Précisions

Un nouveau regard sur le problème global de l'acidification des océans pour ceux qui désirent en savoir un peu plus

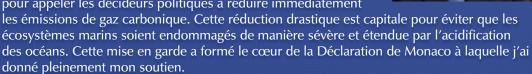
Dans ce guide, quatre objectifs sont poursuivis. Nous répondons à des questions clés que le public se pose à propos de l'acidification des océans. Nous exprimons les certitudes de la communauté scientifique internationale quant à ce qui est en train de se passer dans les océans. Nous discutons de ce que sera l'avenir des océans dans un monde riche en dioxyde de carbone (CO₂), et nous explorons les conséquences de nos actions.

Questions-Réponses est la suite d'un autre guide publié en plusieurs langues qui a connu un franc succès L'acidification des Océans: Les Faits et qui a été lancé au 1er trimestre 2009 lors de la conférence de l'ONU sur les changements climatiques qui s'est tenue à Copenhague. Questions-Réponses est un guide inévitablement plus technique que le précédent puisqu'il met en avant les résultats scientifiques et les raisonnements qui permettent de répondre à des questions fréquemment posées.

En améliorant la compréhension de ces questions cruciales, nous espérons qu'un plus grand nombre de personnes seront non seulement mieux informées sur l'acidification des océans, mais qu'elles agiront aussi avec plus de discernement et d'ambition face à l'urgence de la situation afin de débattre de l'une des questions environnementales des plus importantes pour les générations présentes et futures.

Deux ans depuis la Déclaration de Monaco

Il y a deux ans, j'ai accueilli la réunion de plus de 150 chercheurs en science de la mer provenant de 26 pays organisée par la Commission Océanographique Intergouvernementale, le Comité Scientifique pour la Recherche Océanique, le Gouvernement de Monaco et ma Fondation. Ces scientifiques se sont réunis pour appeler les décideurs politiques à réduire immédiatement



Pendant deux ans, d'importants travaux scientifiques sur l'acidification des océans ont été entrepris par des équipes de chercheurs de par le monde. Parfois les résultats obtenus ont infirmé les hypothèses émises précédemment sur l'acidification des océans, mais la plupart de ce que nous avons appris depuis la Déclaration de Monaco n'a fait qu'augmenter notre inquiétude au sujet de la rapidité et de l'échelle potentielle de l'impact que nos émissions de gaz carbonique auront sur les océans, et par conséquent sur nous.

Je suis heureux que ma Fondation apporte son soutien à la publication: L'acidification des Océans: Questions-Réponses. Une fois de plus le monde de la science s'est réuni, cette fois avec le Groupe Référent des Utilisateurs sur l'Acidification des Océans pour aborder un nouveau problème – celui des incertitudes et des fausses informations sur l'acidification des océans.

Je suis convaincu que grâce à ces clarifications et réponses aux nouvelles questions qui ont été soulevées, ce travail permettra de débloquer les décisions et de passer les barrières qui existent entre nous et les progrès rapides à faire pour s'attaquer à l'acidification des océans.

SAS le Prince Albert II de Monaco



noto © Palais Princier

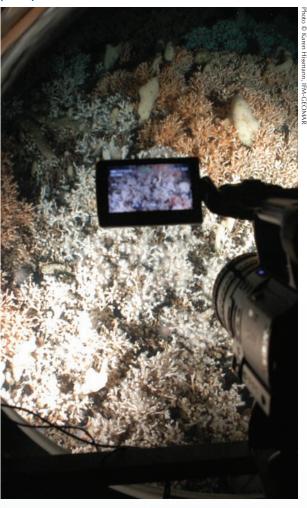
Quel est le problème?

Depuis la fin de la révolution industrielle dans les années 1830, l'importante combustion des énergies fossiles, la déforestation et la production de ciment ont émis plus de 440 milliards de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère (dont la moitié au cours des 30 dernières années). Le relargage de ce carbone qui était auparavant stocké favorise l'effet de serre naturel et met en péril la stabilité du climat futur de la Terre. Heureusement pour nous, plus de la moitié de ce CO₂ additionnel a été réutilisé par les végétaux et par les océans, réduisant largement l'impact des changements climatiques observés jusqu'ici, mais avec d'autres conséquences, particulièrement pour les océans.

'L'autre problème du CO2'

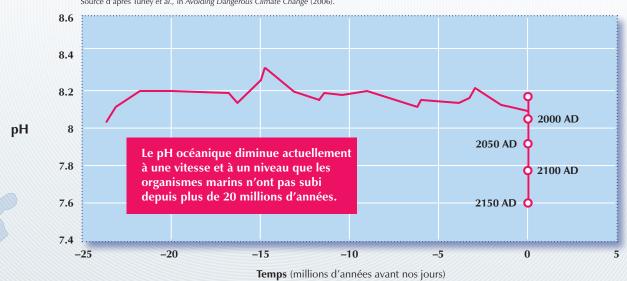
Lorsque le CO₂ additionnel émis dans l'atmosphère se dissous dans l'eau de mer, plusieurs réactions chimiques se produisent. Ces modifications sont connues sous le terme «d'acidification des océans» ou «l'autre problème du CO₂» on encore dans sa traduction littérale de l'anglais «le dangereux jumeau du changement climatique». L'acidification des océans n'a été constatée que récemment mais déjà ses conséquences peuvent être aussi importantes que l'augmentation globale de température résultant du changement climatique. En effet, alors que le changement climatique peut être confus et difficile à suivre, l'acidification des océans est mesurable, prévisible et continue. Des études récentes montrent que l'absorption actuelle du CO₂ par l'océan superficiel - et l'acidification des eaux qui en résulte - est environ 100 fois plus rapide que celle qui a eu lieu à la fin de la dernière ère glaciaire (il y a 20 000 ans), c'est-àdire la dernière fois que le CO2 a augmenté de manière significative.

Communautés de coraux d'eaux froides à 220 m de profondeur prise à partir du sous-marin de recherches JAGO.



Les océans s'acidifient rapidement

Variations du pH océanique au cours des derniers 25 millions d'années.

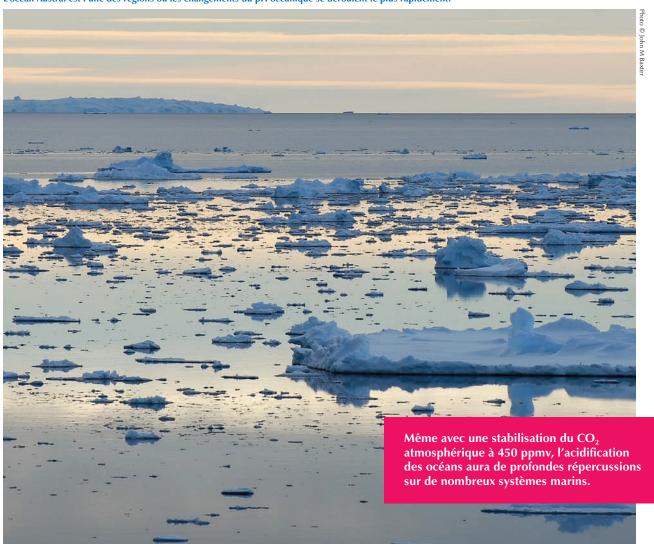


Dissiper les confusions, apporter des éclaircissements

L'acidification des océans est apparue comme une grande question d'actualité au-delà de la communauté scientifique en 2005 avec la publication d'un rapport de la « Royal Society ». Ce problème avait déjà été rapporté dans la littérature dès les années 1970, mais plus régulièrement dans les 10 ans qui ont précédé la sortie du rapport de la « Royal Society ». La majorité des travaux scientifiques ont débuté à travers le monde après 2005 et même s'il reste beaucoup de questions sans réponse, le consensus scientifique est que l'acidification des océans est réelle et constitue une grave menace pour notre mode de vie. L'«Inter-Academy Panel on International Issues Statement on Ocean Acidification » mentionne par exemple que « même si le CO2 atmosphérique est stabilisé à 450 ppmv1, l'acidification des océans aura de profondes répercussions sur de nombreux systèmes marins. Des réductions importantes et rapides d'au moins 50% des émissions mondiales de CO₂ sont nécessaires au niveau mondial d'ici 2050».

L'un des défis pour faire passer le message sur l'acidification des océans, c'est qu'il s'agit d'un domaine de recherche complexe et difficile à comprendre pour les non-spécialistes. Or, ce problème doit être réglé rapidement en développant une ambition commune qui permettra de réduire considérablement nos émissions de CO₂ et diminuer ainsi les changements déjà observés dans l'océan en raison de l'acidification. Pour faciliter ce processus, suite à la conférence de l'ONU sur les changements climatiques qui s'est tenue à Copenhague en 2009, 27 scientifiques éminents de 19 instituts et de cinq pays se sont réunis pour fournir des informations et des réponses à bon nombre de questions qui sont fréquemment posées sur l'acidification des océans². Cette analyse scientifique ainsi que les discussions qu'elle a générée on servi de base à ce nouveau guide.

