

FAQ sur l'acidification des océans



CONTENU :

Le terme «acidification des océans»	1-2
Chimie du carbone et du pH océanique	2-3
Mesures et observations	4
Effet tampon géologique	5
Acidification des océans et calcification	5-6
Acidification des océans et photosynthèse	7
Individus et écosystèmes	7-9
L'acidification des océans dans l'histoire géologique	10
Méthodes Scientifiques	11
Géo-ingénierie et atténuation	12
Développement de la réglementation et prise de décisions	13-14
Contributeurs	14

Introduction

L'acidification des océans est un nouveau domaine de recherche dans lequel la plupart des études ont été publiées au cours des 10 dernières années. Par conséquent, il y a quelques certitudes, mais de nombreuses questions demeurent. L'acidification des océans est aussi un domaine de recherche multidisciplinaire qui comprend des sciences telles que la chimie, la paléontologie, la biologie, l'écologie, la biogéochimie, la modélisation et les sciences sociales. En outre, certains aspects de la recherche sur l'acidification des océans, comme la chimie des carbonates par exemple, sont complexes et peu intuitives. Pour ces raisons, les médias et le grand public trouvent certaines questions scientifiques ou résultats confus.

Le programme américain Ocean Carbon and Biogeochemistry (OCB; www.us-ocb.org), soutenu par le projet européen sur l'acidification des océans (EPOCA; <http://www.epoca-project.eu/>) et le programme anglais de recherche sur l'acidification des océans (<http://www.oceanacidification.org.uk>), a dressé une liste des questions les plus fréquemment posées (Foire Aux Questions, FAQ). Ces questions ont été largement diffusées à la communauté scientifique afin d'apporter des réponses concises résumant les connaissances actuelles, tout en évitant le jargon scientifique. Les réponses ont ensuite été soumises à une procédure d'examen publique et à une révision par des pairs afin d'assurer une bonne lisibilité et limiter les pertes au niveau de la précision scientifique. La réponse de la communauté a été enthousiaste. Au total, 27 scientifiques de 19 institutions et 5 pays ont contribué à l'ensemble du processus.

Nous espérons que cette FAQ sera utile et nous voudrions faire remarquer qu'il s'agit d'un processus continu. Chacun est invité à demander des précisions ou à faire parvenir ses commentaires à Sarah Cooley (scooley@whoi.edu). La liste sera révisée périodiquement en utilisant ces contributions. Elle est disponible en ligne sur les sites d'OCB (www.whoi.edu/OCB-OA/FAQs), UK Ocean Acidification Research Programme (www.oceanacidification.org.uk), et EPOCA (www.epoca-project.eu/index.php/FAQ.html).

Joan Kleypas et Richard Feely (OCB), Jean-Pierre Gattuso (EPOCA), et Carol Turley (UK Ocean Acidification Research Programme)

Le terme «acidification des océans»

L'océan n'est pas acide, et les modèles prédictifs montrent que les océans ne deviendront jamais acides. Alors pourquoi parle-t-on d'acidification des océans ?

L'acidification des océans se réfère au processus de diminution du pH des océans (correspondant à une augmentation de la concentration en ions hydrogène) par la dissolution du dioxyde de carbone apporté dans l'eau de mer depuis l'atmosphère. Le mot «acidification» fait référence à l'abaissement du pH à partir de n'importe quel point de départ vers tout point final sur l'échelle de pH. Ce terme est utilisé dans de nombreux autres domaines scientifiques (dont la médecine et la science des aliments) pour se référer à l'ajout d'un acide dans une solution, indépendamment de la valeur du pH de la solution. Par exemple, même si le pH de l'eau de mer est supérieure à 7,0 (et donc considéré comme «basique» en terme d'échelle de pH), l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère entraîne une augmentation de l'acidité de l'océan et par conséquent un abaissement de son pH. Cette terminologie est comparable à celle que nous utilisons quand nous parlons de la température. Si la température de l'air passe de -40°C à -29°C (-40°F à -20°F), il fait toujours froid, mais nous parlons de «réchauffement».—
J. Orr, C.L. Sabine, R. Key

« Le terme acidification des océans n'est-il pas juste un autre nom pour le changement climatique ? »

Le terme «acidification des océans» (suite)

Est-ce que la dissolution de tout le CO₂ produit en brûlant la totalité des réserves mondiales de combustibles fossiles, peut rendre les océans acides ?

Non. La chimie fondamentale du système des carbonates océanique, incluant les minéraux de carbonate de calcium présents sur le plancher océanique qui peuvent se dissoudre lentement et aider à neutraliser une partie du CO₂, empêche les océans de devenir acides à l'échelle globale. — C.L. Sabine

Le terme acidification des océans n'est-il pas juste un autre nom pour le changement climatique ?

Non. Bien que l'acidification des océans et le changement climatique partagent une origine commune (l'augmentation du CO₂ atmosphérique), le changement climatique regroupe les effets associés aux changements de budget de chaleur de la Terre (en raison de l'effet de serre lié au CO₂ et dans une moindre mesure à d'autres gaz réactifs) qui provoquent le réchauffement planétaire et les changements de conditions météorologiques. L'acidification des océans se réfère expressément à l'abaissement du pH des océans résultant de l'absorption du CO₂ relâché par l'homme dans l'atmosphère. L'acidification des océans n'inclut pas le réchauffement des océans. — C.L. Sabine

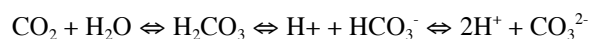
Chimie du carbone et du pH océanique

Est-ce que le CO₂ va vraiment faire diminuer le pH des océans tant que cela ?

Les scientifiques estiment que le pH de la surface des océans a baissé d'environ 0,1 unité pH entre l'époque préindustrielle et aujourd'hui. Le pH étant une mesure de la concentration en ions hydrogène et que l'échelle de pH est logarithmique (pour chaque baisse d'1 unité pH, les concentrations en ions hydrogène augmentent d'un facteur 10), une diminution de 0,1 unité pH correspond à une augmentation d'environ 26% de la concentration des ions hydrogène dans l'océan. Si nous continuons selon les scénarios envisagés pour l'utilisation des combustibles fossiles et l'augmentation du CO₂ atmosphérique, le pH sera susceptible de diminuer de 0,3 à 0,4 unités d'ici la fin du 21^{ème} siècle et la concentration en ions hydrogène (ou l'acidité) d'augmenter de 100 à 150% par rapport à sa valeur à l'époque préindustrielle. — S. Doney

Les équations montrant le CO₂ réagissant avec l'eau semblent générer plus et non pas moins de carbonates. Comment l'acidification des océans diminue la quantité d'ions carbonates dans l'eau de mer ?

Ce point est souvent mal compris, car les équations d'équilibres décrivant étape par étape le système des carbonates dans l'eau de mer ne permettent pas de représenter la dynamique de la chimie de l'eau de mer. Plusieurs réactions qui peuvent se produire entre le dioxyde de carbone (CO₂), l'eau (H₂O), l'acide carbonique (H₂CO₃), l'ion bicarbonate (HCO₃⁻) et l'ion carbonate (CO₃²⁻). L'une des réactions possibles crée des ions carbonate et diminue le pH:



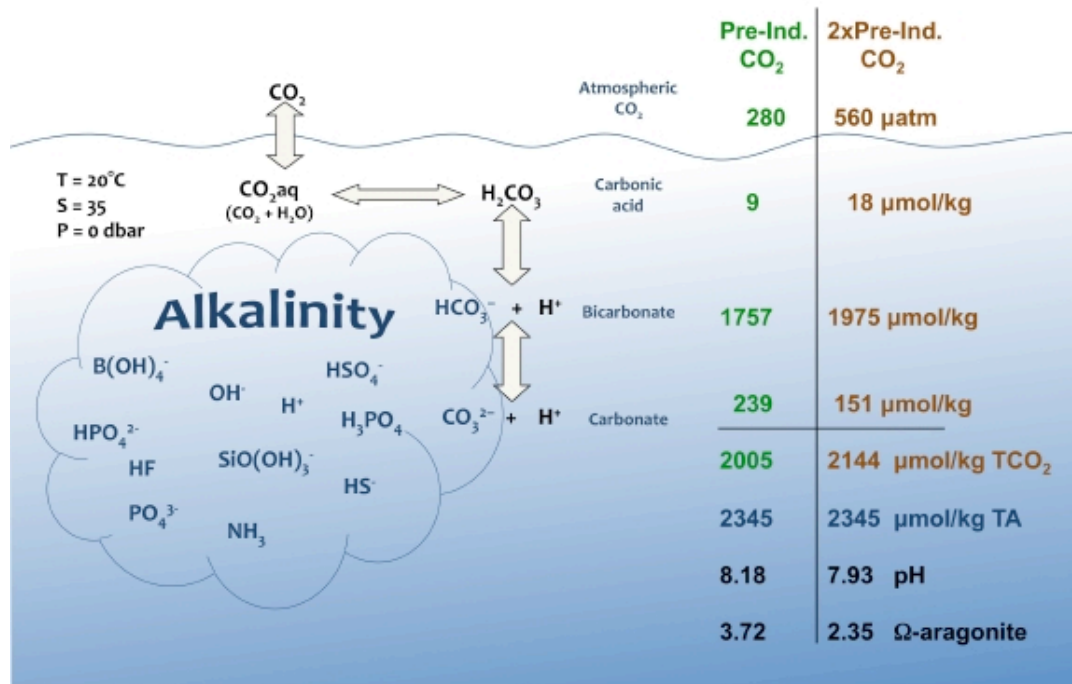
Toutefois, au pH actuel des océans, il se produit également une autre réaction qui consomme des ions carbonates et ne modifie pas le pH:



La deuxième équation décrit la réaction qui se produit le plus souvent dans les océans, mais la première réaction se produit également, de sorte que le changement global qui en résulte est une diminution des carbonates et une diminution du pH. — C.L. Sabine

Il semble impossible d'acidifier les océans, étant donné leur salinité. Comment le CO₂ pourrait-il surmonter tout ce sel ?

Lorsque des acides et des bases se neutralisent mutuellement au cours d'expériences en laboratoire, il y a formation de sel et d'eau. Mais dans l'océan, les principaux ions qui font que l'eau de mer est « salée » (comme le sodium, le chlore et le magnésium) proviennent de l'altération des roches, qui fournit à la mer une quantité équilibrée d'ions positifs et négatifs depuis plusieurs millénaires. Les variations de pH des océans sur des échelles de temps plus courtes allant de la décennie au siècle sont contrôlées par des acides et des bases faibles, comme le bicarbonate ou le borate. De ces acides et bases faibles, les formes dissoutes du CO₂, l'acide carbonique, le bicarbonate et le carbonate, ont le plus grand impact sur les variations du pH de l'océan global, car leurs concentrations évoluent rapidement par rapport à celles des autres ions. — C.L. Sabine



Légende de la figure: (gauche) Schéma des différentes espèces du système des carbonates dans l'eau de mer et quelques réactions d'équilibre qui les relient. L'alcalinité totale de l'eau de mer (TA) est communément définie comme « l'excès de base », ou la somme des accepteurs de protons en excès, et ses composantes ioniques sont illustrées en bleu clair. (droite) Concentration des espèces du système des carbonates dans l'eau de mer pour une concentration de CO₂ atmosphérique préindustrielle de 280 ppm (vert) et de deux fois cette valeur (marron). La somme des concentrations de l'acide carbonique, du bicarbonate et du carbonate donne la concentration totale de CO₂ (TCO₂). Les valeurs de pH et du taux de saturation de l'aragonite (Ω-aragonite) sont également indiquées. Ces valeurs ont été calculées en utilisant les constantes du système des carbonates "Mehrbach refit" (Dickson et Millero, 1987, Deep-Sea Research), la constante de dissociation du KSO₄ donnée par Dickson (1990, Journal of Chemical Thermodynamics), et l'échelle totale de pH.

Si les calottes glaciaires fondent et que de l'eau douce est ajoutée à l'océan, cela ne diluera-t-il pas simplement l'acidité ?

L'eau douce provenant de la fonte des calottes glaciaires dilue les concentrations des différents composants du système des carbonates dans l'eau de mer (comme décrit ci-dessus), ainsi que l'alcalinité totale et la salinité (affectant toutes deux le pH). Par exemple, un litre d'eau de mer Arctique "typique" (température, 5°C ; salinité, 35; alcalinité totale, 2244 micromoles/kg) qui est exposée à un niveau de CO₂ atmosphérique actuel de 390 ppm, a une teneur en carbone total de 2100 micromoles/kg et un pH de 8,04 (échelle totale). L'ajout d'un kilogramme d'eau douce au kilogramme d'eau de mer entraînerait une dilution de la salinité, de l'alcalinité et de la teneur en carbone de la moitié de ce qu'ils étaient, et le pH initial augmenterait à 8,21. Toutefois, cette eau de mer n'est pas en équilibre avec l'atmosphère (elle a maintenant une pCO₂ de 151 ppm, tandis que le niveau de la pCO₂ de l'atmosphère est de 390 ppm), et par conséquent elle absorbera du CO₂ jusqu'à ce que la pCO₂ de l'eau de mer soit aussi égale à 390 ppm, ce qui a pour conséquence de diminuer le pH qui est alors de 7,83. — R. A. Feely, J. Kleypas

Est-ce que le dégazage en CO₂ des océans, du fait de leur réchauffement, ne supprimera-t-il pas le problème ?

La teneur en CO₂ des eaux de surface des océans répond à la fois aux variations de la teneur en CO₂ atmosphérique et aux changements de température. Par exemple, si la température des océans ne variait pas, un doublement du niveau préindustriel de CO₂ (de 280 à 560 ppm) entraînerait une augmentation de la quantité totale de carbone dissous dans l'océan de surface d'environ 2002 à 2131 micromoles/kg (en supposant que la salinité est de 35, la température de 15°C, et l'alcalinité de 2300 micromoles/kg). En revanche, si la température des océans augmente de 2°C sur cette même période, alors moins de carbone est absorbé (l'augmentation de 2002 à 2117 micromoles / kg). Ainsi, une hausse de 2°C des températures entraînera une baisse d'environ 10% de l'absorption du carbone par les eaux de surface. Le réchauffement des océans envisagé devrait également modifier la circulation océanique, réduisant encore davantage leur capacité à absorber le CO₂ atmosphérique, mais l'excès de CO₂ restera dans l'atmosphère et continuera d'acidifier les océans. Pour le pH, les effets nets du réchauffement climatique sur le CO₂ atmosphérique, la solubilité du CO₂ et la spéciation chimique s'annuleront pratiquement. — S. Doney, J. Kleypas

Mesures et observations

Comment pouvons-nous connaître le pH des océans dans le passé, alors que l'échelle de pH n'a été introduite qu'en 1909 ?

Lorsque les calottes glaciaires se forment, des bulles d'air sont emprisonnées dans la glace. Les scientifiques ont analysé la concentration de CO₂ de l'air dans ces bulles et ont développé un enregistrement de la concentration du CO₂ atmosphérique pour le passé récent. Parce qu'une grande partie de la concentration du CO₂ à la surface des océans reste à peu près en équilibre avec la concentration du CO₂ atmosphérique, la teneur en CO₂ de l'océan peut être calculée à partir de ces bulles d'air, et on peut ainsi déterminer le pH des océans. En fait, l'enregistrement des carottes de glace indique que la concentration du CO₂ dans l'atmosphère n'a jamais été supérieure à environ 280 ppm pendant les 800000 dernières années, créant des conditions conduisant à un pH préindustriel moyen des eaux de surface des océans d'environ 8,2. — J. Bijma

Comment savons-nous ce qu'était le pH des océans il y a plusieurs dizaines de millions d'années ?

