



# L'acidification menace

**Une part importante du dioxyde de carbone libéré dans l'atmosphère par la combustion des énergies fossiles se retrouve dans l'océan, où il augmente l'acidité de l'eau. Les organismes marins en souffriront.**

**Scott DONEY**  
est directeur de recherche  
dans le Département  
de chimie marine  
et de géochimie de l'Institut  
océanographique de Woods  
Hole, dans le Massachusetts.

**E**n 1956, Roger Revelle et Hans Suess, géochimistes à l'Institut Scripps d'océanographie en Californie, voulaient mesurer la quantité de dioxyde de carbone présent dans l'air et dans les océans, afin d'estimer l'impact, dans les 50 années à venir, de la production industrielle de ce gaz sur le climat. À l'époque, de telles mesures semblaient inutiles, car on ne pensait pas que le dioxyde de carbone, émis par les tuyaux d'échappement des voitures et les cheminées d'usines, s'accumulait dans l'atmosphère. Certains scientifiques croyaient qu'il était absorbé par les océans et lors de la croissance des plantes.

Revelle et Charles Keeling ont alors installé des dispositifs de mesure des concentrations en dioxyde de carbone dans des lieux éloignés de toute source de ce gaz, pour éviter les variations aléatoires des données. Le premier site, loin de toute activité industrielle et de toute végétation, fut le pôle Sud. L'autre site était la station météorologique au sommet du volcan Mauna Loa, à Hawaï. Depuis 1958, à Mauna Loa, la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est

mesurée presque sans interruption. À l'inverse de ce qui se passe en Antarctique, la concentration de ce gaz à Hawaï augmente et diminue en fonction des saisons, mais, à la fin de chaque année, elle est toujours supérieure dans l'atmosphère à sa valeur 12 mois auparavant : une partie du dioxyde de carbone libéré dans l'atmosphère y reste piégée.

## Une hypothèse hélas confirmée

De surcroît, ses calculs prédisaient qu'une fraction importante du dioxyde de carbone se retrouverait dans l'océan. Étaient-ils corrects ? Oui, et l'on proposa à l'époque que ce gaz modifie la chimie des eaux marines. Cette hypothèse d'une dissolution du dioxyde de carbone dans l'eau conduisant à une acidification des océans est aujourd'hui avérée. De nombreuses études récentes révèlent les effets de cette acidification, déjà mesurable, sur l'écosystème marin. Par exemple, en 2011, l'équipe de Jean-Pierre Gattuso, du Laboratoire d'océanographie de Villefranche, a montré qu'en Méditerranée, l'augmentation de la température de l'eau diminue la résistance des coraux et des



# les écosystèmes marins

LES RÉCIFS CORALLIENS, et donc la faune et la flore qu'ils abritent, sont menacés par l'acidification des océans liée à la dissolution du dioxyde de carbone atmosphérique.

Shutterstock/ Rich Carey

mollusques à son acidification. Nous décrivons ces travaux après avoir rappelé la chimie du dioxyde de carbone dans le milieu marin.

## Un phénomène anormal

Les données obtenues pendant près de 50 ans par Keeling sont précieuses, mais insuffisantes pour replacer la situation actuelle dans un contexte plus global. Toutefois, les géophysiciens disposent de données plus anciennes grâce à l'étude des bulles d'air piégées dans les carottes glaciaires. Ces archives naturelles ont révélé que la concentration en dioxyde de carbone est restée presque constante pendant plusieurs millénaires avant d'augmenter brusquement au moment de la révolution industrielle du début du XIX<sup>e</sup> siècle (*voir l'encadré page 104*). Aujourd'hui, la concentration atmosphérique de ce gaz est 30 pour cent supérieure à celle d'il y a quelques centaines d'années, et on pense qu'elle doublera, voire triplera, d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle si les différents protocoles et mesures proposés à l'échelle internationale restent lettre morte.

Ce « nouveau » carbone provient essentiellement de la combustion des énergies fossiles : charbon, pétrole et gaz naturel (la production de ciment et la combustion des forêts tropicales en apportent également, mais nous négligerons ces contributions secondaires). À l'inverse des organismes vivants, les combustibles fossiles contien-

ent peu (ou pas) de carbone 14, l'isotope radioactif du carbone dont le noyau contient huit neutrons au lieu des six habituels. De plus, ces combustibles ont un rapport spécifique des deux isotopes stables du carbone (le carbone 12 et le carbone 13). En brûlant, ces combustibles laissent donc une signature isotopique typique dans l'atmosphère et l'on peut mesurer leur contribution.