L'océan Austral est l'une des régions où les changements du pH océanique se déroulent le plus rapidement.



ppmv: partie par million en volume (une partie par million en volume est égale à un volume d'un gaz donné mélangés dans un million de volumes d'air).

^{2.} Activité de l'U.S. Ocean Carbon and Biogeochemistry (OCB; www. us-ocb.org), soutenu par le projet européen EPOCA (European Project on Ocean Acidification; http://www.epoca-project.eu/) et le programme anglais sur l'acidification des océans (http://www.oceanacidification.org. uk). Des scientifiques spécialistes de l'acidification des océans ont compilé les réponses de 39 questions posées fréquemment (foire aux questions ou FAQ) puis soumis à un processus d'évaluation par les pairs.

Grandes études en cours ou à un stade avancé du programme

UNION EUROPEENNE

La Commission Européenne a financé
le projet européen sur l'acidification des océans
(EPOCA), une initiative visant à étudier l'acidification des
océans et ses conséquences dans un cadre multinational (31
institutions partenaires localisées dans 10 pays européens). Les
recherches déjà en cours d'EPOCA visent à observer l'acidification
des océans et ses effets sur les organismes marins et les écosystèmes,
à identifier les risques associés à une acidification continue, ainsi
qu'à comprendre comment ces changements vont affecter la Terre
dans son ensemble. Un nouveau projet «Mediterranean Sea
Acidification under changing climate» (MedSeA) qui va
prochainement commencer, vise spécifiquement
l'acidification de la Méditerranée.

ALLEMAGNE

Impacts biologiques de l'acidification des océans (BIOACID). Ce projet implique 18 institutions de recherches est financé par le Ministère Fédéral de l'Éducation et de la Recherche (BMBF) pour une période initiale de 3 ans qui a débuté en septembre 2009. Ses principaux objectifs concernent les effets de l'acidification des océans sur les organismes marins, du niveau sub-cellulaire au niveau de l'écosystème, leur impact potentiel sur les biens et les services écologiques, ainsi que les rétro-actions biogéochimiques.

CHINE

Le Ministère des Sciences et des Technologies (MOST) et la Fondation Nationale des Sciences (NSFC) ont commencé à soutenir la recherche sur l'acidification des océans. CHOICE-C est un projet financé sur 5 ans pour étudier l'augmentation de CO₂ et l'acidification des océans dans les mers chinoises. Ce projet réunit 7 institutions majeures avec un financement de 34 millions RMB. NSFC a commencé à financer des projets sur l'acidification des océans en 2006, et plusieurs projets nationaux sont en cours qui explorent les effets de l'acidification des océans sur les organismes calcificateurs.

REPUBLIQUE DE COREE (Corée du sud)

La fondation pour l'Ingénierie et les Sciences Coréennes finance un projet de mésocosme sur 5 ans afin d'examiner les effets d'une augmentation de CO₂ et de température sur des assemblages de phytoplancton. Ce projet implique 5 laboratoires coréens.

IAPON

Cinque programmes majeurs relatifs à
l'acidification des océans sont financés par les fonds
consacrés à la recherche. Le Ministère de l'Environnement
japonais prend en charge des programmes de recherches pour
clarifier les impacts futurs de l'acidification des océans sur divers
organismes marins en utilisant des installations sophistiquées de
mésocosmes (ex: AlCAL, Acidification Impact on CALcifiers). MEXT
(Le Ministère de l'Education, des Sciences, du Sport et de la Culture)
et JAMSTEC (Agence japonaise pour les Sciences Marines et les
Technologies) prennent également en charge des recherches sur
l'acidification des océans tels que les modélisations sur le
super-ordinateur Earth Simulator pour prédire les
conditions océaniques futures.

ROYAUME-UNI

Royaume-Uni : entre 2004-2007 une étude financée par le Gouvernement (Defra et DTI) a été conduite sur les conséquences du CO_2 sur le milieu marin (IM CO_2), Au printemps 2009, le Royaume uni a annoncé un financement d'un programme de 12 millions de livres sur 5 ans pour étudier les changements des écosystèmes océaniques en réponse à une acidification des océans (les coûts ont été partagés entre le Conseil de la Recherche sur l'Environnement Naturel, le Département pour l'Environnement, la Nourriture et les affaires rurales (Defra) et le Département pour l'Énergie et le changement climatique (DECC)). Ce programme implique 21 institutions de recherche ainsi qu'une collaboration avec les programmes EPOCA et BIOACID.

ETATS-UNIS

The Federal Ocean Acidification Research and Monitoring Act 2009. La loi FOARAM a été signée par le Président Obama en mars 2009. Conformément à la loi, la National Oceanic and Atmospheric Administration, la National Science Foundation, et d'autres agences fédérales collaborent avec le groupe de travail de l'ORRAP (Ocean Research and Resources Advisory Panel) Task Force on Ocean Acidification afin de développer un programme national sur l'acidification des océans. Dès cette année, un groupe de travail sur l'acidification des océans qui regroupe plusieurs agences de financement a mis au point un plan national visant à surveiller l'acidification des océans, conduire des recherches, évaluer les conséquences et à mettre en œuvre des stratégies de conservation. Ce plan sera soumis au Congrès des États-Unis en mars 2011. Plusieurs organismes ont déjà commencé à financer certaines des activités de recherches, de surveillance et de sensibilisation énoncées dans la loi FOARAM.

AUSTRALIE

Les études sur l'acidification des océans mettent l'accent sur l'Antarctique et les régions d'Australasie. L'Antarctic Climate & Ecosystems Cooperative Research Centre (un partenariat regroupant AAD, Université de Tasmanie, CSIRO, DCCEE, NIWA Nouvelle-Zélande et AWI Allemagne) subventionne des recherches dans l'océan Austral incluant la surveillance des changements de la chimie de l'eau de mer ainsi que l'étude des réponses d'espèces clés. Sous les tropiques, un programme commun d'observation et de modélisation entre CSIRO, NOAA (USA), NIES (Japon) et l'Université du Queensland a débuté sur la Grande Barrière de Corail et le l'océan Pacifique sud. La vulnérabilité de la Grande Barrière de Corail à l'acidification des océans est également abordée par l'Institut Australien des Sciences de la Mer ainsi que plusieurs universités (Université Nationale Australienne, Université du Queensland, Université de Sydney et Université James Cook) au travers d'une surveillance à grande échelle des eaux récifales, des reconstructions paléontologiques à partir de carottes de corail, et d'expériences sur le terrain et en laboratoire sur les organismes récifaux.

Mise au point des connaissances

Deux questions essentielles se posent aux nombreuses personnes s'intéressant pour la première fois à l'acidification des océans: qu'est-ce que c'est et est-ce bien réel?

Ces questions montrent un véritable manque de connaissance de l'océan, une confusion avec la question de savoir si le changement climatique est réel, et la surprise de l'apparition d'un autre problème important en plus de celui du changement climatique dont public a abondamment entendu parlé.

La plupart des gens réagissent avec une vision sur l'acidification des océans qui ne peut pas être aussi concrète que celle du changement climatique et qui ne peut en être dissociée. Donc ils l'associent aux changements climatiques et à ses péripéties véhiculées par la presse. Les citoyens ne peuvent se soucier que d'une liste limitée de questions, et comme ce problème leur semble lointain, ils ont tendance à ne pas s'en soucier. Ils ne savent pas que si le degré de confiance que l'on a sur certains aspects du changement climatique est difficile à quantifier, il y a beaucoup moins d'incertitude sur ce qu'est l'acidification des océans et si elle a lieu.

Qu'est-ce que l'acidification des océans?

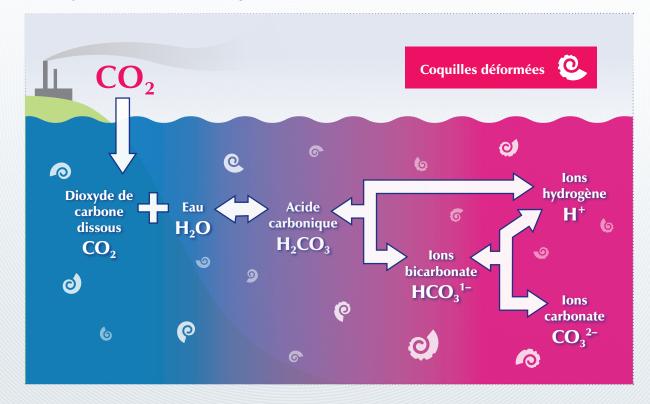
L'évolution de l'océan vers un état plus acide (ou moins basique) se produit en raison de la quantité croissante de CO_2 dans l'atmosphère. Ce processus est appelé acidification des océans car lorsque le CO_2 réagit avec l'eau de mer, il produit un acide. Plus l'augmentation de CO_2 dans l'atmosphère est rapide, plus l'acidification des océans est rapide.