Pour estimer les paramètres physiques ou chimiques tels que la température ou le pH pour les périodes où les instruments de mesures n'étaient pas disponibles, les scientifiques utilisent des paramètres dits proxy ou « proxies », qui sont des paramètres que l'on peut mesurer et qui sont liés au paramètre recherché mais qui ne peut pas être mesuré. Par exemple, les organismes marins qui calcifient incorporent, en plus du calcium, du carbone et de l'oxygène du carbonate de calcium, un grand nombre d'éléments dans leur coquille ou leur squelette. Lorsque les parties dures de ces organismes, qui sont conservées dans les sédiments, sont analysées, ces éléments supplémentaires peuvent fournir des informations sur les conditions environnementales pendant la durée de vie de l'animal. L'historique des valeurs du pH océanique et leurs variations peuvent être étudiés en utilisant la concentration du bore et le rapport de ses isotopes stables ($\delta^{10}\text{B}$ et $\delta^{11}\text{B}$) dans les carbonates marins. La modélisation ainsi que des observations géochimiques supplémentaires fournissent des preuves solides sur le pH moyen de l'océan de surface qui n'a pas été inférieur à environ 8,2 sur plusieurs millions d'années. — J. Bijma

Comment les effets de l'acidification des océans sont-ils reliés à ceux des autres activités humaines ?

De nombreuses activités humaines affectent la chimie de l'eau de mer et la balance acide-base de l'océan, mais pas autant que l'acidification liée au CO₂ atmosphérique. Les pluies acides, qui contiennent de l'acide sulfurique et nitrique dérivés de l'utilisation de combustibles fossiles, tombent sur les océans côtiers. L'impact de ces pluies acides sur la chimie des eaux de surfaces océaniques peut être important à un niveau local et régional, mais il reste faible au niveau mondial et l'ensemble de ses effets n'équivaut qu'à quelques pour cent des changements liés à l'augmentation du CO₂ atmosphérique. Les eaux côtières sont également influencées par un excès d'apports de nutriments, principalement l'azote provenant de l'agriculture, des engrais et des eaux usées. Les changements chimiques qui en résultent conduisent à des efflorescences massives de plancton. Lorsque ces efflorescences s'interrompent, la matière organique se dépose sous la couche de surface. Cela stimule la respiration bactérienne qui conduit à une diminution de l'oxygène et une augmentation du CO₂, qui à son tour va faire diminuer le pH, et ce d'autant plus dans les eaux côtières de subsurface.

L'une des différences majeures entre l'acidification des océans et ces types d'effets humains est que l'influence de l'acidification des océans se produit à l'échelle globale, affectant les organismes qui calcifient et sont sensibles au pH dans tout les bassins océaniques de l'équateur jusqu'aux pôles. À l'heure actuelle, les effets sont limités essentiellement aux 200-500 premiers mètres de l'océan, mais chaque année ils se font ressentir un peu plus profondément. Un grand nombre des autres effets des activités humaines sont de nature plus locale. — S. Doney, C. Langdon

A-t-on la preuve que l'acidification des océans se produit et qu'elle découle de l'activité humaine ?

Les scientifiques ont collecté des enregistrements semi-continus de la pCO₂ de l'eau de mer et du pH au cours des 20-30 dernières années dans les océans Pacifique et Atlantique. Ces séries chronologiques issues d'Hawaï, des Bermudes et des îles Canaries montrent que la pCO₂ de l'eau de mer reflète l'augmentation du CO₂ atmosphérique et que le pH des océans diminue. D'autres mesures de la teneur en CO₂ dans l'océan Pacifique Nord, réalisées en 1991 puis ensuite en 2006, montrent que la teneur en CO₂ dans cette région a augmenté en accord avec la hausse des concentrations de CO₂ atmosphérique. — C. Turley, J. Kleypas

« Comment savons-nous ce qu'était le pH des océans il y a plusieurs dizaines de millions d'années ? »

Effet tampon géologique

Si la fonte des glaces et les apports détritiques aux océans augmentent, cela peut-il leur apporter de l'alcalinité et ainsi compenser l'acidification ?

L'altération des roches continentales augmente l'alcalinité de l'eau de mer ainsi que sa capacité à compenser la baisse du pH. La neutralisation de tout le CO₂ lié à l'activité humaine qui pénètre dans les océans par ce mécanisme nécessiterait plusieurs centaines de milliers d'années. Par conséquent, à l'échelle de temps intéressant l'humanité (de la décennie à quelques siècles), ce processus n'est pas assez rapide pour atténuer de manière significative l'acidification des océans.

— R.A. Feely, J. Bijma

Comme les océans deviennent plus acides, plus de carbonate de calcium va se dissoudre. Cela peut-il compenser l'acidification des océans ?

La dissolution des minéraux en carbonate de calcium dans la colonne d'eau et dans les sédiments augmente l'alcalinité de l'eau de mer, ce qui compense la diminution du pH et de la concentration d'ion carbonate engendrés par l'acidification des océans. Cependant, comme pour l'altération des roches, ce processus est lent et nécessiterait des milliers à des dizaines de milliers d'années pour neutraliser tout le CO₂ résultant des activités humaines qui pénètre dans les océans. La société étant affectée pour les décennies et siècles à venir, ce processus n'est pas assez rapide pour compenser l'invasion de CO₂ dans l'océan. Les modifications chimiques provoquées par l'acidification des océans vont donc perdurer pendant encore plusieurs siècles.

— R.A. Feely

Acidification des océans et calcification

Pourquoi l'ajout de CO₂ dans les aquariums domestiques est bénéfique pour les animaux, alors que dans l'océan, l'ajout de CO₂ entraîne une acidification nocive ?

Les poissons et plantes d'eau douce ont tendance à être plus tolérants aux faibles et fortes variations de pH en général car l'eau douce possède une faible alcalinité, ce qui signifie que la chimie de ces eaux ne tamponne pas les changements de pH (c'est à dire qu'elle n'a pas d'effet tampon) comme c'est le cas dans l'eau de mer. La variabilité naturelle du pH des lacs et des rivières est également plus élevée que dans l'océan. Les organismes d'eau douce ont développé des mécanismes spéciaux qui leur permettent de vivre dans ces conditions plus acides et variables ; par exemple, les plantes d'eau douce peuvent bénéficier d'une hausse du CO₂.

Dans les aquariums d'eau de mer, les poissons et coraux ont besoin d'un pH plus équilibré et les propriétaires ajoutent souvent du carbonate "durcisseur" pour augmenter l'alcalinité de l'eau et maintenir le pH entre 8,0 et 8,4. Des dispositifs appelés «réacteurs de calcium» permettent d'injecter du gaz carbonique par le biais de carbonate de calcium broyé (le plus souvent du corail broyé), qui libère des ions carbonates et calcium dans l'eau de mer, fournissant des eaux riches en calcium et d'une

forte alcalinité dont les coraux d'aquarium et les autres organismes calcifiants ont besoin pour continuer à se développer sagement.

Malheureusement, ces types d'appareils ne peuvent être utilisés pour résoudre l'acidification des océans sur une échelle globale, en raison de l'énorme quantité de carbonate de calcium broyé qui serait nécessaire à l'échelle de l'océan mondial. — H. Findlay, J. Kleypas, M. Holcomb

Les coquillages peuvent survivre en eau douce lorsque le pH descend jusqu'à 5, alors quel est le problème ?

Les organismes qui vivent en eau douce ou en eau salée avec un pH plus bas ont développé des mécanismes d'adaptation qui leur permettent de survivre dans ces conditions. En revanche, les coquillages marins, qui ont évolué dans de l'eau de mer avec un pH plus élevé et moins variable, sont plus sensibles aux variations de pH. Un bon exemple est le remplacement naturel d'organismes marins par des organismes d'eau douce au sein des estuaires. Le coquillage marin, *Thais gradata*, trouvée dans les estuaires, a tendance à avoir un taux de dissolution plus élevé vers l'amont où l'eau est plus douce, le pH plus faible et plus variable, qu'à l'embouchure (eau de mer) où le pH est plus élevé et varie moins. — H. Findlay

« Les coquillages peuvent survivre en eau douce ... alors quel est le problème ? »

Acidification des océans et calcification (suite)

Pourquoi l'augmentation de la concentration de CO₂ dissous dans l'eau de mer affecte la formation des coquilles des organismes marins ?