Environ 40 pour cent du dioxyde de carbone issu de la combustion des énergies fossiles demeurent dans l'atmosphère; le reste est absorbé en proportions quasi égales par la végétation terrestre et par les océans. Aujourd'hui, le carbone qui se dissout dans l'eau de mer représente un apport faible, car l'océan est un immense réservoir naturel de cet élément. C'est pourquoi la détection et la quantification du carbone absorbé nécessitent des mesures très précises. Étant donné que les concentrations en carbone varient fortement selon les endroits, elles doivent être cartographiées dans le monde entier. Les océanographes ont réalisé ces mesures à la fin des années 1980 et dans les années 1990, dans le cadre de deux évaluations globales nommées JGOFS (pour *Joint Global Ocean Flux Survey*, c'est-à-dire Relevé des flux globaux océaniques) et WOCE (pour *World Ocean Circulation Experiment*, c'est-à-dire Étude de la circulation océanique mondiale).

Cependant, ces études ne distinguaient pas le dioxyde de carbone naturel du carbone libéré

## L'ESSENTIEL

- ➔ Le dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère est en partie absorbé par les océans.
- ➔ Après une chimie complexe, le gaz entraîne une acidification de l'eau.
- ➔ Ce phénomène entrave l'élaboration de structures carbonatées par nombre d'organismes (coraux, ptéropodes, coquillages, algues...).
- ➔ Dès lors, leur survie est menacée, à l'horizon d'un siècle.

dans l'atmosphère par l'activité humaine. On sait désormais que les océans absorbent environ 30 pour cent des rejets anthropiques de dioxyde de carbone (combustibles fossiles, déforestation, production de ciment...). Cela représente environ un million de tonnes par heure!

Pour estimer la dissolution du carbone dans les océans, il est aussi possible de mesurer régulièrement les concentrations du carbone dans une même région de l'océan. Cela suppose de distinguer le carbone fossile des diverses sources marines. Qui plus est, pour enregistrer des variations globales correspondant à la combustion des énergies fossiles, et non à la production naturelle, l'écart entre les mesures doit être au moins d'une dizaine d'années. En 2005, avec Rik Wanninkhof, du Laboratoire météorologique et océanographique de l'Atlantique,