Comprendre les termes 'carbonate' et 'acidité'

L'acidification des océans est très différente du changement climatique. Le changement climatique regroupe un grand nombre de modifications engendrées par les activités humaines dont la fréquence, l'ampleur et les effets s'étendent de la quasi-certitude à une grande incertitude. L'acidification des océans est un effet du dioxyde de carbone sur l'océan puisque ce qu'il résulte de son absorption par l'eau de mer. Le terme « acidification des océans » regroupe plusieurs processus qui se déroulent quand le CO₂ réagit avec l'eau de mer. Deux réactions sont particulièrement importantes. La première est la formation d'acide carbonique avec libération d'ions hydrogène:

$$CO_2$$
 + H_2O \longleftrightarrow H_2CO_3 \longleftrightarrow H^+ + HCO_3^- (dioxyde de carbone) (eau) (acide carbonique) (ion hydrogène) (ion bicarbonate)

La combustion des énergies fossiles conduit à une augmentation du CO₂ atmosphérique qui sera partiellement absorbé par les océans dont l'acidité augmente. Source University of Maryland.



L'échelle du pH

L'échelle du pH est une mesure de l'acidité ou de la basicité

La li don entr proc

(alcalinité) d'une solution. Elle a été établie en 1909 et c'est un indice logarithmique de la concentration en ions hydrogène dans une solution aqueuse. L'échelle est "inversée" : le pH diminue lorsque la concentration en ions hydrogène augmente. L'eau pure à un pH de 7. Les liquides dont le pH est inférieur à 7 sont acides tandis que ceux dont le pH est Supérieur à 7 sont basiques. Un liquide ayant un pH de 4 est dix fois plus acide qu'un liquide ayant un pH de 5 et cent fois plus acide qu'un liquide d'un pH de 6. L'eau de mer a un pH d'environ 8,1 ; elle est est donc considéré comme une base faible. Alors que la gamme de pH est généralement donnée de 0 à 14, des valeurs inférieures et supérieures sont théoriquement possibles.	3	Bière, vinaigre
	4	Vin, tomates
	5	Café noir
	6	Urine, lait
	7	Eau pure, sang
	8	Eau de mer
	9	Bicarbonate de soude
	10	Lait de magnésie
libération d'ions hydrogène augmentent l'acidité et nc réduit le pH (voir encadré). La seconde réaction, re les ions carbonates, le dioxyde de carbone et l'eau oduit également des ions bicarbonates:	11	Ammoniaque
	12	Eau de javel
	13	Nettoyant pour fours
	14	Hydroxyde de sodium

 CO_2^2 H₂O 2HCO₂ CO_{2} (dioxyde de carbone) (ions bicarbonate) (eau) (ions carbonate)

L'effet combiné de ces deux réactions est non seulement d'augmenter l'acidité mais aussi de réduire la disponibilité en ions carbonates. Or, ces ions sont nécessaires pour la calcification, c'est à dire pour la fabrication de coquilles et de squelettes calcaires. Une réduction de l'abondance des ions carbonates a un effet important puisqu'elle peut affecter la vitesse à laquelle les organismes marins – tels que les coraux, mollusques, crustacés, oursins et certaines algues – élaborent leur coquille ou leur squelette. Dans des conditions de faible pH (et donc d'acidité élevée), les ions carbonates sont moins disponibles, la calcification est donc plus difficile à réaliser et peut même être totalement inhibée. Cet impact de l'acidification des océans pourrait donc avoir des conséquences catastrophiques pour la vie dans les océans, y compris pour des espèces d'intérêt économique.

Le concept de «l'acidification»

Le pH actuel de l'océan est supérieur à 7 donc basique. Chimiquement il est pratiquement impossible qu'il devienne réellement acide. Alors pourquoi faisons nous référence à l'acidification des océans ? C'est parce que le terme d'acidification fait référence à une tendance, quel que soit le point de départ. Le même terme est utilisé ailleurs, par exemple dans la fabrication du vin, la chimie du sang, la science des sols, pour faire référence à une augmentation de l'acidité, indépendamment des conditions initiales acides ou basiques. Une comparaison directe peut-être faite avec les termes que nous utilisons afin de décrire les changements de température : une augmentation de température de 0 °C à 5 °C est appelée « réchauffement » même si ces valeurs restent encore froides pour la majorité d'entre nous.

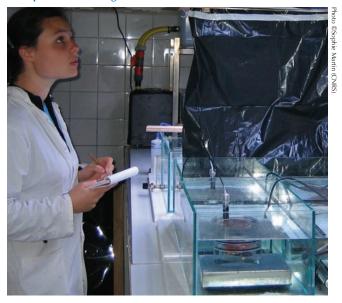
Différents facteurs peuvent influencer localement les réactions chimiques du CO2 avec l'eau de mer et s'ajouter aux effets de l'acidification des océans.

Expériences testant l'effet de l'acidification des océans et l'augmentation de la température sur des algues calcaires

Acide pour batteries

Acide chlorhydrique

Jus de citron



Par exemple les pluies acides qui se composent d'acide sulfurique et d'acide nitrique et ont comme origine la combustion d'énergie fossile, peuvent affecter l'océan côtier. Leur impact sur la chimie de l'océan de surface peut être important au niveau local ou régional car leur pH est compris entre 1 et 6. Leur impact est cependant très faible au niveau global. Les eaux côtières sont également touchées par l'excès d'éléments nutritifs, principalement l'azote, provenant de l'agriculture, des engrais et des eaux usées. L'eutrophisation qui en résulte conduit à d'importants efflorescence d'algues planctoniques. À la fin de l'efflorescence, ces algues ainsi que le zooplancton meurent, sédimentent vers le fonds, puis sont décomposés par des bactéries ce qui entraîne une diminution de l'oxygène et une augmentation du CO₂ (donc une diminution du pH).

Comment être sûrs que l'acidification des océans a réellement lieu?

Un très fort degré de certitude

Il ne fait aucun doute que la chimie de l'eau de mer est modifiée par l'augmentation de ${\rm CO_2}$ dans l'atmosphère et que les activités anthropiques sont à l'origine de cette augmentation.

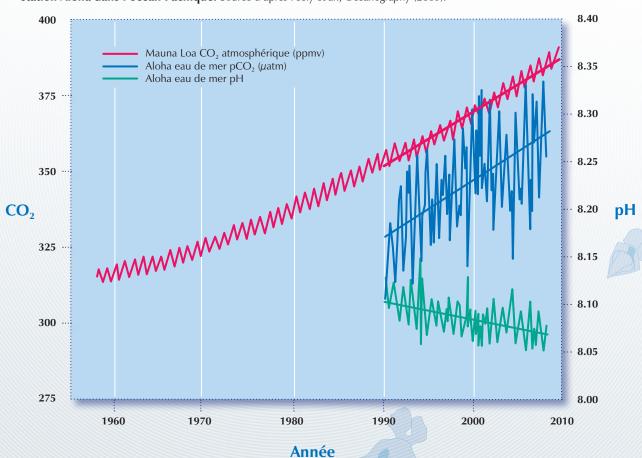
La meilleure preuve est fournie par des mesures réalisées dans différentes régions du monde, comme par exemple la série à long terme (20 ans) du Pacifique (Hawaii) comme indiqué ci-dessous. Bien qu'il y ait une forte variabilité saisonnière, le CO₂ dissous augmente de façon très nette dans les couches supérieures de l'océan alors que le pH diminue. Ces tendances correspondent parfaitement à l'évolution du CO₂ atmosphérique. La diminution de pH observée depuis l'ère préindustrielle est d'environ 0,1 unité. Cette diminution peut paraître faible mais, du fait que l'échelle de pH est logarithmique, elle représente une augmentation de 30 % des ions hydrogène (et donc d'acidité).

Les modèles informatiques incluant de façon explicite le CO_2 d'origine humaine reproduisent parfaitement la diminution du pH de l'eau de mer et de la concentration en carbonates qui sont mesurées (voir figure ci-dessus). Aucune autre cause peut expliquer ces résultats.



Bouée de la NOAA utilisée pour mesurer les flux de CO₂ dans l'océan Pacifique.

Enregistrements du CO₂ atmosphérique à Mauna Loa ainsi que du pH de surface et de la pCO₂ à la station Aloha dans l'océan Pacifique. Source d'après Feely et al., Oceanography (2009).



Différents océans, différentes situations

L'acidification des océans est un phénomène global mais elle sera plus rapide dans certaines régions que dans d'autres. Les impacts vont également varier en raison des différences de température et de la circulation océanique. La quantité de carbonates présents dans l'eau de mer est actuellement assez élevée pour permettre aux structures de carbonate de calcium (comme les coquilles et les squelettes) de rester intactes. On dit que l'eau de mer est en état de «sur-saturation». Cette quantité peut chuter à des niveaux qui se traduiront par la dissolution de ces structures (conditions de «sous-saturation»). Les projections basées sur les modèles montrent que l'océan Arctique sera le premier à franchir le seuil d'un stade « sur-saturé » par rapport au carbonate de calcium à un stade « sous-saturé ».

Si le CO₂ atmosphérique (et océanique) continue d'augmenter au rythme actuel, environ 10 % de l'océan Arctique aura franchit ce seuil de saturation en 2018 et environ la moitié en 2050. Il est probable qu'en 2100 l'ensemble de l'océan Arctique sera à un stade tel que les structures en carbonate de calcium qui ne sont pas protégées seront dissoutes.

Il est certain que la chimie de l'eau de mer est modifiée par l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère et que les activités humaines en sont à l'origine.

