

Un puits de carbone qui sature ?

Les océans nous rendent un service inestimable en absorbant la moitié du dioxyde de carbone (CO₂) libéré par la combustion des matières fossiles, ce qui atténue l'impact de ce gaz à effet de serre sur le climat. Un colloque réuni en mai¹⁶, à l'UNESCO, a toutefois conclu que nous pourrions bientôt payer cher la facture de ce service.

Lorsqu'en mai dernier, plus de 100 éminents spécialistes mondiaux du carbone océanique, appartenant aux divers domaines de la biologie et de la chimie marines, ont additionné les connaissances scientifiques les plus sérieuses dont ils disposent, les résultats se sont avérés alarmants. Ces travaux de recherche suggèrent que l'élévation du taux d'acidité de l'océan pourrait être très nocive pour les coraux et autres organismes fixant le calcium comme les crustacés et certaines espèces de phytoplancton. Cela perturberait les chaînes trophiques marines, au point peut-être d'entraîner l'effondrement des industries de la pêche et du tourisme dans de nombreuses régions du monde. Cela pourrait également modifier la capacité de l'océan à absorber le CO₂ des combustibles fossiles selon des modalités que l'on ne peut pas encore prévoir exactement.

Les participants ont donc décidé de fixer un ordre de priorité pour les recherches visant à élucider les conséquences éventuelles sur les écosystèmes marins d'une acidification de l'océan et à savoir si l'on pouvait sans danger envisager des stratégies de géo-ingénierie destinées à réduire l'impact du CO₂ sur le climat, en stockant son excédent dans les profondeurs de l'océan.

Comment fut établi le lien entre carbone et climat

Au milieu du 19^{ème} siècle, les cercles scientifiques se passionnèrent pour l'hypothèse nouvelle des ères glaciaires, selon laquelle, il y a des dizaines de milliers d'années, la majeure partie des continents de l'hémisphère nord avait été recouverte d'épaisses couches de glace. En cherchant à savoir comment le climat de la planète avait pu changer si radicalement, les scientifiques ont découvert que certains gaz de l'atmosphère terrestre piègent la chaleur du soleil. On a calculé que l'on pourrait reproduire les conditions qui prévalaient pendant les périodes glaciaires si l'on divisait par deux la teneur de l'atmosphère en CO₂. Mais quels processus naturels avaient bien pu provoquer des changements aussi

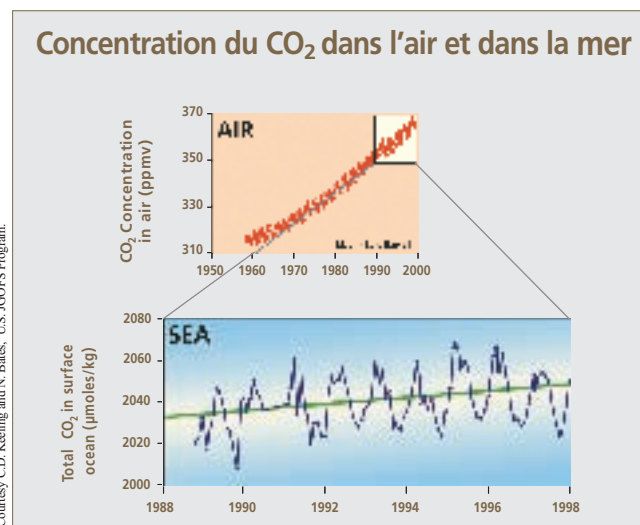
spectaculaires dans la teneur en CO₂ ? Cette question devait donner le coup d'envoi à des recherches parmi les plus stimulantes – et durables – en sciences de la terre, portant sur le cycle global du carbone.

Au début de la révolution industrielle, au milieu du 18^{ème} siècle, les activités humaines comme la combustion de matières fossiles ont commencé à ajouter du CO₂ dans l'atmosphère mais dans une faible mesure, eu égard à la grande quantité de CO₂ normalement présente dans l'atmosphère. On n'a donc pas pris au sérieux les premières inquiétudes sur cette accumulation à long terme car, en ce temps-là, la plupart des scientifiques croyaient que l'océan absorberait normalement 90% du CO₂ d'origine industrielle émis dans l'atmosphère.