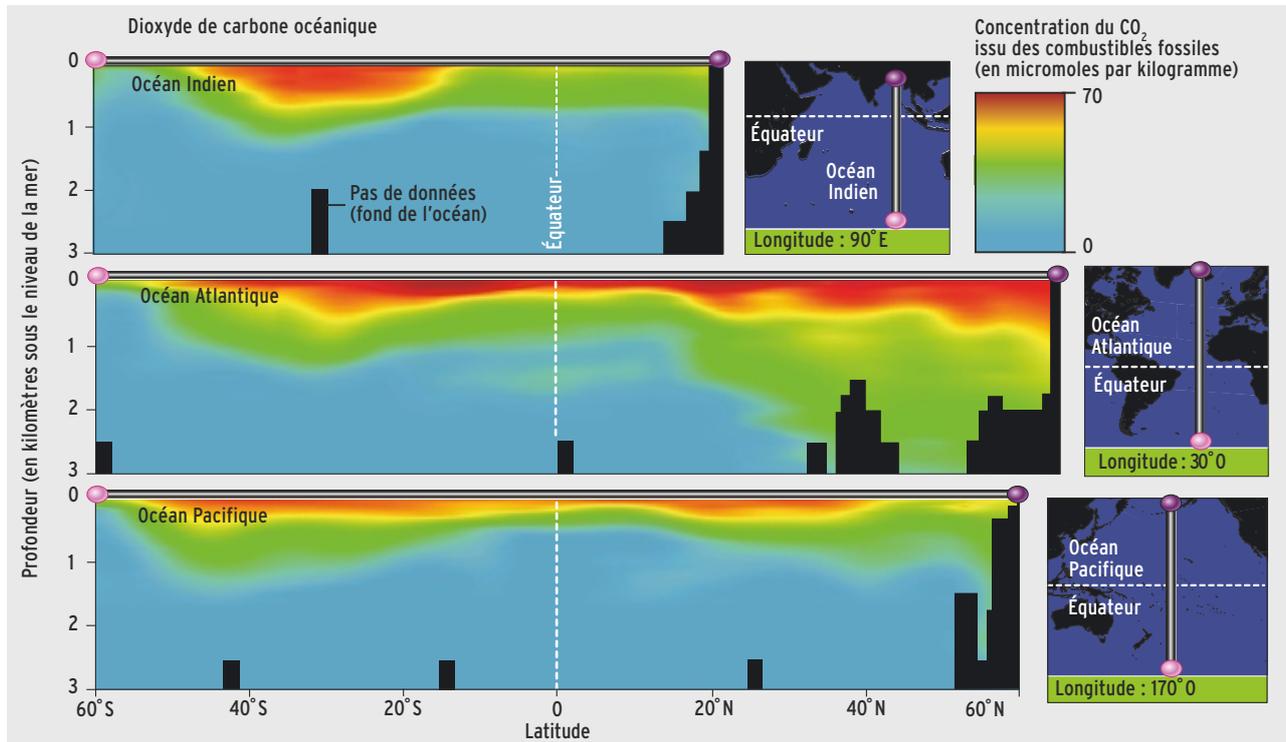
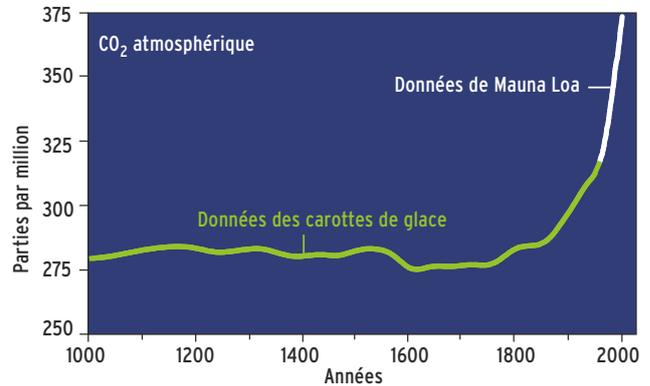
et une équipe de 31 personnes, nous avons échantillonné, pendant près de deux mois, les propriétés physiques et chimiques des eaux de l'Ouest de l'Atlantique Sud, en partant de l'Antarctique et en finissant au niveau de l'équateur. Nous avons déjà mesuré les caractéristiques chimiques de cette zone de l'Atlantique en 1989. La comparaison des résultats des deux études révèle que, sur une profondeur de quelques centaines de mètres, la surface de l'Atlantique Sud est aujourd'hui plus concentrée en carbone que par le passé. De surcroît, d'autres océanographes ont obtenu des résultats similaires dans les océans Pacifique et Indien. Mais quelles seront les conséquences de cette assimilation de dioxyde de carbone pour l'environnement marin?

Revenons sur quelques notions de chimie pour comprendre quel sera l'impact des modifications

## Le dioxyde de carbone : de l'atmosphère à l'océan

La concentration atmosphérique en dioxyde de carbone a notablement augmenté depuis plus d'un siècle. Cette tendance a été mise en évidence (*ci-contre*) grâce à une combinaison de deux techniques : l'analyse des bulles d'air piégées dans les glaces polaires (*en vert, les données représentent des moyennes sur 75 ans*), et des mesures directes dans l'atmosphère (*en blanc, où figurent les moyennes annuelles enregistrées à la station météorologique située au sommet du Mauna Loa à Hawaï*).

Cette augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère aurait été encore supérieure si les océans n'en avaient pas absorbé une grande partie. Sur les relevés océanographiques (*ci-dessous*), on constate que les océans piègent la moitié du dioxyde de carbone libéré par la combustion des énergies fossiles.



du milieu océanique (voir la figure page 106). Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) réagit avec l'eau pour donner de l'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), l'acide présent dans les boissons gazeuses. Ce dernier libère en solution des ions hydrogène ( $\text{H}^+$ ), mais aussi des ions bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), et, dans une moindre mesure, des ions carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Une petite quantité de l'acide carbonique et du dioxyde de carbone reste en solution sans se dissocier.

### De l'acide carbonique en plus

Ce processus de dissolution et de dissociation du dioxyde de carbone entraîne une augmentation de la concentration en ions hydrogène, quantifiée par le *pH*. Une diminution d'une unité de *pH* correspond à une multiplication par dix de la concentration en ions hydrogène: l'eau est plus acide. À l'inverse, un gain d'une unité de *pH* correspond à une division par dix de cette même concentration: l'eau est plus basique (ou alcaline). Un *pH* neutre – celui de l'eau pure – est égal à 7. Le *pH* de l'eau de mer – nonobstant les effets de l'activité humaine – varie entre 8 et 8,3: l'océan est naturellement alcalin.

