, moins de 1% du carbone organique produit dans la couche euphotique pénètre jamais dans l'océan profond et, sur ces quantités, seule une petite fraction

Principaux éléments de la «pompe biologique» de l'océan

est incorporée de manière permanente dans les sédiments du fond des mers. Malgré l'importance capitale de la pompe biologique et des filières connexes de recyclage dans le cycle global du carbone, la structure, les mécanismes et le rythme de ces phénomènes sont mal connus.

Depuis quelques années, les pièges à sédiments — que l'on peut considérer comme des «pluviomètres marins» — sont de plus en plus utilisés par les océanographes pour quantifier le flux descendant du carbone et des autres éléments associés aux matières particulaires. Malgré plusieurs problèmes inhérents à leur utilisation dans des masses d'eau en mouvement telles que l'océan, les pièges à sédiments demeurent le seul outil disponible pour mesurer directement de manière assez précise le flux descendant des particules marines.

Depuis 1987, le LEMM collabore avec des scientifiques français en mettant en place des pièges à sédiments sous la couche euphotique dans le nord-

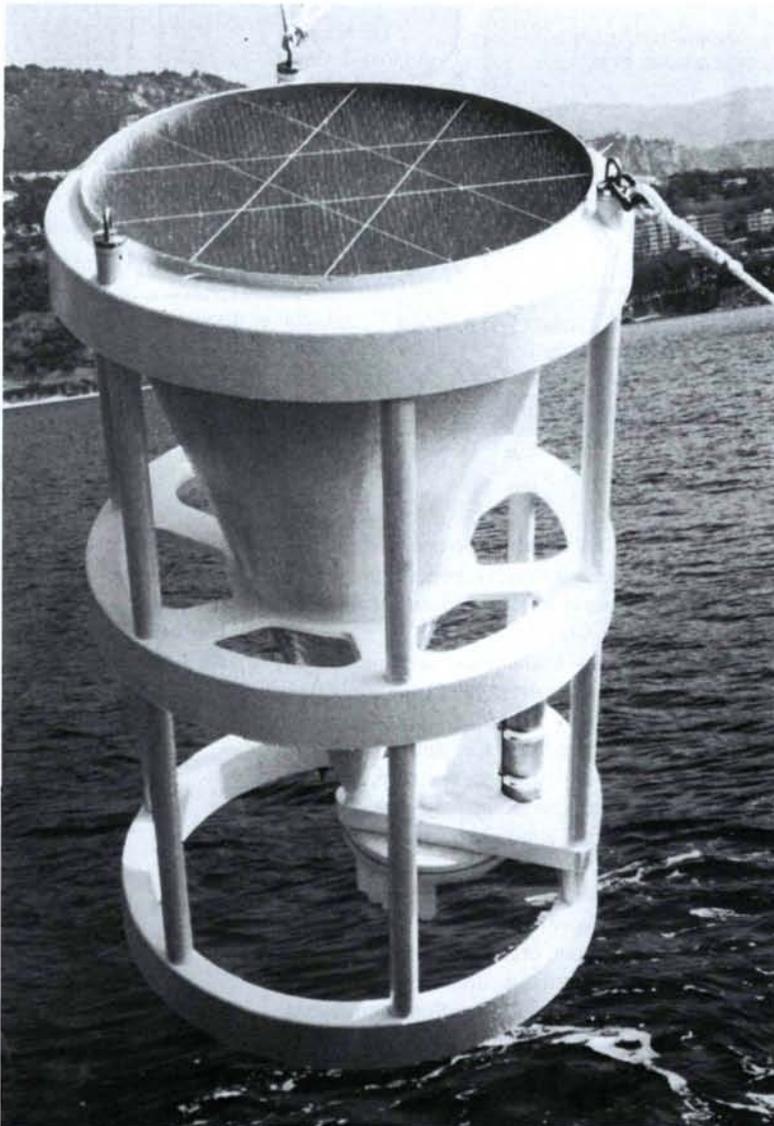
ouest de la Méditerranée (mer Ligurienne). L'objectif est de suivre les variations interannuelles de l'élimination du carbone des couches superficielles de l'océan dans cette région. Il ressort des résultats préliminaires que l'on ne peut se borner à considérer l'exportation des particules de carbone des eaux de surface comme un lent phénomène uniforme de sédimentation; il s'agit plutôt «d'impulsions» de particules liées aux schémas de productivité biologique dans les eaux superficielles.