Vers la fin des années 1950, les géochimistes Roger Revelle (fondateur de la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO, la COI) et Hans Suess ont tiré le signal d'alarme. D'après leurs calculs, l'absorption du CO₂ par l'océan était bien plus lente qu'on ne l'avait cru, les océans ne pouvant absorber que 50 % du CO₂ émis chaque année par la combustion des matières fossiles. Le reste, avertissaient-ils, allait s'accumuler dans l'atmosphère et accroître la capacité de celle-ci à piéger la chaleur, ce qui produirait un « effet de serre ». En 1958, Charles David Keeling commença à effectuer les premières mesures de grande précision du CO₂ atmosphérique à l'observatoire de Mauna Loa, à Hawaï (É.-U) ; il devait bientôt livrer au monde la preuve de l'augmentation régulière de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Vingt-cinq ans plus tard, commençaient à leur tour les mesures du CO₂ océanique à la Station de séries chronologiques de l'Atlantique, aux Bermudes, qui corroboraient la pénétration lente du CO₂ excédentaire sous la surface des océans.

L'énigme du puits de carbone manquant

Du CO₂ émis mondialement à partir des combustibles fossiles, seule une moitié s'est accumulée dans l'atmosphère. Les recherches sur ce qui est advenu de l'autre moitié ont



Augmentation de la concentration du CO₂ dans l'air et dans la mer. Pour ce qui est de la mer, chaque creux de la courbe s'explique par la variation saisonnière

16. L'océan dans un monde à forte concentration en CO₂. Colloque scientifique international co-parrainé par le Comité scientifique de la recherche océanique (SCOR) et la COI de l'UNESCO

inspiré des travaux échelonnés sur plusieurs dizaines d'années, quant à ce « puits de carbone manquant ». Les deux possibilités en étaient la biosphère terrestre (par le biais de la photosynthèse) et l'océan. L'océan, la plus grande réserve naturelle de carbone, entretient avec l'atmosphère une interaction dynamique sur plus de 70 % de la surface de la planète. Pour calculer la quantité de CO₂ absorbée par l'océan, il n'existe qu'une méthode : la mesurer directement à l'échelle mondiale. De 1990 à 1998, un programme plurinational intitulé Expérience sur la circulation océanique mondiale/Étude conjointe des flux océaniques mondiaux a capitalisé les données de près de 10 000 stations provenant de 95 expéditions distinctes menées dans tous les océans, et a dressé un premier relevé mondial de la répartition du carbone dans l'océan.

Les résultats de ce relevé viennent d'aider à percer le mystère du puits de carbone manquant : les données montrent que les océans ont absorbé environ 118 milliards de tonnes du CO₂ émis depuis 1800, soit environ 48 % de la totalité ; actuellement 20 à 25 millions de tonnes de CO₂ s'introduisent tous les jours dans les océans, d'après l'étude publiée dans le numéro de juillet de *Science*¹⁷. N'était le puits océanique, le CO₂ atmosphérique serait bien plus abondant et ses effets sur le climat bien plus marqués¹⁸. Mais les scientifiques sont dès lors confrontés à une nouvelle question : les océans vont-ils continuer à absorber près de la moitié du CO₂ émis dans l'atmosphère – même dans le cas d'un réchauffement du climat, qui modifierait les schémas de mélange des eaux océaniques ? Une deuxième étude mondiale et plusieurs programmes internationaux de recherche ont donc été lancés en 2003 pour tenter de répondre à ces questions.

Un océan acide ?

Une autre question, peut-être plus pressante, se pose : comment ces teneurs plus élevées de CO₂ océanique vont-elles affecter les écosystèmes marins ? On s'inquiète beaucoup, de nos jours, du coût écologique que pourrait comporter ce service fourni par les océans, à savoir, leur acidification.