L'absorption de gaz carbonique a entraîné une baisse du *pH* des eaux de surface de 0,1 par rapport à leur valeur de l'époque préindustrielle: elles sont plus acides. À moins que nous ne réduisions rapidement l'utilisation des combustibles fossiles, le *pH* des océans devrait baisser de 0,3 d'ici 2100. Si le rythme est maintenu, le *pH* des océans pourrait correspondre, d'ici quelques siècles, au plus bas niveau jamais atteint depuis 300 millions d'années.

Ces modifications du *pH*, même minimes, seront nocives pour certaines formes de vie marine, en particulier pour les organismes calcaires qui utilisent le carbonate dissous dans l'eau pour fabriquer le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) de leur coquille (ou d'autres parties dures de leur corps). Si une partie du gaz carbonique absorbé par les océans se dissocie en ions carbonate, ces ions ne devraient-ils pas être disponibles en plus grande quantité? Il n'en est rien, car les ions hydrogène augmentent également et réagissent avec les ions carbonate pour former des ions bicarbonate. Au total, on observe une diminution de la concentration en ions carbonate quand le *pH* de l'eau diminue. Cette diminution du *pH* – et, par conséquent, de la concentration en ions carbonate qui devrait encore être réduite de moitié d'ici la fin du siècle – limitera la production de carbonate de calcium par les organismes calcaires, lesquels se développeront plus difficilement.

Une des formes de vie les plus abondantes, qui sera sans doute perturbée par l'acidification des océans, est un type de phytoplancton, les coccolithophores, recouverts de petites plaques de carbonate de calcium, et qui flottent près de la surface de l'eau. Toutefois, les études sur ces

### LES CORAUX PROFONDS EN DANGER

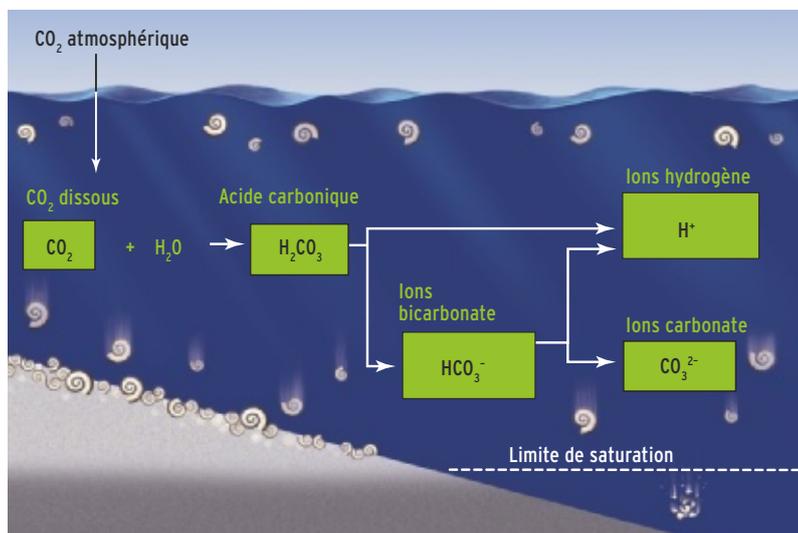
Depuis quelques années, les submersibles nous ont fourni des images remarquables d'un type de corail peu connu, vivant en profondeur, dans les eaux les plus froides de l'océan. Ainsi, une barrière de ce corail a été mise en évidence à l'Ouest de l'Europe; elle s'étend sur près de 4 500 kilomètres, soit deux fois et demie la longueur de la Grande Barrière de corail tropical en Australie... Mais, à la différence de leurs cousins tropicaux qui vivent en surface dans les eaux chaudes et ensoleillées, les coraux profonds se développent très lentement, dans l'obscurité, en filtrant l'eau pour en extraire des particules de matière organique. Ils vivraient des centaines, voire des milliers, d'années. L'acidification des océans leur portera-t-elle préjudice? Oui, et ce seront peut-être les organismes marins les premiers touchés.