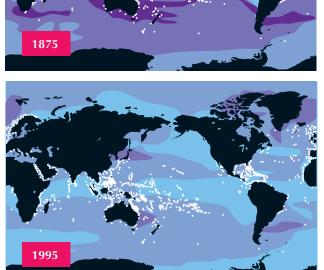


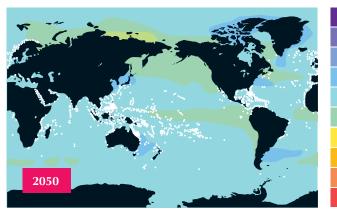
Personnel du projet EPOCA travaillant sur un mésocosme lors d'une expérience de perturbation en CO₂ dans l'extrême Arctique, au large de Svalbard.

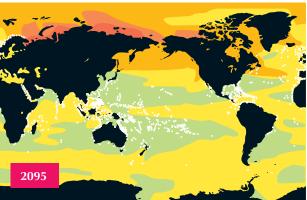


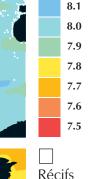
Les expériences en mésocosme sont très importantes pour comprendre les implications de l'acidification des océans sur les communautés et des écosystèmes.

Le modèle CCSM3 du Centre national pour la recherche atmosphérique a permis d'estimer le pH moyen de surface pour les années 1875, 1995, 2050 et 2095. Source d'après Feely et al., Oceanography (2009).









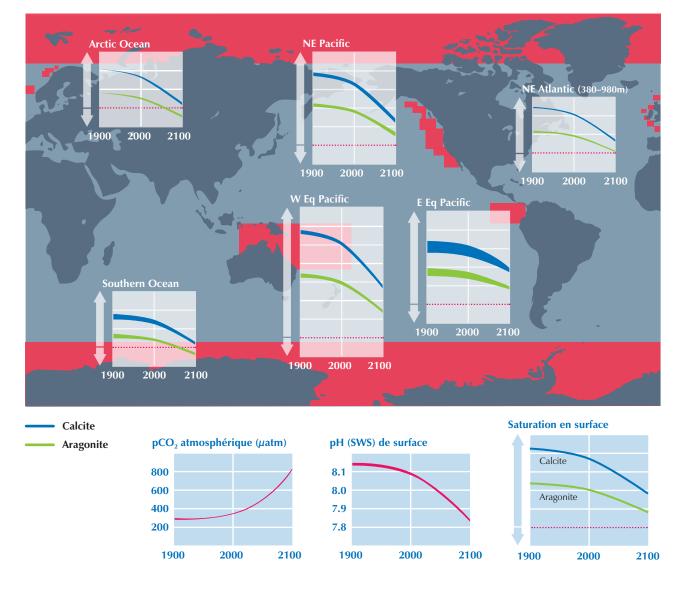
Coralliens

рΗ

8.48.38.2

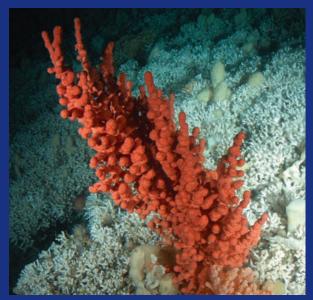


Changements passés et futurs de la chimie des océans en utilisant un scénario d'émissions «business as usual». Les cartes montrent les horizons de saturation en carbonate de calcium pour 6 régions (en rouge) – les valeurs situées au-dessus et au-dessous de la ligne en pointillés rouge représentent respectivement les conditions de sur-saturation et de sous-saturation pour la calcite et l'aragonite. L'épaisseur des lignes indique la variation saisonnière. Les moyennes globales de la surface des océans, du CO₂ atmosphérique, du pH, et de la saturation en calcite et en aragonite, sont indiquées en bas à droite. Source d'après Turley et al., Marine Pollution Bulletin (2010).



Les horizons de saturation

Les eaux océaniques profondes et froides sont naturellement sous-saturées en ions carbonates ce qui provoque la dissolution des coquilles de la plupart des organismes calcificateurs. Les eaux de surface sont sur-saturées en ions carbonates et ne dissolvent donc pas facilement les coquilles. L'horizon de saturation est la profondeur en dessous de laquelle le carbonate de calcium commence à se dissoudre. Les organismes calcificateurs qui survivent en dessous de cet horizon peuvent le faire grâce à des mécanismes spécifiques qui protègent leur carbonate de calcium de la dissolution. Puisque l'acidification des océans provoque une remontée de cet horizon dans la colonne d'eau, de plus en plus d'organismes calcificateurs seront exposés à des eaux soussaturées et donc seront vulnérables à la dissolution de leur coquille et de leur squelette. L'horizon de saturation de la calcite se trouve à une profondeur plus grande que celle de l'aragonite mais, depuis 1800, les deux horizons se sont déplacés de 50 à 200 m verticalement vers la surface.



Les coraux scléractiniares tels que *Lophelia pertusa* (corail blanc) construisent leur squelette en aragonite et sont particulièrement vulnérables à une remontée de l'horizon de saturation. Les gorgonaires (corail rouge) construisent leur squelette en calcite.

L'acidification des océans et le devenir à court et à long terme du carbone

Sur le long terme (plus de 100000 ans), il y a un équilibre naturel entre l'absorption et la libération de CO₂ sur la Terre. Le CO₂ produit par les volcans, qui est la principale source naturelle de CO₂, est absorbé par les plantes pour former de la matière organique ainsi que par l'érosion des roches terrestres. Toutefois l'érosion nécessite des dizaines de milliers d'années, ce qui ne permet pas de piéger assez rapidement le CO₂ anthropique présent dans l'atmosphère et les océans. Sur le court terme (environ 1000 ans), l'océan possède une boucle de rétroaction (la compensation des carbonates) qui lie le cycle du carbone océanique aux couches sédimentaires superficielles riches en carbonate de calcium.

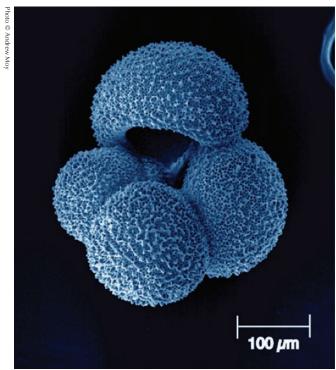
Il y a peu de dissolution dans les couches superficielles de l'océan car elles ont tendance à être sur-saturées en CaCO₃. En revanche, l'océan profond est sous-saturé et les carbonates sont facilement dissous. La lysocline est la profondeur à laquelle la dissolution augmente fortement dans l'océan profond. Le CaCO₃ des coquilles mortes coule au fond de la mer. À faible profondeur la majorité du CaCO₃ est piégée dans les sédiments pendant de longues périodes. Mais si les coquilles coulent dans des eaux profondes, pratiquement tout le CaCO₃ est dissous empêchant de ce fait le stockage de carbone pour des millions d'années.



Les sédiments des fonds marins peuvent agir comme un puits pour le carbonate de calcium.

L'augmentation actuelle de la dissolution du CO₂ atmosphérique dans l'océan résulte d'un déséquilibre au niveau de la profondeur de compensation des carbonates la profondeur à laquelle tous les carbonates sont dissous. La chute du pH océanique entraine une diminution de la profondeur de la lysocline et de la CCD, exposant ainsi davantage les coquilles piégées dans les sédiments à des conditions de sous-saturation provoquant ainsi leur dissolution, ce qui aidera à amortir l'acidification des océans, mais sur une échelle de plusieurs milliers d'années.

Le foraminifère planctonique subantarctique *Globigerina bulloides* récupéré dans des pièges à particules a un test en calcite.



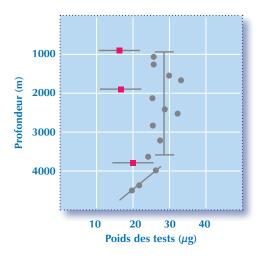
Moins de plancton aux hautes latitudes?

Une sous-saturation en aragonite (i.e. l'état chimique où favorisant la dissolution du calcaire) est prévue entre 2030 et 2070 dans l'océan Austral. Des expériences en laboratoire ainsi que des observations directes suggèrent que la diminution des concentrations en carbonate qui a déjà eu lieu rend de plus en plus difficile la fabrication et/ou le maintien de la coquille de nombreux organismes. Des échantillons provenant de l'océan Austral suggèrent que les coquilles de foraminifères planctoniques actuels sont déjà 30 à 35 % plus légères que la coquille de leurs homologues pré-industriels. Avec l'augmentation des émissions de CO_2 une des causes d'inquiétude est la perte

Un ptéropode vivant *Limacina helicina antarctica* collecté à bord du navire de recherches Umitaka Maru pendant l'expédition Collaborative East Antarctic Marine Census (CEAMARC), lors de l'année polaire internationale (International Polar Year, IPY en anglais).