La dissolution du CO₂ dans l'eau de mer provoque une série de changements dans le système des carbonates de l'eau de mer : les concentrations en CO₂ dissous, en carbone inorganique total dissous et en ion bicarbonate augmentent, tandis que le pH, la concentration en ion carbonate et le degré de saturation du carbonate de calcium diminuent. Un ou plusieurs de ces changements peuvent affecter la formation des coquilles des organismes marins. La formation de squelettes ou de coquilles chez la plupart des organismes marins est un processus interne, où le bicarbonate est transformé en carbonate pour former du carbonate de calcium. Mais comme cette conversion crée des protons (des ions hydrogène), les organismes doivent générer de l'énergie pour expulser ces ions hydrogène vers l'environnement extérieur (eau de mer). Une des hypothèses expliquant pourquoi l'acidification des océans peut ralentir le taux de calcification (et il y en a plusieurs) est que lorsque le pH de l'eau de mer diminue, les organismes doivent produire plus d'énergie pour se débarrasser des protons produits par la calcification -ils doivent alors agir contre un gradient plus important. Ceci explique pourquoi de nombreux organismes calcifiants ont des taux de calcification plus faibles lorsqu'ils doivent faire face à d'autres stress physiologiques (par exemple le manque de nourriture) qui laissent les organismes avec moins d'énergie disponible pour la calcification. L'acidification des océans peut aussi affecter indirectement la formation des coquilles en raison des répercussions physiologiques, comme des changements dans le taux de respiration qui peut influencer les bilans énergétiques et ainsi modifier la capacité de l'animal à produire sa coquille. Alors que certains organismes ont un taux de croissance de leur coquille normal malgré l'acidification des océans, les parties exposées de la coquille peuvent se dissoudre plus rapidement, de sorte que l'organisme aura besoin de dépenser plus d'énergie pour entretenir sa coquille, et pourra investir moins d'énergie dans la reproduction ou dans d'autres fonctions vitales. — *H. Findlay, A. Cohen, J. Kleypas*

Les scientifiques ont montré que les carapaces de homard (et les coquilles d'autres animaux comestibles) s'épaississent quand ils vivent dans des eaux à forte concentration en CO₂, alors pourquoi devrions-nous être préoccupés par l'acidification des océans ?

Au moins une étude expérimentale a montré que la masse de la carapace de plusieurs crustacés, incluant les homards, élevés en culture pendant 60 jours, augmente avec l'augmentation du CO₂. La formation de la carapace nécessite de l'énergie, par conséquent l'augmentation de la masse de la carapace se produit presque certainement conjointement à une réduction de l'énergie allouée à d'autres fonctions comme la croissance et la reproduction. En outre, les homards et autres crustacés, utilisent pour fabriquer leur carapace à la fois du carbonate de calcium et de la chitine dans un mécanisme différent de celui des autres organismes marins. Ils muent périodiquement au lieu d'avoir une croissance constante de leur carapace tout au long de leur vie, et l'on pense qu'ils conservent la plupart des minéraux de leur ancienne carapace pour les utiliser dans leur nouvelle carapace. Les budgets énergétiques et minéraux n'ont pas été contrôlés dans cette étude, ainsi la manière dont les effets de l'acidification des océans affecte la santé et la longévité de ces organismes est encore méconnue. — *A. Cohen, H. Findlay*

Acidification des océans et photosynthèse

La photosynthèse est supposée augmenter avec l'augmentation du CO₂ océanique, comme les coraux contiennent des algues photosynthétiques, ne vont-ils pas bénéficier de cette hausse du CO₂?

La photosynthèse de certaines algues, mais pas de toutes les algues, va s'accroître si le taux de CO₂ atteint niveaux prédits pour la fin de ce siècle (700 à 800 ppm). Les algues unicellulaires appelées zooxanthelles qui vivent dans les cellules animales du corail font parties des algues dont la photosynthèse n'augmentera pas de manière significative avec l'augmentation du CO₂. Les zooxanthelles et les coraux maintiennent une symbiose délicatement équilibrée, dans laquelle les zooxanthelles transfèrent à leur hôte corallien des composés carbonés formés par la photosynthèse, fournissant ainsi une source importante de carbone pour le corail et pour la calcification de ce dernier (formation du squelette). Si les algues présentent dans les cellules du corail se développent trop bien et que leur nombre augmente fortement, le transfert de substances nutritives à l'hôte corallien peut être perturbé. Donc, même si la photosynthèse des zooxanthelles venait à augmenter sous une élévation du CO₂, cela ne profiterait pas nécessairement aux coraux. Dans la grande majorité des expériences, le taux de calcification des coraux diminue lorsque le niveau de CO₂ augmente, il est donc clair que l'augmentation des émissions de CO₂ diminue la capacité des coraux à construire leur squelette plutôt que de les protéger, en altérant la photosynthèse des zooxanthelles. — *C. Langdon, A. Cohen*

Si la photosynthèse augmente avec l'augmentation du CO₂ océanique, est-ce que le phytoplancton et les herbiers ne se développeront-ils pas mieux ?

Des communautés d'organismes trouvées près de sources volcaniques côtières naturelles de CO₂ démontrent que certaines micro-algues, algues et herbiers marins poussent très bien dans ces zones soumises à un taux élevé de CO₂ pendant de longues périodes. Toutefois, ce travail montre également que les écosystèmes côtiers sont dégradés en raison des effets à long terme de l'acidification des océans. La biodiversité diminue: des groupes d'organismes tels que les algues calcaires disparaissent progressivement lorsque le pH chute et ils sont remplacés par des algues envahissantes. Ceci laisse craindre que l'acidification des océans permette la prolifération d'algues envahissantes et perturbe les habitats côtiers. — *J. Hall-Spencer*

Une augmentation du CO₂ dans l'eau de mer augmente la croissance des algues photosynthétiques - n'est-ce pas une bonne chose?

La croissance et la photosynthèse de certaines espèces de plantes et de phytoplanctons marins peuvent augmenter avec des niveaux de CO₂ élevés, mais ce n'est en aucun cas une règle générale. Pour d'autres espèces, l'augmentation du CO₂ et de l'acidité auront des effets négatifs ou neutres sur leur physiologie. Par conséquent, certaines plantes et algues seront des «gagnants», tandis que d'autres seront des «perdants». Cela signifie qu'au lieu de bénéficier à tous de manière impartiale, l'acidification future provoquera probablement des changements majeurs dans la composition spécifique des communautés de phytoplancton. Certaines des expériences qui ont été faites jusqu'à présent indiquent que les nouvelles espèces dominantes du phytoplancton, dans un océan futur acidifié, seront moins à même de supporter une chaîne alimentaire productive sur laquelle nous comptons actuellement pour maintenir un écosystème océanique sain et de bonnes ressources halieutiques. — *D. Hutchins*

Individus et écosystèmes

Le CO₂ est un produit normal de la respiration. Les animaux inspirent et expirent tout le temps. Comment peut-il être toxique ?

Tout comme dans l'eau de mer, le CO₂ respiratoire réduit le pH dans les cellules. Les organismes ont développé des mécanismes pour atténuer, transporter et rejeter le CO₂ de leurs cellules à la vitesse à laquelle il est produit. L'acidification des océans réduit la différence de CO₂ entre l'intérieur et l'extérieur du corps de l'animal, ce qui freine le rejet du CO₂ et provoque "une acidose respiratoire". (Ce terme est analogue à «l'acidification des océans" car les fluides corporels sont en général légèrement basiques). L'acidose respiratoire peut conduire, entre autres, à un métabolisme et à une activité réduits. De plus, de nombreuses fonctions cellulaires sont sensibles au pH et peuvent répondre négativement à une acidose respiratoire. Par exemple, les protéines respiratoires (par exemple l'hémoglobine) dans le sang se combinent à l'oxygène à un pH élevé et le libèrent à un pH faible, ce qui permet l'absorption de l'oxygène au niveau des branchies et son élimination au niveau des cellules, où le CO₂ métabolique diminue le pH localement. Beaucoup d'organismes peuvent compenser l'acidose respiratoire en modifiant l'équilibre des ions dans le corps. Toutefois, on ignore s'ils peuvent maintenir un tel déséquilibre ionique sur le long terme. — *B. Seibel*

« ... est-ce que le phytoplancton et les herbiers ne se développeront-ils pas mieux ? »

Individus et écosystèmes (suite)

Est-ce que les organismes et les écosystèmes s'adapteront si certaines espèces calcifiantes disparaissent ?