Les squelettes externes de ces coraux profonds, constitués d'aragonite, sont essentiels non seulement à la survie de ces organismes, mais aussi au développement de plusieurs écosystèmes originaux, comprenant des poissons de pleine mer, des anguilles, des crabes, des oursins, et plus d'un millier d'autres espèces. Ces coraux sont déjà gravement menacés par les pratiques modernes de la pêche et la diminution du *pH* de l'océan ne fera qu'amplifier leur déclin. Plusieurs études ont montré que l'acidification progressive de l'océan détruira les coraux tropicaux, qui auront des difficultés à bâtir leurs squelettes. Cependant, les coraux profonds seront, encore plus tôt que leurs cousins tropicaux, baignés dans des eaux corrosives pour l'aragonite. En avril 2006, John Guinotte et ses collègues, dans notre laboratoire, ont montré qu'au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, les deux tiers des coraux profonds recensés aujourd'hui seront soumis à ces conditions corrosives: leur squelette se dissoudra et ils ne seront plus capables de produire de l'aragonite. Si les émissions de gaz carbonique dans l'atmosphère ne diminuent pas rapidement, nous risquons de perdre la plupart de ces coraux profonds ainsi que les écosystèmes qui leur sont associés, qui comprennent des réserves de poissons commercialement importantes.

James ORR et Laurent BOPP  
Laboratoire des sciences du climat  
et de l'environnement, Saclay



IFREMER, 2003



**LE DIOXYDE DE CARBONE** de l'air, absorbé par les océans, se combine avec l'eau pour donner de l'acide carbonique. Une partie de cet acide reste dans l'océan, mais une grande proportion se dissocie en ions hydrogène et en ions bicarbonate. Ces derniers donnent des ions carbonate et hydrogène. Ces réactions chimiques aboutissent à une remontée vers la surface des limites de saturation de la calcite et de l'aragonite (les profondeurs sous lesquelles les coquilles des organismes marins se dissolvent).

organismes ont parfois des résultats opposés, et il est encore difficile de trancher. D'autres types de plancton, les foraminifères et les ptéropodes (de petits escargots marins) seront atteints (voir la figure page ci-contre). Ces minuscules créatures sont la base d'une chaîne alimentaire qui met en jeu de nombreux poissons et des mammifères marins, jusqu'à certaines baleines.

Les coraux subiront aussi les effets de l'acidification des eaux. Ces animaux, apparentés aux anémones de mer, se nourrissent de plancton en filtrant l'eau de mer. Ils fabriquent un squelette en carbonate de calcium qui s'accumule au fil du temps, formant les récifs coralliens – un des écosystèmes les plus productifs et les plus variés des océans. Les algues corallines (des algues qui produisent du carbonate de calcium et ressemblent aux coraux) contribuent aussi à la calcification des récifs. Par exemple, la Grande Barrière de corail, au large de l'Australie (la plus grande structure biologique au monde) est constituée de l'accumulation de générations et de générations de coraux et d'algues corallines. Plus en profondeur, des coraux d'eau froide recouvrent les marges continentales et le relief sous-marin, formant des habitats riches en poissons.

Les couleurs des coraux tropicaux sont dues à la présence d'algues symbiotiques, vivant à l'intérieur des cellules du corail. À cause des stress environnementaux qu'elles subissent, ces algues quittent parfois leurs hôtes : le squelette blanc de carbonate de calcium du corail n'est alors plus protégé. Des températures élevées seraient responsables de ce « blanchiment », mais l'acidification des océans pourrait avoir des conséquences similaires. Qui plus est, le squelette de carbonate de calcium des coraux et d'autres organismes calcaires se désintégrerait sous l'effet de l'acidification des océans. Pour identifier les formes de vie les plus exposées, une autre leçon de chimie s'impose.

Le carbonate de calcium dans les coraux ou dans les coquilles d'animaux marins se présente sous deux formes minérales : la calcite et l'aragonite (voir *La nacre, de l'huître à l'os*, page 30). Et certains organismes sécrétant de la calcite y ajoutent du magnésium. L'aragonite et la calcite magnésienne sont plus solubles que la calcite. Ainsi, les coraux et les ptéropodes, qui sécrètent un squelette d'aragonite, et les algues corallines, qui fabriquent de la calcite magnésienne, sont particulièrement menacés par l'acidification des océans.

La solubilité du carbonate de calcium dépend de la concentration en ions carbonate de la solution (et donc indirectement du pH), mais elle varie aussi en fonction d'autres paramètres, telles la température et la pression. Dans les conditions normales, la plupart des eaux froides profondes sont suffisamment acides pour dissoudre les coquilles de carbonate de calcium. Ces eaux sont dites sous-saturées. À l'inverse, les eaux chaudes de surface sont sursaturées en calcite et en aragonite : ces minéraux ne s'y dissolvent presque pas. La transition entre la zone de sous-saturation et la zone de sursaturation est la limite de saturation : au-dessous de cette limite, les minéraux se dissolvent.