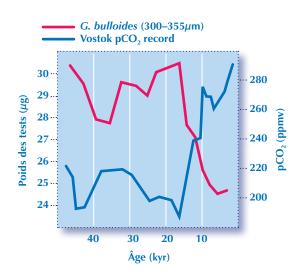


de poids observée chez les coquilles de foraminifères comme *Globigerina bulloides* et chez d'autres espèces planctoniques des eaux polaires, comme les ptéropodes (dont les coquilles sont fabriquées à partir d'aragonite, forme la plus soluble du carbonate de calcium). Les Ptéropodes jouent un rôle important dans la chaine alimentaire en Antarctique, en servant d'alimentation à de nombreux organismes, dont des poissons; ils participent tout les deux à la création d'un emmagasinage à long terme du carbone atmosphérique dans l'océan profond à leur mort grâce à leur coquille qui fonctionne comme un ballast en emportant le carbone organique des animaux morts sur le fond de l'océan.



Les poids moyens des tests de *Globigerina bulloides* (taille de 300 à 355 μ m) collectés à différentes profondeurs au dessus de l'horizon de saturation de la calcite (carrés rouges) sont inférieurs à ceux collectés dans les carottes sédimentaires de l'ère pré-industrielle (cercles gris).

Source d'après Moy et al., Nature Geoscience (2009).



Le poids des tests de *Globigerina bulloides* étaient supérieurs lorsque les niveaux de CO₂ atmosphérique étaient plus bas (il y a environ 18000 ans) qu'aujourd'hui.

Source d'après Moy et al., Nature Geoscience (2009).

Côte ouest de l'Amérique où les renontées d'eaux profondes sous-saturées ont déjà un impact.



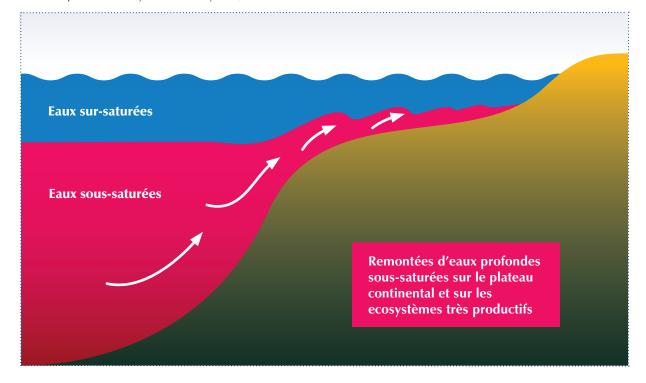
Les problèmes des océans qui surgissent

Les régions côtières sont régulièrement soumises à des phénomènes d' «upwelling»: remontée des eaux profondes vers les plateaux continentaux et les zones proches du rivage. Cela expose des écosystèmes peu profonds et en général productifs à des eaux plus froides contenant plus de nutriments mais aussi plus de CO₂.

Comme l'acidification des océans provoque, année après année, une contraction de la couche superficielle d'eau

de mer sur-saturée, les évènements naturels d'upwelling entraineront plus souvent la remontée d'eaux sous-saturées près des côtes. Les organismes marins côtiers élaborant des coquilles ne sont pas habitués à de telles situations. Leur exposition plus fréquente à ces conditions peuvent donc affecter ces communautés. Des remontées d'eaux sous-saturées ont dores et déjà lieu sur la côte ouest de l'Amérique du Nord, et pourraient commencer à se produire ailleurs, là où les conditions océaniques sont favorables.

Une invasion saisonnière d'eaux sous-saturées comme c'est déjà le cas sur la côte ouest d'Amérique du nord pourrait avoir de graves répercussions sur les activités de la pêche telle que l'industrie ostréicole. Source d'après Carol Turley based on Feely et al., Science (2008).



Tirer des leçons du passé

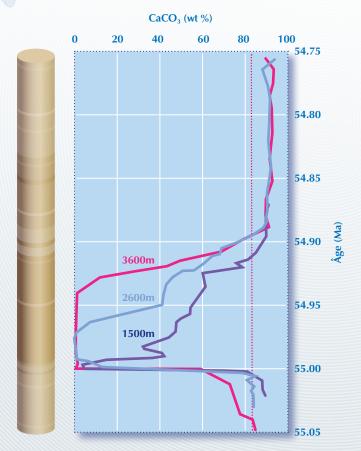
La chimie des océans n'a pas toujours été constante et il y a eu des périodes dans le passé où l'océan a été acidifié. Que pouvons-nous donc apprendre de ces événements précédents d'acidification, et peut-on les utiliser pour nous aider à prédire la sévérité des impacts futurs de l'épisode actuel d'acidification?

Que nous apprennent les évènements passés d'acidification des océans?

Dans l'histoire récente de la Terre l'équilibre acidobasique de l'océan a été relativement stable. Les preuves d'un tel équilibre proviennent à la fois de notre capacité à estimer indirectement le pH de l'océan à partir des bulles d'air piégées dans la glace, et à la possibilité d'examiner les conditions passées à l'aide des enregistrements conservés dans les glaciers et les sédiments.

Les carottes sédimentaires prélevées dans l'océan Atlantique sud à plusieurs paléo-profondeurs que, durant le PETM, l'horizon de saturation de la calcite est remonté d'environ 2 km en seulement quelques milliers d'années, puis a mis environ 100000 ans pour retrouver son niveau de la période précédente. Cet événement a pu contribuer à l'extinction de masse des foraminifères benthiques à cette époque.

Source d'après Zachos et al., Science (2005).



Les bulles d'air piégées dans les glaciers fournissent un enregistrement précieux des conditions atmosphériques passées.



L'histoire des glaces

Les bulles d'air piégées dans les calottes glaciaires fournissent un enregistrement des niveaux du CO₂ atmosphérique passés à partir duquel le pH des océans peut être calculé. De longues carottes extraites des glaces peuvent être lues un peu comme les cernes des arbres : les couches superficielles reflètent les conditions récentes tandis que les couches plus profondes ont été formées il y a plus longtemps. Ces enregistrements montrent qu'au cours des 800000 dernières années et jusqu'au milieu des années 1800, les niveaux de CO₂ dans l'atmosphère n'ont jamais dépassés 280 ppmv, ce qui correspond à un pH de l'eau de mer de 8,2. Les concentrations atmosphériques actuelles de CO₂ sont d'environ 390 ppmv, soit un pH de l'eau de surface de 8,1.

Des similitudes lointaines

Il y a eu dans le passé de longues périodes et des changements brutaux durant lesquels le pH océanique était inférieur à sa valeur actuelle. Que peuvent nous apprendre ces événements passés de la situation présente ? L'événement le plus fréquemment examiné remonte à 55 millions d'années lors de l'ère Cénozoïque. C'est le maximum thermique du passage Paléocène-Eocène (PETM), événement de grande ampleur de l'histoire de la Terre au cours duquel la température a augmenté d'environ 6°C en moins de 10000 ans et le niveau des mers a remonté du fait du réchauffement. Les concentrations atmosphériques de CO2 ont augmenté, provoquant une forte contraction de la couche d'eau sur-saturée en carbonate de calcium. Cet événement était peut-être lié à un ajout important de carbone dans le système en raison d'un réchauffement des océans? Ce carbone a été oxydé dans l'eau de mer pour former du CO2 relâché ensuite dans l'atmosphère.

Cette période peut nous aider à comprendre ce que l'avenir nous réserve. Bien que de nombreux organismes calcificateurs benthiques des eaux profondes se sont éteints, certains prétendent que parce que les espèces marines de surface ont survécu aux conditions d'il y a 55 millions d'années, elles devraient très bien survivre à l'événement actuel d'acidification. Le danger de cette

affirmation est qu'elle ignore une différence fondamentale entre le maximum thermique du Paleocène-Eocène et la situation actuelle: ces deux évènements d'acidification se sont produits sur des échelles de temps très différentes. L'évènement actuel se produit en quelques siècles, tandis que celui du PETM s'est produit sur une période de plus de 10000 ans.

Les différences

La raison pour laquelle la situation actuelle diffère autant de la précédente est largement due à la rapidité du changement du CO₂ atmosphérique par rapport à la lenteur des processus géologiques qui l'éliminent. La différence importante est que lors de tous les évènements d'acidification des derniers 65 millions d'années le CO₂ provenant de l'activité volcanique a été libéré lentement sur des milliers d'années, et dans certains cas sur des centaines de milliers d'années. L'océan avait alors le temps de s'homogénéiser totalement sur des échelles millénaires par la circulation des eaux de surface vers l'océan profond et la remontée de l'eau profonde en surface. Les sédiments carbonatés du plancher océanique exposé à des eaux sous-saturées ont commencé à se dissoudre et ont ainsi libéré des ions carbonates qui ont tamponné la diminution d'acidité. Il y a plusieurs millions d'années, les concentrations en calcium et en magnésium de l'océan étaient beaucoup plus élevées que les concentrations actuelles, ce qui a contribué à stabiliser le carbonate de calcium dans le squelette des animaux marins, qui pouvaient ainsi tolérer des conditions d'acidité plus élevées qu'aujourd'hui.