L'acidification des océans liée aux activités humaines est d'environ 100 fois plus rapide dans l'océan de surface qu'au cours des dernières dizaines de millions d'années. Les écosystèmes répondront de manière différente. Dans certains, comme les récifs coralliens, les organismes calcifiants forment l'architecture fondamentale de l'écosystème ainsi, s'ils disparaissent, l'écosystème pourrait disparaître également. Dans d'autres écosystèmes où les organismes calcifiants jouent un rôle moins important, l'impact que pourrait avoir la perte d'espèces calcifiantes sur l'écosystème est moins évident. Dans les changements extrêmes et rapides de la chimie des océans, comme c'est le cas pour l'acidification, les organismes peuvent répondre de trois manières : acclimatation, adaptation ou extinction. Si la plupart des espèces s'acclimentent rapidement, la biodiversité et la fonction des écosystèmes marins peuvent rester relativement inchangées.

L'adaptation évolutive est elle liée au temps de génération : les espèces à longue durée de vie qui arrivent à maturité lentement auront moins de possibilités de donner naissance à une progéniture plus résistante à l'évolution rapide des conditions environnementales. Même les espèces qui se reproduisent plus rapidement peuvent ne pas être capable de s'adapter. Par exemple, à la frontière des régions où la température et la chimie des eaux leur sont favorables, les coraux ont essayé de s'adapter à des concentrations en ion carbonate plus faibles depuis plusieurs millions d'années, mais ils n'ont pas été capables de s'imposer face à des algues et autres espèces non calcifiantes. Il semble donc peu probable que les coraux parviendront à s'adapter aux nouvelles conditions de température et de chimie des eaux en quelques décennies pour répondre à l'acidification des océans. Si l'acidification des océans conduit à d'importantes modifications de l'abondance d'organismes clés de la chaîne alimentaire, ou à des extinctions significatives, nous pouvons nous attendre à d'importants changements dans le fonctionnement des écosystèmes --- comme les flux d'énergie et de matières des producteurs primaires (par exemple le plancton) vers les grands prédateurs (les poissons et les mammifères).

Les écosystèmes sont des réseaux complexes d'interactions entre les organismes biologiques et l'environnement, et il est difficile de prévoir la totalité des impacts écologiques d'une perturbation. Nous savons à partir d'études sur des sources volcaniques naturelles de CO₂ que

l'acidification des océans affecte les espèces de manière différente et que la composition des communautés est modifiée, conduisant à une réduction la biodiversité et un changement dans le fonctionnement global des écosystèmes. Nous dépendons de toute une gamme de services de l'écosystème marin, notamment la nourriture provenant des produits de la pêche, des revenus du tourisme et des loisirs, et du recyclage de l'oxygène et des éléments nutritifs provenant des processus biogéochimiques. Tous ces services peuvent être modifiés, et dans de nombreux cas, dégradés par l'acidification des océans.

Imaginez, par exemple, les conséquences économiques de la disparition des oursins sur la pêche au Japon ou les conséquences du déclin des larves de poissons d'espèces commercialement importantes. En outre, la diminution ou la disparition des organismes calcifiants aura une incidence (1) sur l'environnement chimique, (2) sur d'autres organismes calcifiants et non calcifiants qui en dépendent (par exemple, de nombreux organismes et des centaines de millions de personnes dépendent des récifs coralliens), et (3) sur le réservoir de carbone sur la Terre (la "roche" produite par les organismes calcifiants sédimentant sur le plancher océanique pour former des dépôts "crayeux" massifs qui enferment un peu de carbone dans des structures géologiques). Tout comme un aquarium négligé où les poissons et les coquillages cèdent la place aux algues, les écosystèmes marins peuvent s'adapter, mais ils pourraient alors être peuplés par des espèces qui sont moins utiles ou désirables pour l'homme, rendant les ressources traditionnelles et les services fournis par les écosystèmes modifiés indisponibles, différents d'avant, ou imprévisibles. *D. Iglesias-Rodriguez, S. Doney, S. Widdicombe, J. Barry, K. Caldeira, J. Hall-Spencer*

Est-ce que l'acidification des océans va supprimer toute vie dans les océans ?

Non. Cependant, de nombreux scientifiques pensent que l'acidification des océans entraînera des changements importants dans les écosystèmes marins. Cette prévision repose largement sur l'histoire géologique: il y a des millions d'années, les écosystèmes marins ont connu des changements rapides au cours d'épisodes d'acidification des océans, incluant certaines extinctions d'espèces (voir «Histoire géologique» ci-dessous). Aujourd'hui, certaines espèces et les écosystèmes qu'elles constituent sont menacés par l'acidification des océans, ce qui est particulièrement vrai en combinaison

« Dans les changements extrêmes et rapides de la chimie des océans, comme c'est le cas pour l'acidification, les organismes peuvent répondre de trois manières : acclimatation, adaptation ou extinction. »

Individus et écosystèmes (suite)

avec d'autres changements comme que le réchauffement des océans. Les exemples incluent les coraux tropicaux, les coraux d'eaux profondes et les escargots marins. Ces espèces jouent des rôles clés dans les océans, soit parce qu'elles construisent des structures tridimensionnelles, qui abritent une biodiversité considérable, soit parce qu'elles sont des composantes clés de la chaîne alimentaire. Certaines espèces qui construisent des structures en carbonate de calcium, tels que les récifs coralliens, assurent également des services fondamentaux aux humains en fournissant de la nourriture, en protégeant les côtes, et en engendrant du tourisme. Une preuve des effets écologiques de l'acidification des océans peut être trouvée actuellement aux sites « champagne », où des sources volcaniques naturelles de CO₂ acidifient naturellement l'eau et où de petites bulles de CO₂ s'élèvent vers la surface. A l'un de ces sites autour de l'île d'Ischia (Italie) par exemple, la biodiversité est réduite de 30% pour un niveau d'acidité qui correspond au niveau attendu en 2100. — J.-P. Gattuso, J. Hall-Spencer

Est-ce que le réchauffement et l'acidification vont contrebalancer la réponse des organismes?

En principe, il devrait y avoir quelques bénéfices au réchauffement pour le processus de calcification, car la précipitation du carbonate de calcium s'accroît avec l'augmentation de la température jusqu'à un certain seuil. Toutefois, les organismes sont habitués à vivre dans une gamme de température limitée et sont moins performants à des températures situées en dehors de cette gamme. Dans de nombreuses zones marines, des organismes (calcifiants et non-calcifiants) sont déjà exposés à des températures atteignant la limite supérieure de leur tolérance. Des études menées sur des crabes et des poissons ont démontré que l'exposition aux niveaux de CO₂ attendus si les émissions de CO₂ continuent à augmenter réduit leur capacité à tolérer des températures extrêmes. Des études sur les coraux ont également montré que le CO₂ augmente leur sensibilité thermique. Dans ce cas, cela augmente le risque d'événements de blanchissement déclenchés par le réchauffement. Globalement, il apparaît que l'acidification des océans pourrait accroître la sensibilité des organismes au réchauffement climatique. — H.-O. Pörtner

Est-ce que les organismes adultes seront en sécurité s'ils sont capables de survivre aux effets de l'acidification des océans quand ils sont très jeunes et vulnérables ?