En se dissolvant dans l'eau, le CO₂ réduit le pH de l'eau et la rend plus acide. Depuis le début de la révolution industrielle, le pH a baissé, au plan mondial, de 0,12 unités¹⁹ de pH. Si ce taux

n'est pas vraiment alarmant, la rapidité de son changement et sa tendance continue à la baisse sont inquiétants. À notre connaissance, les océans n'ont jamais subi une acidification aussi rapide. D'ici à la fin du siècle, si la concentration du CO₂ atmosphérique continue à croître de façon exponentielle, nous devons nous attendre à constater une multiplication par trois du pH et par 100 de sa vitesse d'augmentation par rapport aux périodes de transition entre les ères glaciaires et interglaciaires. Il est probable que la planète n'a pas connu de si grandes modifications du pH océanique depuis 21 millions d'années.

D'ici à la fin du siècle, nous pourrions constater une multiplication par trois du pH et par 100 de sa vitesse d'augmentation par rapport aux périodes de transition entre les ères glaciaires et interglaciaires

Menace sur les écosystèmes marins

Les coraux, le plancton calcifié, les moules, escargots, oursins et autres organismes marins utilisent le carbonate de calcium (CaCO₃) de l'eau de mer pour construire leurs coquilles ou leurs squelettes. Lorsque le pH diminue, par exemple quand l'eau est plus acide, les organismes ont plus de difficulté à sécréter du CaCO₃ pour élaborer la substance de leur squelette. C'est ce qui inquiète les océanographes : du fait que les océans n'ont jamais connu une acidification aussi rapide, on ne sait pas comment la chimie de l'océan va se comporter ou comment les écosystèmes vont s'adapter.

La pénétration du CO₂ dans l'océan s'effectue très lentement mais, en laboratoire ou dans les expériences de terrain, les scientifiques peuvent accélérer le processus afin d'étudier les effets que l'augmentation du CO₂ pourrait avoir sur les écosystèmes marins dans les décennies à venir. Ils peuvent, par exemple, installer des enclos flottants (mésocosmes) dans l'océan qui baignent des populations naturelles de phytoplancton, et faire varier la concentration du CO₂ dans l'air qui surplombe l'enclos, pour étudier les effets des divers taux de CO₂ sur l'écosystème. La durée de vie du phytoplancton étant de l'ordre d'une semaine, les scientifiques peuvent en peu de temps observer ces effets sur plusieurs générations.

Les expériences menées jusqu'ici en laboratoire et sur le mésocosme ont montré que presque tous les organismes qui fixent le calcium ont manifesté une baisse de la calcification dans des milieux acidifiés. Cela se vérifie aussi bien chez les minuscules organismes unicellulaires que chez les coraux constructeurs de récifs. Dans ces conditions, le phytoplancton calcifié, qui fait partie des premiers maillons de la chaîne alimentaire marine, édifiera des squelettes plus minces, ce qui mettra en péril leur croissance et leur reproduction, pourrait avoir de profondes incidences sur la chaîne alimentaire marine et enfin provoquer de brusques changements de

17. Sabine et Coll. (2004) *The Oceanic Sink for Anthropogenic CO₂*, *Science*, **305**, 367–371

18. On dépense actuellement 40 à 60 \$ E.U. pour éviter l'émission de chaque tonne de CO₂ (Programme de recherche et de développement sur les gaz à effet de serre de l'Agence internationale de l'énergie atomique). En absorbant 118 milliards de tonnes de combustibles fossiles depuis le début de l'ère industrielle, l'océan a rendu à l'écosystème naturel un service de l'ordre de 6 milliards de \$ E.U.

19. Plus le pH est bas, plus la solution est acide. L'eau de mer naturelle varie entre 7,7 et 8,2 unités de pH

Photo offerte par le Prof. Ulf Reichert, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften, IFM-GEOMAR



Dans ce fjord de Norvège, les expériences effectuées dans un enclos flottant (en mésocosme) montrent le comportement des écosystèmes marins dans un environnement devenu plus acide

l'importance numérique des populations ou de leur localisation géographique.