Le CO_2 atmosphérique augmente aujourd'hui beaucoup trop rapidement par rapport à la vitesse du mélange de l'océan, rompant ainsi l'équilibre des périodes passées. Le résultat est que l'essentiel des émissions de CO_2 s'accumule dans la couche superficielle de l'océan. Environ 50 % de tout le CO_2 que nous avons émis réside dans les 10 % supérieurs de l'océan. La capacité des sédiments à réguler la chimie des océans et à neutraliser l'acidité est tout simplement trop lente - plus de 1000 ans - le pH océanique et la quantité d'ions carbonates sont donc en train de diminuer.

Le passé peut-il être un guide pour le futur?

Il est possible de comparer ce qui ce passe à l'heure actuelle avec ce qui s'est passé il y a plusieurs millions d'années lorsque les océans avaient une acidité plus élevée. Aujourd'hui l'acidification se produit à une vitesse et une ampleur jamais recontrée dans les enregistrements fossiles des 65 derniers millions d'années. Par exemple, on estime que l'acidification des océans actuelle est 10 fois plus rapide que durant l'épisode d'acidification qui a précédé l'extinction du maximum thermique du Palaeocène-Eocène il y a 55 millions d'années et qui est l'épisode le plus important depuis l'extinction des dinosaures. La composition des carottes sédimentaires prélevées dans le sud est de l'océan Atlantique a subi un changement radical en raison de la dissolution des organismes carbonatés ne laissant en place que des argiles rouges. C'est le résultat de l'augmentation de l'acidité qui a conduit à l'extinction beaucoup d'espèces constituées de carbonate de calcium vivants dans les profondeurs de l'océan. Les carottes du plancher océanique montrent qu'il a fallu plus d'une centaine de milliers d'années pour que l'océan s'en remette.

Dix fois plus rapide

Tout au long de l'histoire de la Terre, la vie des océans a repris après de nombreux épisodes d'extinction par l'adaptation et évolution de nouvelles espèces. Mais les échelles de temps de extinction et de la repopulation sont de l'ordre du million d'années, et non pas de quelques centaines d'années. L'acidification des océans provoquée par les activités humaines affecte l'océan beaucoup trop vite pour par rapport au cycle de régénération de la Terre. De nos jours, la vitesse d'acidification est 10 fois plus rapide que tous les autres évènements qui ont eu lieu depuis la disparition des dinosaures il y a 65 millions d'années.

Les récifs coralliens dans des endroits tels que les Seychelles présentent une étonnante biodiversité, et pourraient être sérieusement affectés d'ici 2050 si le rythme actuel de l'acidification des océans continue.



Pouvons-nous prédire l'ampleur de l'acidification à venir?

La concentration de CO_2 atmosphérique, actuellement de 391 ppmv, va inévitablement augmenter et continuer à provoquer la diminution du pH de l'eau de mer de surface. Toutefois la vitesse et l'ampleur de l'augmentation future est difficile à prévoir car elle dépend de la réduction de nos émission en CO_2 . Si l'augmentation du CO_2 atmosphérique se poursuit de façon continue, il est possible que sa concentration atteigne 800 ppmv à la fin du 21ème siècle et que le pH de l'océan diminue de 0.3 à 0.4 unité, soit une augmentation d'acidité de 150 à 200%.

Il y a cependant moins de certitudes en ce qui concerne les effets biologiques potentiels de l'acidification des océans car nous n'avons pas de recul face à de tels changements. Par ailleurs, les différents groupes d'organismes marins semblent être plus ou moins sensibles aux changements de la chimie de l'eau de mer.



Chez de nombreux organismes marins, les gamètes, stades larvaires, juvéniles et les adultes peuvent être affectés de manière différente par l'acidification des océans. Il est donc important de considérer les impacts sur leur cycle de vie, leur survie et la reproduction. De manière générale, les études suggèrent que les stades précoces (gamètes, larves et juvéniles) sont plus sensibles à l'acidification des océans. Le stress limite généralement la performance des organismes - par exemple, les organismes stressés sont plus petits et se développent plus lentement, les prédateurs seront moins efficaces et les proies pourraient être moins aptes à



Collecte de ptéropodes au chalut pélagique dans l'Antarctique.

éviter leur capture. En ce qui concerne les adultes, le stress occasionné par l'acidification des océans semble affecter leurs performances et pourrait finalement réduire leur croissance et leur reproduction. Même si certains individus peuvent survivre, la diminution de leur capacité de reproduction réduira le nombre de descendants de sorte que les populations seront également affectées.

Parmi les espèces menacées par l'acidification des océans, il y a les coraux tropicaux et profonds, le plancton calcaire et les ptéropodes nageurs qui auront des difficultés à construire et maintenir leur squelette ou leur coquille avec le changement de condition. Ces espèces jouent un rôle clé dans les océans, d'une part parce qu'elles participent à la construction de structures

Les coraux – des questions complexes

À l'intérieur de ses cellules, le corail abrite de minuscules algues unicellulaires, appelées zooxanthelles, qui sont une source importante de carbone pour le corail et pour la calcification (construction du squelette) grâce à leur photosynthèse. La relation algue/corail est un équilibre fragile et si les algues prolifèrent le transfert de carbone vers l'hôte peut-être perturbé. Donc, une stimulation de la photosynthèse des algues unicellulaires lorsque le CO₂ est élevé ce ne serait pas nécessairement une bonne chose pour l'animal hôte. Cependant, même si des études ont montré que la photosynthèse de certaines espèces de végétaux est stimulée par des concentrations de CO₂ prévues pour la fin du siècle (environ 700 à 800 ppmv), il n'a jamais été montré que la photosynthèse des zooxanthelles augmenterait à ces valeurs de CO₂. Des expériences ont montré que la calcification de la plupart des coraux diminue lorsque la concentration de CO₂ augmente. Il est donc clair que l'augmentation de CO2 réduit actuellement la capacité des coraux à élaborer leur squelette et donc leur capacité à résister aux tempêtes. Cela signifie que la croissance des récifs sera à terme moindre que leur érosion naturelle, ce qui entrainera leur déclin.



Les récifs coralliens sont des écosystèmes essentiels mais fragiles et extrêmement sensibles à l'acidification des océans.

Photo © Dan Laffoley

L'histoire du homard

Une étude expérimentale a montrée que le poids de l'exosquelette de plusieurs crustacés, dont le homard, élevés pendant 60 jours augmente avec l'augmentation de CO₂, tandis qu'une autre étude démontrait que la croissance de l'exosquelette des larves de homard diminuait. Cela met en relief la nécessité d'étudier l'ensemble du cycle de vie ainsi que la bonne santé physiologique des organismes. En l'absence d'autres travaux, il est prématuré de dire que les crustacés seront protégés vis-à-vis de l'acidification des océans pour deux raisons essentielles :

1) La fabrication de la coquille nécessite de l'énergie mais chaque organisme n'en dispose que d'une quantité limitée. Ainsi, l'augmentation de poids se fait certainement au détriment de l'énergie disponible pour d'autres fonctions comme la croissance ou la reproduction qui n'ont pas été prises en compte lors de l'étude mentionnée ci-dessus. Les effets de l'acidification des océans sur la santé et la longévité des homards restent donc inconnus.



Homard

2) Les homards (et les crustacés en général) ont des exosquelettes et des mécanismes de calcification différents de ceux des mollusques et des coraux. L'exosquelette du homard contient essentiellement de la chitine et du carbonate de calcium. Il est renouvelé périodiquement et ne grandit donc pas de façon continue. En préparant sa mue, le homard semble capable de puiser de son exuvie une grande partie des minéraux nécessaires. Il les stocke afin de les utiliser ultérieurement pour fabriquer son nouvel exosquelette.

Il est actuellement impossible de savoir si cette différence de mécanismes de croissance affectera la réponse des homards à l'acidification des océans.

Les algues calcaires comme *Lithothamnion tophiforme* sont susceptibles d'être parmi les organismes les plus sensibles à l'acidification des océans.



tridimensionnelles (comme les récifs coralliens qui abritent une biodiversité considérable et qui protègent le trait de côte) et, d'autre part, parce que ce sont des maillons majeurs de la chaine alimentaire marine et des cycles biogéochimiques océaniques (par exemple les espèces planctoniques calcaires et les ptéropodes).

Des gagnants et des perdants

La croissance et le taux de photosynthèse de certaines espèces de phytoplancton et de certains végétaux peuvent augmenter avec des quantités de CO₂ plus élevés, mais ce n'est pas une généralité. Pour les autres, des quantités de CO₂ plus élevées et l'augmentation de l'acidité peuvent avoir des effets neutres ou négatifs sur leur physiologie. De ce fait, certaines plantes marines seront des « gagnants » tandis que d'autres seront des «perdants», et d'autres encore ne seront pas affectées. Certaines expériences indiquent que les nouvelles espèces de phytoplancton et de végétaux qui domineront l'océan acidifié du futur pourraient être moins capables de maintenir la richesse et la diversité des chaînes alimentaires qui nous garantissent actuellement la bonne santé des écosystèmes océaniques et le maintien des ressources halieutiques.

Exposer les conséquences



Les herbiers luxuriants dépourvus d'épiphytes prospèrent naturellement dans l'eau de faible pH.