Les scientifiques s'intéressent au flux descendant du carbone organique de la couche euphotique car ils pensent qu'il est proportionnel à la «nouvelle production». Autrement dit, celle-ci se définit comme la fraction de la production primaire provenant de l'azote importé de l'extérieur de la couche euphotique, l'hypothèse étant qu'à long terme les exportations d'azote et de carbone doivent s'équilibrer avec les quantités importées dans la couche euphotique. En conséquence, si l'on admet que la nouvelle production est proportionnelle au carbone exporté de la couche euphotique, on peut alors calculer les quantités de CO₂ évacuées de la surface vers l'océan profond. Compte tenu des ramifications importantes du concept de nouvelle production, les scientifiques recherchent d'autres moyens de quantifier ce phénomène.

L'une des méthodes à laquelle les scientifiques s'intéressent beaucoup utilise un radionucléide naturel, le thorium 234, comme traceur servant à quantifier la formation des particules et l'exportation dans les eaux de surface. Le thorium 234, contrairement à son parent soluble, l'uranium 238, réagit aux particules et, grâce à sa période relativement courte (24,1 jours), peut être utilisé pour décrire des phénomènes biogéochimiques d'une durée allant de quelques jours à quelques mois. Des études récentes ont montré que, du fait de sa forte association avec les particules biogéniques, il existe une relation inversement proportionnelle entre le temps de séjour du thorium 234 dans l'eau de mer et le taux de production primaire. Si les particules auxquelles le thorium est adsorbé sont biogéniques, on peut utiliser le thorium 234 avec les données sur le carbone particulaire pour estimer les quantités de carbone exportées ou la nouvelle production. Dans la plupart des régions océaniques ouvertes, la majorité des particules en suspension sont biogéniques, de sorte que la technique utilisant le thorium 234 offre de grandes possibilités.

Dans le cadre de l'étude conjointe réalisée dans la mer Ligurienne, le LEMM a entrepris d'examiner les relations entre les flux de thorium 234 particulaire et ceux de carbone. Les résultats obtenus à ce jour indiquent une corrélation entre les flux de thorium 234 particulaire et les quantités de carbone exportées de la couche euphotique mais cette corrélation est parfois troublée en ce qui concerne en particulier le rapport thorium 234/carbone. On s'efforce actuellement de comprendre l'origine de ces variations.

Le laboratoire d'étude
du milieu marin
de l'AIEA utilise comme
«pluviomètre
à particules marines»
ce piège à sédiments
produisant
automatiquement
des séries
chronologiques