## Périr ou partir

À cause de la dissolution du gaz carbonique atmosphérique dans les océans, les limites de saturation de l'aragonite et de la calcite se sont rapprochées de la surface de 50 à 200 mètres par rapport à leur profondeur au début du XIX<sup>e</sup> siècle. Ainsi, à mesure que les océans deviendront plus acides, l'épaisseur de la couche d'eau où vivent les coquillages diminuera : une fraction de plus en plus réduite des océans abritera des organismes sécrétant du carbonate de calcium.

On a longtemps pensé que l'acidification des océans aurait peu de répercussions, car les eaux de surface resteraient sursaturées, au moins pour la calcite, la forme la moins soluble du carbonate de calcium. Cependant, à la fin des années 1990, Christopher Langdon, biologiste marin à l'Université de Miami, a montré que les organismes calcaires seraient affectés même dans des eaux sursaturées. Il a modifié les caractéristiques chimiques de l'eau au-dessus d'un récif corallien expérimental, implanté dans un gigantesque réservoir. De façon étonnante, la production de carbonate de calcium par les coraux diminue avec le pH, bien que l'eau reste sursaturée en aragonite. Ulf Riebesell et ses collègues, de l'Institut Alfred Wegener, en Allemagne, ont mis en évidence une diminution similaire de la calcification des coccolithophores planctoniques. D'autres expériences ont confirmé les effets délétères de l'augmentation du dioxyde de carbone (et de la baisse du pH qui en résulte) sur les organismes marins sécrétant des squelettes de carbonate de calcium.



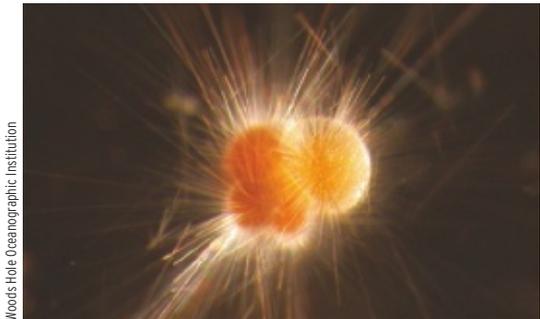
Alexis Rosenfeld, Photo researchers, Inc.

Corail (*Millepora tenella*)



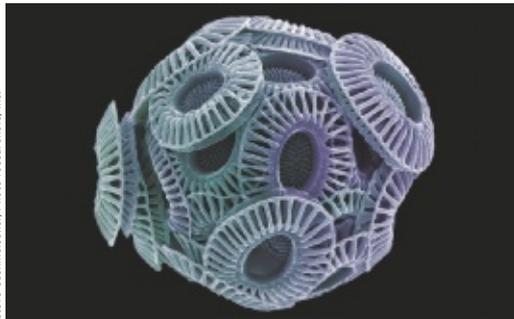
Keeki Stender, Fishpics Hawaii

Algues corallines (*Amphiroa anceps*)



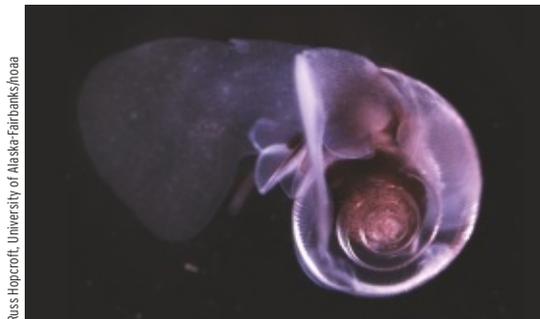
Woods Hole Oceanographic Institution

Foraminifères (*Globigerina bulloides*)



Steve Gschmeissner, Photo researchers, Inc.

Coccolithophores (*Emiliana huxleyi*)



Russ Hopcroft, University of Alaska-Fairbanks/foaa

Ptérotopes (*Limacina helicina*)



©D. Henri

Moules (*Mytilus galloprovincialis*)

LES ORGANISMES MARINS menacés par l'acidification croissante des océans sont nombreux : coraux et algues corallines qui peuplent les récifs coralliens, foraminifères et coccolithophores présents dans les eaux de surface. De petits escargots marins, les ptérotopes, qui vivent dans les eaux froides des pôles, sont aussi en danger.