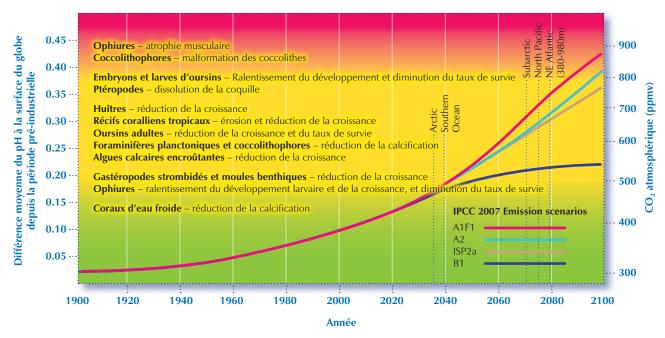
Il est difficile de prévoir avec précision les conséquences de l'acidification des océans car de nombreuses inconnues demeurent quant aux réponses des écosystèmes océaniques face au activités humaines. Il est cependant possible de tirer des informations cruciales en s'intéressant au passé ainsi qu'en étudiant des sites soumis à une acidification naturelle de longue durée.

Les observations réalisées aux abords de sources volcaniques froides de CO_2 (à ne pas confondre avec les sources extrêmement chaudes des grands fonds) et où règne des pH plus acides que ceux attendus dans les prochaines décennies, montrent que certaines espèces de micro-algues, d'algues et de plantes marines poussent très bien dans ces conditions. La comparaison avec d'autres sites qui ne sont pas soumis à des pH aussi faibles montre que la biodiversité globale est réduite et la corrosion des coquillages évidente à proximité des sources de CO_2 .

Les espèces ne s'adapteront-elles pas simplement à l'acidification d'océan ?

Comme le pH et les carbonates de l'eau de mer vont continuer à chuter, on peut s'attendre à trouver des « gagnants » et des « perdants ». Il paraît inévitable que les communautés marines changeront. Les animaux et les végétaux qui seront le plus rapidement touchés seront ceux qui possèdent une coquille ou un squelette calcaire. Les organismes peuvent répondre de trois manières aux perturbations de leur environnement: ils peuvent acclimater, s'adapter ou disparaître.

Projections concernant le CO₂ atmosphérique et la diminution moyenne de pH à surface du globe pour les différents scénarios du GIEC de 2007. Les effets biologiques déterminés expérimentalement sont indiqués ainsi que les années où le premier événement saisonnier de sous-saturation en aragonite devrait se produire dans différentes régions. Source d'après Turley et al., Marine Pollution Bulletin (2010).





Les communautés vivant sur les fonds marins proches de sources de CO₂ volcaniques en Méditerranée constituent un laboratoire naturel idéal pour l'étude de l'acidification des océans.

Les laboratoires naturels

La plupart des espèces possèdent une certaine aptitude à s'acclimater. Toutes ont une certaine capacité à tolérer des changements de conditions environnementales, bien que le stress qui en résulte puisse affecter leur capacité d'être des compétiteurs performants dans leur environnement. La capacité d'un organisme à mener des activités essentielles dépend de son bilan énergétique. Si

Coquille de patelle sévèrement érodée provenant d'une zone où le CO_2 est naturellement élevé.



un organisme dépense plus d'énergie afin de conserver sa coquille ou son squelette, il disposera de moins d'énergie pour les autres fonctions vitales telles que la reproduction ou la croissance. De la même manière, si un organisme sans coquille dépense plus d'énergie pour la respiration et l'excrétion des déchets à faible pH (forte teneur en CO₂), il disposera alors de moins d'énergie pour sa recherche de nourriture ou pour d'autres activités importantes pour sa survie.

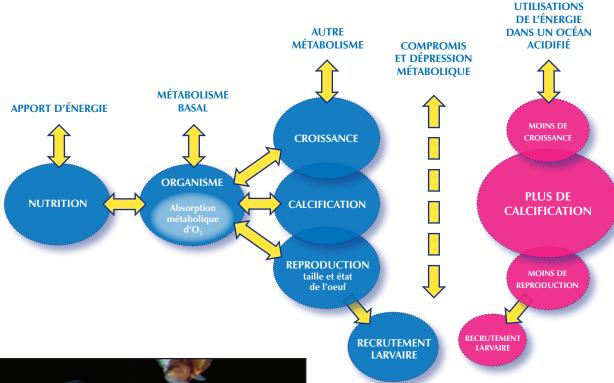
Érosion du squelette calcaire de coraux placés dans une zone où le pH est naturellement faible.

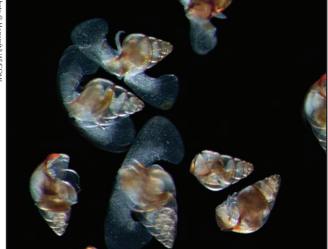






Processus clés pour la survie – comment l'acidification des océans affecte la physiologie d'un organisme? Source d'après Carol Turley.





Le ptéropode tropical Limacina bulimoides.

Changement rapide

Les espèces peuvent s'adapter à des modifications environnementales grâce à de petites variations génétiques qui rendent quelques individus mieux adaptés aux nouvelles conditions. Les espèces à courte durée de vie ont potentiellement une plus grande capacité à répondre à des modifications environnementales rapides, parce que leurs temps de génération sont courts. Chaque nouvelle génération est donc soumise à des conditions légèrement différentes des précédentes et un plus grand nombre d'individus peuvent développer des modifications génétiques utiles. À l'inverse, les espèces à une durée de vie plus longue tendent à avoir beaucoup moins de capacités d'adaptation rapide. Cependant, les modifications de l'épaisseur de la coquille des ptéropodes, qui ont en général un cycle de vie annuel, suggèrent que la diminution du pH de l'eau de mer est peut être trop rapide pour que même des espèces à durée de vie relativement courte puissent s'adapter. D'autres d'études sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

Les événements d'acidification passés observés dans les enregistrements géologiques sont souvent associés à des extinctions massives. La cause de ces épisodes est souvent complexe mais il faut souligner que la régénération des écosystèmes suite aux extinctions massives a nécessité des centaines de milliers voire des millions d'années.

L'acidification, une course aux armements?

La question clé n'est pas de savoir si la vie océanique s'adaptera et évoluera en réponse à l'acidification des océans. La question est de savoir si elle sera capable de s'adapter et d'évoluer assez rapidement pour faire face à l'acidification rapide des océans et si les nouvelles communautés qui émergeront seront en mesure de fournir les mêmes biens et services qui nous sont essentiels et supportent notre mode de vie.

Parvenir à suivre les changements

La situation présente montre clairement que la distribution des récifs coralliens est en relation avec l'état de saturation des océans en aragonite et qu'ils peuvent donc se maintenir au rythme de changement naturel des conditions. Il est improbable qu'ils seront capables de s'adapter à l'accélération des changements attendue dans les décennies à venir.

Comprendre nos options

Les effets de l'acidification des océans ainsi que ses impacts, bien que relativement mineurs aujourd'hui, augmenteront progressivement et se développeront au rythme de l'acidification. En outre, il y a un temps de retard entre les émissions de CO₂ et le moment où est atteint l'état d'équilibre, ainsi même si les émissions pouvaient être limitées et, à plus long terme, réduites, le pH des océans continuerait de diminuer. Une réduction des niveaux atmosphériques de CO₂ est essentielle si nous voulons réduire puis stopper l'acidification des océans avant qu'il soit trop tard.

L'utilisation de combustibles fossiles continue à augmenter le niveau de ${\rm CO_2}$ atmosphérique.



L'arrêt des émissions du CO₂ ferait-il une différence?

Au cours des 250 dernières années, le $\rm CO_2$ atmosphérique a augmenté d'environ 40 %, de 280 à 391 ppmv, et il continue d'augmenter d'environ 2 ppmv par an. L'absorption de $\rm CO_2$ par l'océan a permis de réduire son augmentation dans l'atmosphère au prix d'une acidification de l'eau de mer. Sans cette absorption par l'océan, le $\rm CO_2$ atmosphérique atteindrait aujourd'hui 460 ppmv, un niveau qui mènerait à un changement climatique encore plus important.

Réversibilité sur le long terme

Bien que les changements de la chimie de l'eau des océans résultant de l'absorption du CO_2 atmosphérique et leurs impacts sur les écosystèmes marins peuvent déjà être mesurés, ces modifications sont réversibles sur le long terme. Cependant, une telle inversion nécessite une réduction significative du CO_2 atmosphérique sur une période prolongée. La réduction des émissions du CO_2 provenant de l'utilisation des combustibles fossiles, de la fabrication du ciment et du changement d'utilisation des terres est la seule voie réaliste permettant d'amorcer une telle réduction.

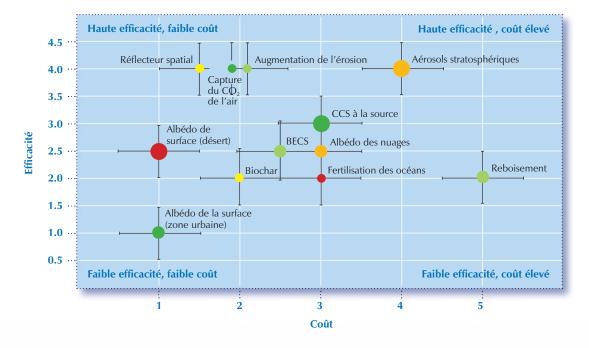
Il semble acquis que le pic de la concentration atmosphérique de CO₂ sera bien au-delà des 400 ppmv et son effet sur le pH des océans perdurera pendant un temps considérable, bien après que la réduction du CO₂ atmosphérique ne commence. Le CO₂ absorbé à la surface des océans continuera de pénétrer dans les eaux profondes durant les prochains siècles.