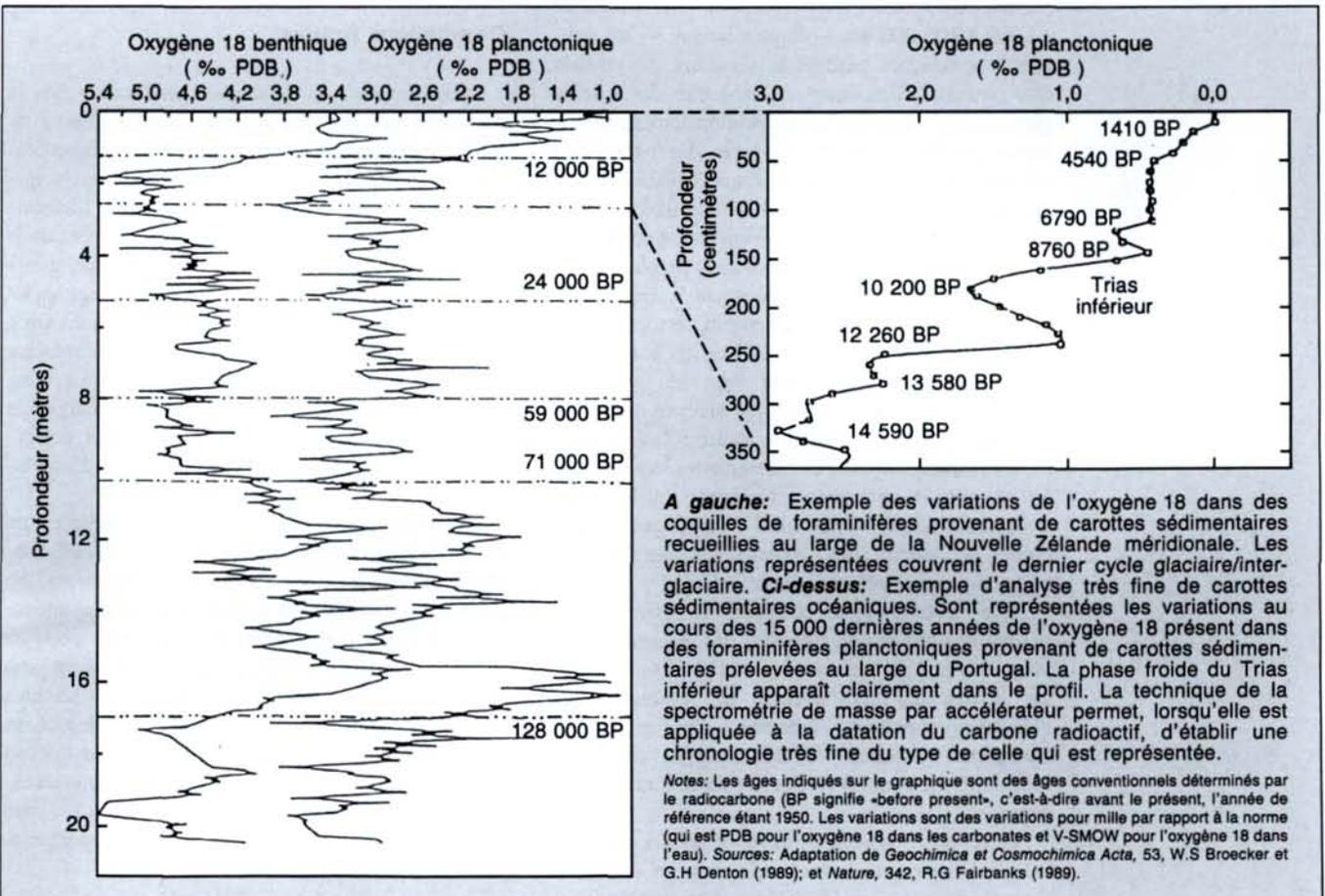


Une autre méthode utilisée pour quantifier les apports de CO_2 artificiel à l'océan se fonde sur l'estimation du flux mondial net de CO_2 traversant l'interface air-mer. Pour ce faire, on calcule les valeurs globales moyennes de deux variables: 1) la différence entre la pression partielle de CO_2 à la surface de l'océan et dans l'atmosphère, et 2) le coefficient de transfert des gaz pour le CO_2 . Du fait que les deux paramètres varient fortement suivant la saison et la zone, cette méthode comporte un assez grand nombre d'incertitudes quant à l'apport estimatif de CO_2 . Des radio-isotopes, et surtout du carbone 14 issu d'explosions nucléaires et du radon 222 naturel, ont été utilisés pour calculer le coefficient de transfert des gaz pour le CO_2 . Des recherches sont effectuées pour parvenir à une meilleure couverture de vastes régions océaniques et pour trouver les moyens de suivre les variables grâce à la télé-détection.

Un autre moyen encore de mesurer le rôle actuel de l'océan dans le cycle global du carbone est de modéliser les variations spatiales et temporelles observées des concentrations de CO_2 dans l'atmosphère. En général, on utilise des modèles tridimensionnels de transport pour simuler la distribution mondiale du CO_2 à partir d'hypothèses précises concernant l'intensité et l'emplacement des flux de

surface de CO_2 , notamment dans les régions océaniques. L'atmosphère intègre les flux provenant de toutes les sources et de tous les réservoirs. On y trouve donc inscrites sur une grande échelle les caractéristiques et signatures des sources et des réservoirs de CO_2 qui, du fait qu'elles sont très variables, sont difficiles à mesurer sur une petite échelle.

Les données fournies par le réseau international de stations de surveillance du CO_2 , situées pour la plupart dans des régions océaniques, ne peuvent être utilisées pour résoudre les gradients longitudinaux des concentrations de CO_2 . Par conséquent, il est difficile d'utiliser cette méthode pour identifier avec suffisamment de précision les sources et réservoirs importants. Du fait que le rapport carbone 13/carbonate 12 dans le CO_2 rejeté par l'océan et par la biosphère terrestre varie considérablement, on espère que des mesures très précises des variations à grande échelle permettront de quantifier la contribution des continents et des océans à l'équilibre global du carbone. L'AIEA participe activement à ces recherches dans le cadre d'un programme coordonné sur les variations isotopiques du dioxyde de carbone et d'autres gaz traces dans l'atmosphère. Le programme s'efforce principalement de fournir des séries chronologiques établies à partir d'analyses



isotopiques des gaz présents dans l'atmosphère à l'état de traces en des points précis.

Archive écologique mondiale

L'océan, mémoire mondiale des changements passés, conserve la trace de toutes les modifications de l'état de la Planète provoquées par l'homme. Il est essentiel de faire la distinction entre les variations dues à l'homme et celles qui sont naturelles, ces dernières étant déduites de l'étude des traces laissées à des échelles temporelles différentes. De toutes les archives naturelles qui nous renseignent sur l'histoire du climat océanique et l'atmosphère, l'océan est celle qui présente le plus de continuité. Il constitue en outre une mine de renseignements sur les principaux éléments des interactions chimiques et biologiques qui se produisent dans le système.