Pour les organismes marins communs, les gamètes, les œufs, les différents stades larvaires, les juvéniles et les adultes peuvent être affectés différemment par l'acidification des océans, car ils ont des tolérances et des stratégies différentes pour faire face au stress environnemental. Dans certains cas, les premiers stades de vie peuvent être plus vulnérables au stress, tandis que dans d'autres cas, les adultes seront les plus vulnérables. Des expériences sont nécessaires sur tous les stades de vie pour comprendre tous les effets sur un organisme et pour mettre en évidence les stades qui constituent les maillons faibles. Il est également important de prendre en compte les répercussions que pourraient avoir l'acidification des océans sur la survie et la reproduction des organismes tout au long de leur vie. En général, les premières phases de la vie (gamètes, larves, juvéniles) sont supposées être plus sensibles à l'acidification des océans que les adultes. Si peu de jeunes organismes survivent jusqu'à l'âge adulte, la taille de la population sera réduite. Un stress permanent limite généralement la viabilité des organismes. Par exemple, les organismes stressés sont plus petits et se développent plus lentement, des prédateurs stressés seront moins efficaces et des proies stressées auront moins de chance d'échapper aux prédateurs. Enfin, ce stress diminuera le taux de survie, ce qui affectera la taille de la population. Pour les adultes, le stress causé par l'acidification des océans n'affectera pas forcément les activités quotidiennes, mais il finira par réduire la croissance de ces organismes et leur taux de reproduction. La diminution de la reproduction peut également modifier la taille de toute la population. Les impacts à n'importe quels stades de vie peuvent réduire le potentiel d'une population à se développer ou de se remettre des pertes provoquées par des perturbations ou des stress. — J. Barry, H. Findlay

« Est-ce que l'acidification des océans va supprimer toute vie dans les océans ? »

« En quoi le changement actuel de la chimie des océans est-il différent des précédentes périodes géologiques ? »

L'acidification des océans dans l'histoire géologique

Pourquoi les coraux disparaissent à cause de l'acidification des océans, quand certaines espèces de coraux ont déjà survécu à d'autres changements de la chimie des océans au cours de l'histoire géologique ?

Le danger de l'acidification des océans est lié à sa rapidité, à la concentration de CO₂ dans l'atmosphère attendue et à l'ampleur prédite du changement du CO₂ dans l'atmosphère si nous continuons à émettre du CO₂ à la même vitesse. La hausse actuelle du CO₂ atmosphérique est d'environ 2 ppm par an et le CO₂ atmosphérique a augmenté de plus de 100 ppm depuis le début de la révolution industrielle. Dans la transition entre la fin du dernier âge glaciaire à la période chaude actuelle, les concentrations de CO₂ ont augmenté de 80 ppm en plus de 10 000 ans. Aujourd'hui, l'accroissement du CO₂ dans l'atmosphère est donc environ 100 fois plus rapide que la plupart des grands changements observés au cours des temps géologiques. À l'exception des périodes de grandes extinctions de masse, il n'y a pas de preuve dans les enregistrements géologiques de changements de CO₂ dans l'atmosphère aussi ou plus importants qu'aujourd'hui. Même au cours de changements extrêmes de la chimie des océans, par exemple pendant le maximum thermique du Paléocène-Eocène il y a 55 millions d'années lorsque les minéraux carbonatés se sont dissous dans la plupart des océans intermédiaires et profonds, ces changements se sont probablement produits sur plusieurs milliers d'années. Les coraux ont en effet survécu à de multiples épisodes d'extinction dans l'histoire de la Terre, mais à chaque fois leur "rebond" a pris des millions d'années et leur capacité à former des récifs a demandé encore plus de temps. Les coraux les plus anciens se sont développés à l'Ordovicien, il y a plus de 400 millions d'années. Connus comme les coraux tabulés et rugueux, ils étaient très différents des coraux qui vivent aujourd'hui (les coraux modernes appartiennent aux Scléractiniaires et ont probablement évolué de façon indépendante à partir de ces formes antérieures), et les systèmes de récifs Ordovicien étaient dominés par les éponges plutôt que par les coraux. Ces groupes se sont éteints au cours de l'extinction Permien-Trias il y a 251 millions d'années, et les différentes lignées de coraux ont finalement évolué et prospéré à nouveau, en même temps que des récifs formés de bivalves qui ont construit d'énormes récifs durant toute la période du Crétacé, la plupart d'entre eux se sont éteints (avec les dinosaures) au cours de l'extinction du Crétacé il y a 65 Ma. Alors que les récifs coralliens disparaissaient à cette époque, environ la moitié de toutes les espèces de corail ont survécu, mais il a fallu des millions d'années avant

que les récifs ne réapparaissent et reprennent leur extension. En général, la vie dans les océans récupère après des épisodes d'extinction par l'adaptation et l'évolution en de nouvelles espèces mais il faut environ 10 millions d'années pour atteindre les niveaux de biodiversité précédant l'extinction.— *J. Barry, D. Schmidt, K. Caldeira*

En quoi le changement actuel de la chimie des océans est-il différent des précédentes périodes géologiques ?

Les conditions actuelles diffèrent largement de celles du passé parce que l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère ne correspond pas à la diminution engendrées par les processus géologiques naturels. Si le CO₂ est ajouté lentement sur des centaines de milliers d'années, comme ce fut le cas durant l'Ordovicien par l'activité volcanique et des plaques tectoniques, le CO₂ qui pénètre dans l'océan a le temps de se mélanger dans toute la colonne d'eau. En conséquence, même si la quantité de CO₂ qui est absorbée par l'océan est grande, elle est répartie dans un très grand volume d'eau et la diminution du pH qui en résulte est faible. Dans le même temps, comme le niveau de CO₂ au fond des océans augmente au fil des millénaires, les sédiments carbonatés gisant sur les fonds marins commencent à se dissoudre et à libérer des ions carbonates qui neutralisent une partie de l'acidité, ce qui réduit encore la diminution du pH. Les océans du passé contenaient également de plus grandes concentrations en ions calcium et magnésium, ce qui a contribué à stabiliser les minéraux de carbonate de calcium dans les squelettes d'animaux marins.

Aujourd'hui, le CO₂ dans l'atmosphère augmente beaucoup plus vite que l'océan ne se mélange. Pendant les rejets de CO₂ sur des échelles de temps courtes (<10 000 ans), la capacité des sédiments à réguler la chimie des océans est insuffisante, entraînant une diminution du pH et des taux de saturation. Même si la quantité de CO₂ qui est entrée dans l'océan au cours des 200 dernières années est plus faible que celle ajoutée au cours de l'Ordovicien, le CO₂ s'est accumulé à une concentration beaucoup plus élevée dans l'océan de surface. En conséquence, le pH de l'océan supérieur a diminué plus rapidement et plus fortement que dans le passé géologique. A la fois le taux de changement du pH et l'ampleur de ce changement présentent des problèmes pour les organismes qui se sont développés dans un océan qui a connu de faibles et lents changements de pH par le passé. — *C. Langdon, A. Ridgwell, R. Zeebe, D. Schmidt*

Méthodes Scientifiques

Les expériences sur les organismes sont souvent irréalistes, car les scientifiques ajoutent parfois des acides minéraux et non pas du CO₂ pour abaisser le pH aux niveaux prévus.

L'ajout d'acide dans de l'eau de mer accompagné de l'ajout d'une quantité égale (équimolaire) de bicarbonate de sodium simule parfaitement les changements de la chimie des carbonates provoqués par l'absorption de CO₂. Même lorsque l'acidification des océans est simulée en manipulant l'eau de mer par des ajouts d'acide sans ajout de bicarbonate (ou de carbonate), il est presque impossible de la distinguer en termes de pH, pCO₂, de concentration d'ions carbonates et du taux de saturation, de l'eau de mer manipulée par injection de CO₂. Les différents traitements entraînent des concentrations légèrement supérieures en bicarbonate dans les manipulations avec injection de CO₂. Toutefois, le bicarbonate augmente dans les deux approches. En fait, on ne trouve aucune différence systématique dans les réponses des organismes calcifiants exposés à une eau de mer acidifiée par un acide ou par une injection de CO₂. — U. Riebesell

Même les scientifiques reconnaissent qu'il y a des incertitudes concernant le changement climatique. Quelle certitude a-t-on sur l'acidification des océans ?

Il n'y a pas de doute que la chimie de l'eau de mer est modifiée par l'augmentation du CO₂ atmosphérique et que l'utilisation des combustibles fossiles et la déforestation en sont les causes fondamentales. Il y a moins de certitude sur les effets biologiques possibles de l'acidification des océans, mais cela reflète principalement le fait que les différents groupes d'organismes marins manifestent une grande gamme de sensibilité au changement de la chimie de l'eau de mer. Il y a un large consensus dans la communauté scientifique sur le fait que l'acidification des océans se produit et qu'elle aura probablement des effets significatifs, certains positifs et d'autres négatifs, sur un grand nombre d'organismes marins. — S. Doney

Les « preuves » sur l'acidification des océans sont contradictoires ; ainsi, même les scientifiques ne s'entendent pas.