Les récifs coralliens sont doublement exposés aux dangers de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère. En premier lieu, celle-ci peut être due à un réchauffement de la planète, qui entraînera un réchauffement de l'eau. Les coraux sont très sensibles aux changements de température. Une élévation de 1 à 2°C de la température locale au-delà de leur maximum estival normal peut provoquer un phénomène dit de décoloration, car les coraux expulsent alors leurs algues symbiotiques (algues qui vivent en symbiose avec le corail et lui sont indispensables), en laissant translucides les tissus coralliens. En 1998, un seul épisode de décoloration a causé la perte de près de 20 % du corail vivant du monde. Le corail peut se rétablir après de tels épisodes, mais, lorsqu'ils se répètent, l'écosystème a tendance à s'affaiblir, à devenir plus sujet à la maladie, ce qui porte atteinte à la biodiversité. Le second danger qui guette les coraux, c'est l'augmentation de l'acidité de l'eau due à l'élévation de la concentration du CO₂. Le ralentissement de la calcification affecte la capacité du récif à développer son squelette carbonaté, ce qui ralentit la croissance du récif, fragilise son support structurel et l'expose davantage à l'érosion. On estime que vers le milieu de ce siècle le ralentissement de la calcification pourrait aboutir à nous faire perdre par érosion une superficie de récifs plus grande que celle qui pourra être reconstruite par la nouvelle calcification.

Parmi les espèces supérieures de la vie marine, certaines, comme les invertébrés et même certains poissons, peuvent être affectées par une baisse du pH dans leur environnement qui provoque une acidose (accroissement de l'acide carbonique dans les fluides corporels) entraînant une perte de résistance, une chute du métabolisme, une dépression du

comportement affectant l'activité physique et la reproduction et enfin l'asphyxie.

Si ces projections sur l'avenir de nos océans paraissent apocalyptiques, nous n'assisterons cependant pas à des changements aussi spectaculaires et rapides, mais plutôt à des modifications lentes et progressives des conditions d'équilibre dans la vie des écosystèmes marins, échelonnées sur plusieurs dizaines d'années. Les scientifiques ont fixé une série de priorités pour des recherches de caractère urgent. Ils vérifieront également si les changements prévisibles des écosystèmes se produisent effectivement.

Les invertébrés et même certains poissons peuvent être affectés par une baisse du pH dans leur environnement, ce qui provoque une perte de résistance, une chute du métabolisme, une dépression du comportement affectant l'activité physique et la reproduction, et enfin l'asphyxie.

Esquiver l'impact

De nombreux scientifiques estiment qu'en stabilisant la concentration atmosphérique aux alentours de 550 parties par million (ppm), on pourrait éviter ses effets les plus nuisibles sur le climat. Actuellement, sa concentration se situe à ~ 380 ppm, et, si aucun dispositif de prévention n'est adopté, elle devrait atteindre les 550 ppm vers le milieu du siècle. Stabiliser la concentration à 550 ppm constituera un défi mondial d'une dimension sans aucun équivalent. À en croire le

Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), qui fait autorité en matière d'évaluation scientifique, ce résultat ne pourrait sans doute pas être atteint par une simple réduction des émissions, mais plutôt par une savante combinaison de dispositions, au nombre desquelles figureraient des investissements dans la mise au point de sources d'énergie bon marché, peu ou pas du tout gourmandes en carbone, une meilleure exploitation de l'énergie et des possibilités nouvelles de gestion du carbone. Ces dernières comprennent le stockage du carbone dans la biosphère terrestre (plantation d'arbres, réduction du déboisement, par exemple), ou la captation du CO₂ émis par les installations industrielles pour le stocker dans des couches géologiques ou dans les profondeurs de l'océan. Le Giec s'efforce actuellement d'évaluer la faisabilité de ces options, leur efficacité et leur sécurité. Il invite à entreprendre de nouvelles recherches sur tous les points où les informations disponibles ne permettent pas encore de prendre des décisions politiques éclairées.