Comme les eaux froides sont naturellement moins saturées que les eaux chaudes pour les diverses formes de carbonate de calcium, les écosystèmes des hautes latitudes et des eaux profondes souffriront les premiers de l'acidification de l'océan. Les eaux polaires seront probablement sous-saturées en aragonite avant la fin du siècle, et les ptérotopes polaires pourraient disparaître. Ou alors ils migreront vers des latitudes plus basses, où l'eau est plus chaude, en supposant qu'ils s'adaptent à ce nouvel environnement. Or ces petits escargots sont un maillon essentiel de la chaîne alimentaire des océans polaires (qui abritent de grandes populations de poissons, de baleines et d'oiseaux de mer) : leur disparition bouleversera probablement cet équilibre.

Par ailleurs, le zooplancton et le phytoplancton calcaires des hautes latitudes subiront le même sort, mais à plus long terme : ils bénéficieraient de quelques décennies de sursis, car leur coquille est constituée de calcite, la forme la moins soluble du carbonate de calcium. Les coraux des eaux profondes seront également touchés, en particulier ceux de l'Ouest de

l'Atlantique Nord, où l'eau qui circule contient des concentrations élevées en carbone issu de la combustion des énergies fossiles.

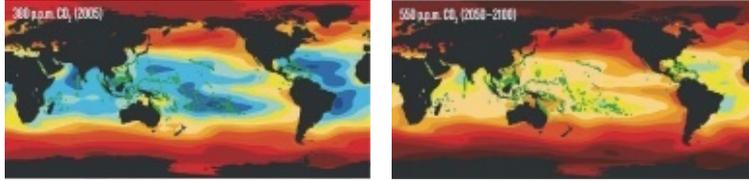
L'avenir est encore plus sombre pour les récifs coralliens. Pour ces écosystèmes, l'acidification des océans n'est qu'un stress environnemental parmi d'autres : ils subissent aussi le réchauffement lié à l'effet de serre, la pollution locale, la pêche et la destruction de leur habitat. De nombreux récifs coralliens sont déjà en déclin, et l'acidification des océans leur porterait le coup fatal.

### Du corail et des moules

Plus encore ces changements agissent en synergie. L'équipe de J.-P. Gattuso a montré que la vulnérabilité des coraux, mais aussi des moules, à l'acidification des océans augmente lorsque ces organismes sont soumis à des températures supérieures à celles auxquelles ils sont habitués. Leur expérience a consisté à plonger des coraux et des coquillages (des patelles et des moules) dans les eaux du golfe de Naples, là où la mer est naturellement acidifiée par l'activité volcanique du Vésuve.

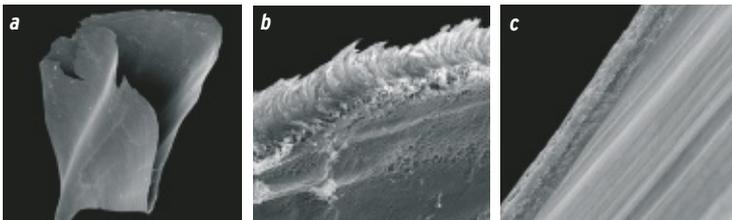
## L'AVENIR INCERTAIN DE L'ARAGONITE

L'acidification des océans aura un impact négatif : certains organismes marins ne construiront plus leur squelette dur, notamment ceux utilisant l'aragonite, la forme de carbonate de calcium la plus soluble. La situation dépendra des régions.



En 2005, seules les eaux de surface des régions polaires étaient sous-saturées (à gauche, en orange et en rouge) en carbonate de calcium, laissant les zones équatoriales et tropicales (en bleu) propices à la minéralisation. En revanche, dans la seconde partie du XXI<sup>e</sup> siècle (à droite), ce phénomène sera ralenti quasiment partout (le bleu a disparu) : les organismes produiront difficilement de l'aragonite. En vert sont indiqués les récifs coralliens.

Les ptéropodes sont un maillon essentiel de la chaîne alimentaire dans l'océan Austral. Pour ces animaux (et ceux qui en dépendent), les modifications de l'acidité des océans seront catastrophiques, comme les images (ci-dessous) le montrent. La coquille d'un ptéropode maintenue pendant 48 heures dans de l'eau sous-saturée en aragonite présente une surface corrodée (a), dont les anomalies sont visibles à fort grossissement (b). La coquille d'un ptéropode dans des eaux sursaturées en aragonite ne présente pas de traces de dissolution (c).