Il n'y a pas de désaccord sur les données chimiques, qui montrent que l'acidification des océans se produit. Toutefois, les données biologiques montrent des réponses variées selon les organismes. Il peut parfois sembler étrange

que des expériences menées sur les mêmes espèces puissent produire des résultats apparemment contradictoires. Toutefois, il est clair que la réponse des organismes marins à des concentrations élevées de CO₂ n'est pas seulement influencée par l'organisme étudié, mais aussi par les conditions environnementales qu'il a connu au cours de sa vie. Par conséquent, les membres d'une même espèce, prélevés dans des zones, des populations ou des souches différentes peuvent manifester des réponses différentes. La diversité des réponses ne doit pas être considérée comme contradictoire, mais plutôt comme un aperçu de la variabilité naturelle qui existe parmi les populations. Ce n'est qu'en mesurant et en comprenant cette variabilité que nous serons à même de prédire quelles espèces, quelles communautés et quels écosystèmes sont les plus menacés par l'acidification des océans. — S. Widdicombe

Est-ce que les impacts observés de l'acidification des océans à la suite d'expériences qui ont simplement placé les organismes dans une eau avec des niveaux de CO₂ qui mettront des décennies ou des siècles à être atteints, ne s'apparentent pas à des traitements de choc ?

Dans les expériences de réponses à l'acidification des océans, les animaux ne sont généralement pas mis immédiatement dans des eaux enrichies en CO₂. Ils sont placés dans de l'eau qui est ensuite équilibrée avec des mélanges de gaz soigneusement contrôlés. Bien qu'il soit impossible d'effectuer des expériences permettant de simuler le taux d'accumulation de CO₂ anthropique dans l'atmosphère et les océans, les niveaux de CO₂ utilisés sont très inférieurs à ceux qui sont susceptibles de provoquer un choc. Néanmoins, ces niveaux de CO₂ peuvent perturber les processus physiologiques (la régulation acido-basique, le développement des larves, la croissance) d'une manière qui semble relativement modérée sur une courte échelle de temps. Par conséquent, les expositions à long terme sont généralement nécessaires pour déterminer si ces niveaux sont néfastes et s'ils peuvent se révéler mortels. Sur de longues échelles de temps, même de légères altérations de la santé des animaux peuvent nuire à une espèce, par exemple, dans les cas où des espèces sont en compétition avec d'autres dans un écosystème ou quand elles sont exposées à un autre facteur de stress comme des températures extrêmes. — H.-O. Pörtner

« Quelle certitude a-t-on sur l'acidification des océans ? »

Géo-ingénierie et atténuation

Si nous augmentons l'aquaculture et élevons plus de coquillages, est-ce que les coquilles pourraient aider à piéger le dioxyde de carbone (comme les arbres)?

Le processus de calcification ne piège pas le CO₂, mais il provoque des changements dans le système du carbone dans l'eau de mer qui se traduisent par un abaissement du pH et une augmentation, plutôt qu'une diminution du CO₂. Beaucoup d'organismes convertissent le bicarbonate en carbonate afin de construire leurs coquilles, produisant des ions hydrogène et augmentant ainsi l'acidification. La plupart des récifs coralliens, par exemple, sur les échelles de temps qui nous concernent, sont de petites sources de CO₂ vers l'atmosphère plutôt que des puits. Du point de vue des écosystèmes, même l'aquaculture, aussi bien intentionnée soit-elle, pourrait causer des dommages involontaires en modifiant les paysages côtiers, en augmentant la pollution et les maladies, ou par l'introduction d'espèces génétiquement modifiées ou étrangères dans l'environnement. Toute activité visant à réduire l'acidification des océans doit être considérée dans un contexte plus large pour éviter de remplacer un stress environnemental par un autre. — A. Cohen, S. Widdicombe

Est-ce que la géo-ingénierie climatique peut aussi aider à résoudre l'acidification des océans?

La plupart des approches de géo-ingénierie proposées pour limiter le changement climatique tentent d'apporter un traitement symptomatique sans pour autant s'attaquer à la racine du problème : l'excès de gaz carbonique dans l'environnement. La plupart des propositions de géo-ingénierie s'adressent aux conséquences climatiques de nos émissions de gaz carbonique, mais ne se préoccupent pas des conséquences chimiques de ces émissions. Par exemple, les stratégies qui cherchent à refroidir la Terre en réfléchissant du rayonnement solaire vers l'espace auraient peu d'effet direct sur la chimie des océans et donc ne diminueraient pas significativement leur acidification.

Certaines approches visent à limiter les modifications de la chimie des océans par ajout de substances qui neutraliseraient l'augmentation d'acidité. Toutefois, pour éviter l'acidification des océans, il faudrait ajouter une quantité de substance beaucoup plus importante que la quantité de gaz carbonique que nous émettons dans l'atmosphère. Par conséquent, ces

solutions nécessiteraient de nouvelles ressources minières et des infrastructures de traitement chimique aussi développées que notre système énergétique actuel. Il semble raisonnable de penser qu'il serait préférable d'investir la même énergie et le même financement pour transformer notre système énergétique afin de nous libérer de la dépendance à un réservoir limité de ressources en combustibles fossiles et d'accroître l'utilisation des énergies renouvelables, ressources infinies. Cela permettrait également d'éviter au dioxyde de carbone d'être rejeté dans l'environnement dans un premier temps, plutôt que d'envisager de neutraliser ses effets une fois qu'il s'est déjà propagé à travers l'atmosphère et les océans. — K. Caldeira

La limitation du CO₂ dans l'atmosphère à 350 ou 400 ppm, pourrait-elle arrêter l'acidification des océans ?

Le CO₂ atmosphérique est déjà à 390 ppm et augmente d'environ 2 ppm par an. Sans réduction spectaculaire des émissions de CO₂, le CO₂ atmosphérique continuera d'augmenter. La plupart des prévisions concernant les émissions dans un futur proche indiquent une augmentation probable (plutôt qu'une diminution) des taux de croissance de CO₂ atmosphérique. La première étape pour lutter contre l'acidification des océans est, par conséquent, de stabiliser et éventuellement de réduire les émissions de CO₂. Le CO₂ atmosphérique dépassera certainement les 400 ppm, car nous n'arrêterons pas l'augmentation des émissions dans les 5 prochaines années. Les impacts sur la vie marine au niveau du pic de CO₂ pourraient être substantiels. Sur le long terme, il sera possible de réduire le CO₂ de l'atmosphère grâce à des mécanismes naturels et artificiels d'absorption. La chimie de l'eau de mer est réversible, et en revenant à 350-400 ppm, le pH et les niveaux de saturation des carbonates pourraient être approximativement rétablis à leurs niveaux actuels. Toutefois, certains travaux suggèrent que même les conditions actuelles peuvent être délétères pour certains organismes et il n'est ainsi pas évident que les futurs impacts biologiques dus aux pics de CO₂ seront réversibles. Même si nous stabilisons les émissions de CO₂, le CO₂ atmosphérique issu des combustibles fossiles continuera à pénétrer dans l'océan profond pour les siècles à venir, ce qui pourrait avoir un impact sur les organismes vivant en eaux profondes comme les coraux d'eau froide. — S. Doney

« La limitation du CO₂ dans l'atmosphère à 350 ou 400 ppm, pourrait-elle arrêter l'acidification des océans ? »

Développement de la réglementation et prise de décisions

N'est-il pas préférable de sacrifier les océans et de les laisser absorber le CO₂ afin de stabiliser le climat ?