Du fait qu'il est si vaste, le système océanique est porteur d'un puissant signal mondial. Il nous donne également des informations sur des événements régionaux tels que le phénomène El Niño/oscillation australe ou les mouvements des fronts glaciaires. Dans les mers marginales et le long des continents, il éclaire des événements tels que l'évolution de l'aridité ou l'apport aux océans des particules et matières dissoutes transportées par les cours d'eau.

Les archives océaniques peuvent être considérées suivant trois échelles temporelles. Sur une échelle de 10 000 à 100 000 ans — la plus longue — les sédiments océaniques gardent la signature des grands changements climatiques, c'est-à-dire les cycles glaciaires et interglaciaires principalement déterminés par les variations cycliques des paramètres orbitaux du système planétaire que Milankovitch a été le premier à postuler. A l'échelle intermédiaire — 1000 à 10 000 ans — des événements non périodiques d'amplitude significative mais de plus courte durée tels que le Trias inférieur en Europe ou la Petite ère glaciaire se superposent aux cycles de Milankovitch. Enfin, à l'échelle de 10 à 1000 ans — accessible principalement dans les sédiments déposés sur les côtes et par une analyse des récifs coralliens — on peut étudier la nature et la fréquence d'événements rares tels que les grandes inondations, les périodes de sécheresses régionales ou les éruptions volcaniques. C'est aussi l'échelle qui caractérise le mieux les principales interférences humaines dans l'environnement mondial.

Une méthodologie complète et bien établie permet aujourd'hui de recueillir des échantillons de sédiments et d'en analyser de nombreuses propriétés qui offrent un large éventail de renseignements paléocéanographiques indirects. Les techniques isotopiques, fondées sur des isotopes stables et radioactifs, se sont révélées extrêmement utiles à cet égard.

Le rapport oxygène 18/oxygène 16 des coquilles calcaires des protozoaires marins appelés foraminifères et présents dans les sédiments marins est fonc-

tion du rapport oxygène 18/oxygène 16 de l'eau de mer et de sa température. Ces deux facteurs agissent dans le même sens durant les fluctuations climatiques glaciaires/interglaciaires, intensifiant les variations isotopiques préservées dans le carbonate de calcium formé (voir graphiques). Alors que le rapport oxygène 18/oxygène 16 provenant des foraminifères benthiques permet principalement de mesurer les variations isotopiques de l'eau de mer découlant des modifications du volume mondial des glaces (croissance et recul des calottes glaciaires continentales), le rapport oxygène 16/oxygène 18 des variétés planctoniques de foraminifères vivant près de la surface des mers est surtout déterminé par les variations de la température à la surface des océans.

Les isotopes radioactifs présents dans le milieu marin offrent une occasion unique de dater les événements climatiques passés dont la mémoire est préservée dans les sédiments océaniques. Les méthodes les plus courantes sont celles basées sur le carbone radioactif, le déséquilibre des séries de l'uranium et la potassium-argon. L'introduction de la spectrométrie de masse par accélérateur et, plus récemment, de la spectrométrie de masse par thermo-ionisation appliquées à la datation du carbone actif et de l'uranium, respectivement, a permis d'établir une chronologie détaillée du dernier cycle climatique glaciaire/interglaciaire.

Orientations futures

Actuellement, la principale motivation de la recherche sur les changements mondiaux est l'inquiétude que suscitent auprès du public les modifications de l'environnement (en particulier le changement climatique) que risque de provoquer l'homme au cours du siècle prochain. Le réchauffement de la Planète résultant d'émissions excessives de gaz à effet de serre risque d'avoir des conséquences socio-économiques graves pour toute la population. On a de bonnes raisons de croire que l'évolution attendue du climat mondial ou régional se fera à un rythme relativement rapide, laissant peu de marge de manœuvre pour entreprendre des mesures correctives efficaces ou lancer les programmes d'adaptation nécessaires.

Il ne fait aucun doute que l'océan mondial est un élément clé de l'écosystème planétaire. Paradoxalement, c'est aussi jusqu'à présent celui que l'on connaît le moins bien. Un effort international intense est donc requis pour étudier les différents aspects de ce vaste système extrêmement complexe et son influence sur le climat. L'une des tâches les plus urgentes est de parvenir à une meilleure compréhension de l'absorption et du rejet de CO₂ par l'océan dans des conditions environnementales changeantes. Les techniques isotopiques fondées sur des isotopes tant stables que radioactifs ont un rôle important à jouer dans cette tâche ambitieuse.