Les scientifiques participant au colloque de l'UNESCO étaient invités à se demander, au cas où on utiliserait l'océan pour y stocker volontairement du CO₂ atmosphérique, quelle serait l'efficacité de l'opération et quelles en seraient les incidences écologiques. Ces dix dernières années, beaucoup d'études ont été menées sur le sujet mais elles n'ont pas discuté ou évalué l'efficacité potentielle et les risques de la séquestration du carbone dans l'océan.

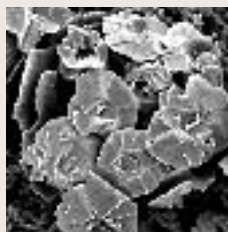
Comment le phytoplancton réagit-il à des niveaux élevés de CO₂ ?

Le monde d'aujourd'hui (pCO₂: 280-380 ppm)



Photos au microscope électronique à balayage de deux espèces de phytoplancton calcifié dans les conditions actuelles de pCO₂ (pCO₂ entre 280 et 380 ppm) et dans les conditions de pCO₂ élevé prévues pour la fin du siècle. Les résultats expérimentaux indiquent que l'augmentation du CO₂ provoque des malformations aux coquilles de carbonate de calcium.

Le monde avec CO₂ élevé (pCO₂: 580-720 ppm)



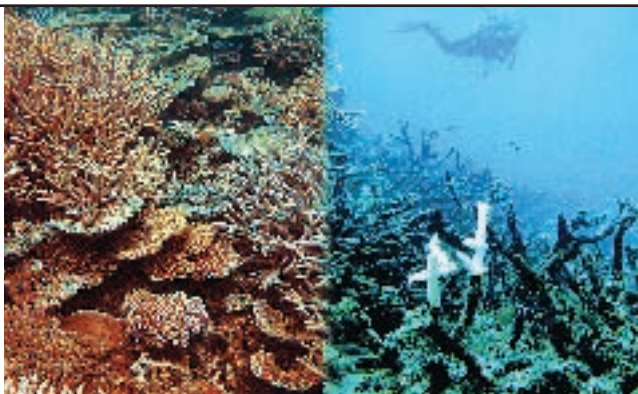
Calcidiscus leptoporus



Gephyrocapsa oceanica



Photos courtesy of Dr. Ove Hoegh-Guldberg, Centre for Marine Studies, University of Queensland, Australia



L'augmentation du CO₂ et l'élévation de la température peuvent faire rapidement passer les récifs coralliens de l'état d'écosystèmes sains à celui de quasi-cimetières de corail décoloré et pourrissant

Qui plus est, la science s'est trouvée elle-même prise au piège d'une lutte acharnée entre des associations d'écologistes et des entrepreneurs désireux d'obtenir des indemnités financières pour la séquestration de carbone dans l'océan. Les scientifiques exaspérés ont demandé à la COI de fournir un abri sécurisé qui permette de soustraire les discussions scientifiques à l'influence des intérêts extérieurs.

Stratégies de stockage et recherches à effectuer

Le débat porte sur deux méthodes d'utilisation de l'océan pour y stocker l'excédent de CO₂. L'une des stratégies consiste à organiser et à intensifier la croissance, à la surface de la mer, de plantes qui fixent le carbone. Lorsque ces organismes meurent, ils sombrent dans les profondeurs en entraînant le carbone avec eux. Dans de nombreuses régions de l'océan, ce qui limite la croissance du phytoplancton, c'est le manque d'un oligo-élément essentiel, le fer. Ces dix dernières années, huit expériences effectuées à petite échelle ont prouvé que l'introduction de fer dans des régions qui en manquent peut stimuler un développement du phytoplancton dépassant de 20 à 30 fois le rythme naturel.