L'acidification des océans et le changement climatique sont les deux faces d'une même pièce. Tous deux sont les conséquences directes des émissions de CO₂ anthropique et ne peuvent pas être séparés l'une de l'autre. L'absorption actuelle d'environ un quart des émissions anthropiques de CO₂ par l'océan sert, en effet, de tampon contre l'augmentation du CO₂ atmosphérique, et ainsi ce «service» pourrait être envisagé pour diminuer, mais pas empêcher, le changement climatique. À long terme, sur des échelles de dizaines de milliers d'années, la majeure partie des émissions anthropiques de CO₂ (80 à 90 %) se retrouvera dans l'océan. Toutefois, cela ne protégera pas le système climatique du réchauffement global au cours de la période intermédiaire. Il est également important de souligner que l'absorption du CO₂ par les océans aura de profondes répercussions sur le fonctionnement des écosystèmes de la Planète. Les océans jouent un rôle essentiel dans les cycles biogéochimiques, non seulement dans la régulation du CO₂, mais aussi dans la production d'oxygène, dans le cycle de l'azote et d'autres nutriments importants, ainsi que dans la production de gaz qui modifient la formation des nuages. De nombreuses espèces utilisent à la fois la Terre et l'océan comme habitat, et beaucoup d'êtres humains dépendent de la santé des océans pour leur subsistance. Les océans sont une partie intégrante et interconnectée du système Terre, et ne peuvent être considérés de manière réaliste comme une entité séparée. — *U. Riebesell, J. Kleypas*

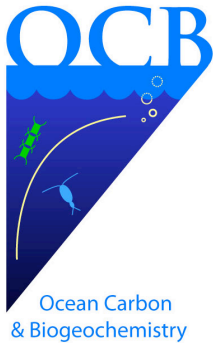
Est-il trop tard pour faire quoi que ce soit ?

Il est parfaitement possible d'un point de vue technique et économique de modifier nos systèmes énergétiques, nos systèmes de transports et nos pratiques d'utilisation des terres pour éliminer en grande partie les émissions de dioxyde de carbone de nos économies d'ici le milieu du siècle. On pense que le coût de cette opération serait limité, peut-être 2 % de la production économique mondiale. Il s'avère pourtant difficile pour les sociétés de se décider à procéder à cette conversion. *K. Caldeira*

Si l'acidification des océans est tellement potentiellement grave, pourquoi n'est-elle pas incluse dans la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) à la Conférence des Parties (CdP) sur les négociations d'atténuation du changement climatique?

Bien que les scientifiques savent depuis des décennies que l'acidification des océans se produira en raison de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère, la prise de conscience sur les conséquences sur la vie marine s'est faite il y a à peine une dizaine d'années. A cette époque, les biologistes ont découvert que l'acidification des océans affectait la capacité des organismes marins à former leur coquille ou squelette. Depuis il a été montré que de nombreux autres effets de l'acidification des océans influencent un large éventail d'organismes et de processus marins. Parce que la démarche scientifique repose sur des protocoles formels de recherche, sur la révision par des pairs et sur la publication, il faut un certain temps pour qu'une nouvelle découverte soit vérifiée et acceptée par la communauté scientifique. Toutefois, des évidences suffisantes existent sur l'acidification des océans depuis 2007, date à laquelle le quatrième rapport d'évaluation du GIEC sur les changements climatiques indiquait, dans le résumé pour les décideurs, « l'acidification progressive des océans due à l'augmentation du dioxyde de carbone atmosphérique devrait avoir des impacts négatifs sur les organismes marins formant des coquilles (comme les coraux) et les espèces qui en dépendent ». L'acidification des océans et ses effets ont été décrits au point qu'ils sont aujourd'hui largement acceptés par la communauté scientifique et qu'ils seront sérieusement abordés dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC. En fait, l'acidification des océans a été un sujet de discussion majeur lors d'événements tels que la Journée des Océans à la Conférence des Parties (COP15) de décembre 2009 à Copenhague, même si des considérations spécifiques sur les océans ont fait l'objet de peu ou pas de mention dans le texte de l'accord proposé. — *J. Kleypas, C. Turley*

« Est-il trop tard pour faire quoi que ce soit ? »



www.us-ocb.org
www.whoi.edu/OCB-OA



www.epoca-project.eu



www.oceanacidification.org.uk

Développement de la réglementation et prise de décisions (suite)

Pourquoi est-il important d'effectuer des recherches sur l'acidification des océans ? Et que peuvent faire les scientifiques ?

Par rapport aux environnements terrestres, les océans et leurs écosystèmes sont mal compris. Avec les progrès technologiques récents, notre connaissance croît rapidement, cependant nous avons encore beaucoup à apprendre. Si les décideurs politiques doivent prendre des décisions éclairées en matière de changement climatique et d'acidification des océans, les scientifiques doivent leur fournir la meilleure information possible. Ceci nécessite des recherches. Tout le monde doit reconnaître que l'obtention et la distribution de ces connaissances exige beaucoup d'efforts, et maintenir une communication claire et ouverte entre les chercheurs, les dirigeants et les citoyens est essentielle.

Les scientifiques ont répondu « oui » à la question « Est-ce que l'acidification des océans est réelle ? ». Nous sommes maintenant confrontés à des questions telles que « À quel point l'acidification des océans sera néfaste ? » et « Que pouvons-nous faire ? ». La plupart des scientifiques conviennent que la réduction des émissions de gaz à effet de serre est la meilleure réponse à « Que pouvons-nous faire ? ». Il est plus difficile et encore plus important de fournir une réponse à la question restante, car nous sommes parfaitement conscients que les niveaux de CO₂ continueront à augmenter dans un avenir proche. Beaucoup de scientifiques se focalisent désormais sur la concentration de CO₂ qui est considérée comme « dangereuse » pour la planète et pour la société. La question « Que pouvons-nous faire ? » est passée de qu'est-ce qui peut être fait sur la cause du problème (le CO₂) à qu'est-ce qui peut être fait pour prévenir ses conséquences. Nous cherchons essentiellement à répondre à la question « A quoi ressembleront les écosystèmes marins futurs et quels services fourniront-ils à la planète et à l'humanité ? » C'est un énorme défi. Comme en témoignent plusieurs de ces questions, l'acidification des océans est un problème simple mais qui a des conséquences complexes. — *J. Kleypas, C. Turley, R. Key*

Scientifiques qui ont contribué ou aidé à examiner ce document

Jim Barry, Senior Scientist, Monterey Bay Aquarium Research Institute, USA
 Jelle Bijma, Biogeochemist, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Germany
 Ken Caldeira, Senior Scientist, Carnegie Institution for Science, USA
 Anne Cohen, Research Specialist, Woods Hole Oceanographic Institution, USA
 Sarah Cooley, Postdoctoral Investigator, Woods Hole Oceanographic Institution, USA
 Scott Doney, Senior Scientist, Woods Hole Oceanographic Institution, USA
 Richard A. Feely, Senior Scientist, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, USA
 Helen Findlay, Lord Kingsland Fellow, Plymouth Marine Laboratory, UK
 Jean-Pierre Gattuso, Senior Scientist, Centre National de la Recherche Scientifique and Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, France
 Jason Hall-Spencer, Marine Biology Lecturer, University of Plymouth, UK
 Michael Holcomb, Postdoctoral Research Associate, Centre Scientifique de Monaco, Monaco
 David Hutchins, Professor of Marine Environmental Biology, University of Southern California, USA
 Debora Iglesias-Rodriguez, Lecturer, National Oceanography Centre of the University of Southampton, UK
 Robert Key, Research Oceanographer, Princeton University, USA
 Joan Kleypas, Scientist III, National Center for Atmospheric Research, USA
 Chris Langdon, Associate Professor, University of Miami, USA
 Daniel McCorkle, Associate Scientist, Woods Hole Oceanographic Institution, USA
 James Orr, Senior Scientist, Laboratory for the Sciences of Climate and Environment, France
 Hans-Otto Pörtner, Professor, Alfred Wegener Institute, Germany
 Ulf Riebesell, Professor for Biological Oceanography, Leibniz Institute of Marine Sciences IFM-GEOMAR, Germany
 Andy Ridgwell, Royal Society University Research Fellow, University of Bristol, UK
 Christopher L. Sabine, Supervisory Oceanographer, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, USA
 Daniela Schmidt, Senior Research Fellow, University of Bristol, UK
 Brad Seibel, Assistant Professor of Biological Sciences, University of Rhode Island, USA
 Carol Turley, Senior Scientist, Plymouth Marine Laboratory, UK
 Steve Widdicombe, Benthic Ecologist, Plymouth Marine Laboratory, UK
 Richard Zeebe, Associate Professor, University of Hawaii at Manoa, USA

Document traduit de l'anglais par Michaël Grelaud, Laetitia Hédouin, Lina Hansson et Jean-Pierre Gattuso.