### livre

• J.-P. GATTUSO et L. HANSSON, (Eds), *Ocean acidification*, Oxford University press, 2011.

### articles

• R. RODOLFO-METALPA *et al.*, *Coral and mollusc resistance to ocean acidification adversely affected by warming*, in *Nature Climate Change*, vol. 1, pp. 308-312, 2011.

• J. THOMSEN *et al.*, *Calcifying invertebrates succeed in a naturally CO<sub>2</sub>-rich coastal habitat but are threatened by high levels of future acidification*, in *Biogeosciences*, vol. 7, pp. 3879-3891, 2010.

• J. ORR *et al.*, *Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms*, in *Nature*, vol. 437, pp. 681-686, 2005.

L'examen des minéralisations a révélé que, certes, la fabrication de calcaire par ces organismes reste possible quand le pH est celui attendu à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (7,8). Toutefois, ce scénario ne vaut que lorsque les structures en carbonate de calcium sont protégées par des tissus et des couches organiques. Quand le squelette ou la coquille sont « nus », le minéral se dissout d'autant plus vite que l'acidité est élevée. Or l'efficacité de la protection diminue avec la température : ainsi, le réchauffement des eaux océaniques associé à leur acidification fragilise les organismes calcifiés.

Bien que l'acidification des océans menace de nombreux organismes marins, d'autres en tireront profit. Pour l'instant, seulement une petite fraction du carbone des océans est sous forme dissoute, ce qui limite la croissance de certains types de phytoplancton, lesquels dépensent beaucoup d'énergie pour accumuler le dioxyde de carbone dans leurs cellules : une augmentation du dioxyde de carbone dissous leur serait bénéfique... Cependant, il est impossible de prédire les effets de cette « fertilisation ».

On ignore également si les concentrations supérieures en dioxyde de carbone faciliteront la croissance des algues photosynthétiques vivant dans les massifs coralliens. En outre, des espèces de phytoplancton marin utilisent les ions bicarbonate pour leur photosynthèse, et, puisque la concentration de ces ions changera peu, ces organismes devraient être peu concernés. Certaines plantes marines supérieures utilisent directement le dioxyde de carbone dissous et profiteront probablement de son augmentation, telles les plantes terrestres qui prospèrent avec l'augmentation de ce gaz dans l'atmosphère.

### Une vulnérabilité variable

Des études récentes ont montré que des régions sont plus vulnérables à l'acidification que d'autres. C'est notamment le cas des mers polaires où les eaux froides ne conservent que de faibles concentrations en carbone. Le problème est aggravé aux hautes latitudes, en particulier dans l'Arctique, où le pH diminue à cause des apports en eaux douces, notamment ceux dus à la fonte des glaces. Dans certaines régions côtières, des remontées saisonnières des eaux de subsurface naturellement riches en carbone inorganique favorisent aussi l'acidification. Enfin, le phénomène est également accentué dans des embouchures et des estuaires où l'entrée d'eau douce, l'eutrophisation, l'hypoxie et des dépôts de soufre et d'azote combinent leurs effets.

Pour mieux comprendre la réaction des écosystèmes océaniques à l'acidification, on doit multiplier les études. Depuis juin 2008, le projet européen EPOCA (*European Project on Ocean Acidification*) a été lancé avec pour objectif d'étudier les conséquences biologiques, écologiques, biogéochimiques et sociétales de l'acidification des océans. Le consortium réunit plus de 160 chercheurs de 32 institutions et 10 pays européens.

Les travaux sont orientés selon plusieurs axes. L'un d'eux consiste à reconstituer les changements historiques de la chimie des océans en analysant les foraminifères et les coraux profonds. Il s'agit de déterminer la variabilité passée pour la relier aux observations actuelles.

Ces résultats, associés à l'étude des effets de l'acidification des océans sur les organismes et écosystèmes marins (calcification, photosynthèse, fixation d'azote...), aident à prévoir les changements attendus d'ici la fin du siècle.

Au final, les diverses informations sont synthétisées avec l'idée de déterminer d'éventuels seuils (par exemple une valeur particulière du pH) au-delà desquels certains changements seraient irréversibles. La situation actuelle est d'ores et déjà préoccupante : l'acidification des océans est plus rapide qu'elle ne l'a jamais été par le passé. Un remodelage de l'écosystème marin semble inévitable... ■