Les participants au colloque estiment que les expériences d'enrichissement en fer ont été et continueront à être utiles pour l'étude des rapports existant entre les écosystèmes marins et le cycle global du carbone. Cependant, toutes les recherches effectuées concluent que l'enrichissement en fer serait une méthode très inefficace pour séquestrer le CO₂ atmosphérique, en raison, à la fois, de la faible quantité du carbone qui pourrait être piégé par cette méthode, et du fait que, à supposer que la carence en fer soit éliminée, il est probable que la carence en d'autres nutriments ou bien des facteurs environnementaux viendraient freiner la croissance.

L'autre méthode pour séquestrer le CO₂ produit par les installations industrielles consiste à le liquéfier par compression et à le stocker dans des cavités naturelles isolées de l'atmosphère, telles que des couches géologiques profondes ou le fond de l'océan. De nombreuses questions restent posées quant à l'efficacité et les conséquences de l'injection de CO₂ liquéfié dans les profondeurs océaniques, car les données expérimentales sont extrêmement réduites. L'efficacité de la méthode dépendrait de la localisation et de la profondeur de l'injection, puisque l'on veut maintenir aussi longtemps que possible le CO₂ injecté hors de contact avec l'atmosphère, tout en limitant, dans la mesure du possible, les dégâts éventuels pour l'environnement autour du point d'injection.

Reproduire en laboratoire la température, la pression et les communautés biologiques des profondeurs océaniques est extrêmement difficile. Y effectuer des expériences à petite échelle *in situ* n'est pas simple non plus, car cela exige des véhicules sous-marins téléguidés ou des instruments spéciaux qui doivent être descendus à de grandes profondeurs à partir de navires de recherche.

Il faut signaler que plusieurs tentatives d'expériences *in situ* ont été contrecarrées par des associations d'écologistes craignant qu'elles n'ouvrent la voie à des décharges de dimensions industrielles. La question a suscité de vives discussions à l'intérieur même de la communauté scientifique, dont une bonne partie s'oppose fermement à la séquestration du carbone dans l'océan et va jusqu'à suggérer que la communauté abandonne les recherches sur le sujet.

Malheureusement, l'immense capacité naturelle de l'océan à stocker le CO₂ continuera à intéresser les milieux d'affaires, et certaines entreprises seraient tentées de promouvoir cette technique sans se soucier des incidences possibles sur l'environnement. Les participants au colloque estiment qu'en dépit de la vive opposition d'inspiration éthique, les recherches sur la faisabilité technique et économique de la mise en œuvre de cette stratégie palliative ne sont pas prêts de s'arrêter. La communauté scientifique internationale doit se tenir prête à répondre avec précision et sans *a priori* aux questions portant sur les incidences éventuelles pour l'environnement et sur l'efficacité à long terme ou les avantages de cette technique, compte tenu des autres solutions et de la nécessité vitale de stabiliser le CO₂ atmosphérique à un niveau de concentration mettant la vie humaine et son bien-être à l'abri des plus importants de ses effets nocifs.

Rester vigilant

La Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques a pour objectif ultime « de stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ». Si l'on a abondamment discuté des termes « perturbation anthropique dangereuse du climat », on ne l'a pas fait pour les taux acceptables de CO₂ océanique, si bien qu'il n'existe pas de normes pour juger quels taux de CO₂ devraient être considérés comme tolérables pour la vie marine ou encore comment les stratégies proposées pour la gestion du carbone pourraient, soit réduire, soit exacerber les effets nocifs sur la chimie et la biologie océaniques.

La COI continuera à tenir à jour son Dossier de surveillance sur la science de la séquestration du carbone océanique et à réunir la communauté scientifique intergouvernementale afin qu'elle élabore une base d'information scientifique objective orientée vers la prise de positions politiques à l'intention des scientifiques, des décideurs et du grand public.

Maria Hood²⁰

Rapport du symposium et Dossier de surveillance de la COI à lire sur <http://ioc.unesco.org/iocweb/co2panel/>

20. UNESCO Programme Specialist in marine sciences