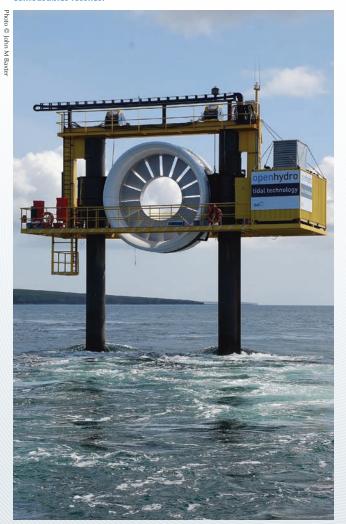
Enrayer la déforestation contribuerait à réduire l'augmentation de la concentration de CO2 atmosphérique.

Il existe quelques solutions de géo-ingénierie permettant de lutter contre le changement climatique qui sont à la fois très efficaces et très abordables. Seule la capture et le stockage du carbone (CCS) pourrait avoir une incidence sur les niveaux de CO₂ atmosphériques. Les options représentées par des points vert sont plus sûre que les options indiquées par des points rouges. La taille du point est proportionnelle au temps de réponse (grande taille l'option est rapidement réalisable et efficace, petite taille dans le cas contraire). Les barres noires indiquent le degré d'incertitude concernant le coût (abscisse) et l'efficacité (ordonnée).

Source d'après The Royal Society Geoengineering the Climate (2009).



Le développement des énergies renouvelables marines est essentiel pour aider à réduire les émissions de CO₂ provenant de la combustion de combustibles fossiles.



Il n'est pas trop tard

Certains changements provoqués par l'acidification des océans sont déjà perçus et d'autres apparaitront probablement dans le futur, même si des mesures rapides sont prises afin de limiter et de réduire de manière significative la concentration de CO₂ dans l'atmosphère au cours des prochaines années. Cependant, il n'est pas trop tard pour enclencher le processus afin d'essayer de minimiser les dommages à venir. Des solutions technologiques et économiques sont disponibles pour réduire de manière significative des émissions de CO₂ si nous choisissons de le faire. Plus nous attendrons pour passer à l'acte, plus importants seront les impacts, et plus longtemps dureront les conséquences de l'acidification des océans.

Pouvons-nous résoudre l'acidification des océans grâce à la géo-ingénierie?

La géo-ingénierie est la manipulation délibérée du climat de la Terre. La plupart des approches limitant les incidences du changement climatique proposées par la géo-ingénierie essaient de traiter les symptômes des changements climatiques sans s'attaquer à la cause du problème : l'excès de CO_2 dans l'atmosphère. Ces approches ne prennent donc pas en compte les répercussions chimiques de ces émissions. Par exemple, les stratégies qui cherchent à refroidir la terre en réfléchissant les radiations solaires dans l'espace n'auraient que peu d'incidence sur la chimie des océans, et donc ne diminueraient pas de manière significative les menaces de l'acidification.

Conséquences inconnues

Des propositions on été faites afin de diminuer les modifications de la chimie des océans en y déversant des composés qui neutraliseraient chimiquement les acides. Le problème principal de ces approches est que la quantité de matériel qui devrait être ajoutée est très importante. En fait, il a été calculé que cette quantité serait plus importante que le tonnage de CO₂ que nous avons déjà émis dans l'atmosphère. Ainsi, ces solutions proposées exigerait la mise en œuvre de nouvelles exploitations minières ainsi que des infrastructures utilisant de nouveaux traitements chimiques dont les conséquences environnementales sont inconnues.

Il a également été suggéré que la fertilisation des océans pourrait réduire les changements climatiques et l'acidification. La fertilisation stimulerait la croissance du phytoplancton et permettrait donc une augmentation nette de l'assimilation biologique du CO_2 atmosphérique. La réduction de la concentration du CO_2 atmosphérique près de la surface des océans pourrait diminuer les concentrations de carbone inorganique dissous en surface. Les modèles du cycle du carbone de l'océan

mondial prévoient, qu'avec des émissions de CO_2 dans l'atmosphère constantes, la fertilisation des océans n'exercerait qu'un effet modéré sur l'atténuation de l'acidification en surface mais entraînerait une acidification renforcée des eaux profondes. En effet, une grande partie de la matière organique organique qui sédimenterait serait décomposé en CO_2 en profondeur. Si les émissions de CO_2 atmosphérique continuent à augmenter, les eaux profondes océaniques continueront à s'acidifier. L'échelle et la durée de l'effort exigées par de telles approches auraient un coût prohibitif et les bénéfices retirés seraient, dans le meilleur des cas, très limités.

Prévenir plutôt que guérir

Beaucoup d'observateurs ont conclu que les moyens financiers qui pourraient être consacrés à la géoingénierie seraient mieux utilisés pour transformer notre système énergétique : empêcher les émissions de ${\rm CO_2}$ dans l'environnement plutôt qu'essayer d'en neutraliser les effets une fois qu'il est répandu dans l'atmosphère et les océans.

Guide en ligne

Pour téléchargez une copie de ce nouveau guide de l'acidification des océans et pour en apprendre davantage à ce sujet: http://www.epoca-project.eu/index.php/Outreach/RUG/

Qu'est-ce que le groupe des utilisateurs référents sur l'acidification de l'océan?

Un défi majeur est de s'assurer que des recherches de pointe sur des questions comme celle de l'acidification des océans abordent les questions nécessitant une réponse, et que ces réponses soit rapidement et efficacement transmises aux conseillers politiques et aux décideurs afin que des mesures puissent être prises. Le groupe des utilisateurs référents (RUG) sur l'acidification des océans fait appel à l'expertise disponible au Royaume Uni, en Europe et au plan international pour assurer un échange d'information rapide entre scientifiques et usagers.

Le RUG a été créé en 2008 pour soutenir les travaux du projet européen sur l'acidification des océans (EPOCA). Il prend désormais en charge les programmes allemand (BIOACID) et britanniques (le programme de recherche sur l'acidification des océans du Royaume-Uni) et a développé des liens étroits avec des activités similaires aux États-Unis. Le RUG rassemble un large éventail d'usagers pour soutenir le travail de scientifiques de premier plan sur l'acidification des océans, faciliter le transfert rapide des connaissances, et aider à la dissémination efficace de recherches de qualité.

Ce guide s'appuie sur l'expérience du RUG, conjuguée à la connaissance des principaux experts sur l'acidification des océans, afin de sensibiliser conseillers politiques et décideurs sur les questions les plus critiques et les plus urgentes.

Le RUG est formé de représentants de: Alfred Wegener Institute of Polar and Marine Research, BP, Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CNRS), Canadian Tourist Industry Authority, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Climate Central (Princeton University), Conservation International, Department for Food, Environment and Rural Affairs (Defra), Department of Energy and Climate Change (DECC), Directorate of Fisheries (Norway), European Science Foundation (ESF), Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), Greenpeace, International Atomic Energy Agency, International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP), International Union for the Conservation

of Nature (IUCN), Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environment (LSCE), Leibniz Institute of Marine Sciences (IFM – GEOMAR), Marine Institute (Ireland), Natural England, Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC), Plymouth Marine Laboratory (PML), Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Rolls Royce, Royal Institution, Scientific Committee on Oceanic Research (SCOR), Scottish Natural Heritage (SNH), Shellfish Association of Great Britain (SAGB), Stockholm Resilience Center, The Nature Conservancy, UK Climate Impacts Programme (UKCIP), UNEP World Conservation Monitoring Center, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), The Worldwide Fund for Nature (WWF).

Observateurs

European Commission, the UK Marine Climate Change Impacts Partnership, the Oak Foundation, Oceana

Plus d'information et contacts

Plus de détails sur le travail du groupe des utilisateurs référents sur l'acidification des océans et sur le projet européen sur l'acidification des océans sur notre site web:

http://www.epoca-project.eu/index.php/Outreach/RUG/ et sur le programme Anglais www.oceanacidification.org.uk

Pour ce qui concerne BIOACID, voir http://www.bioacid.de/

Si vous avez d'autres questions, contactez-nous à l'adresse suivante: policyguide-epoca@obs-vlfr.fr





































Sources et collaborateurs

Ce document s'inspire de la Foire Aux Questions sur l'acidification des océans, www.whoi.edu/OCB-OA/FAQs

qui réponde à 37 questions détaillées. Les scientifiques suivants ont contribué à 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, LISA

Helen Findlay, Lord Kingsland Fellow, Plymouth Marine Laboratory, UK

Jean-Pierre Gattuso, Directeur de recherche, 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,

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,

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, Royal Society University 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 and KE Coordinator for the UK Ocean Acidification Research Programme, UK

Steve Widdicombe, Benthic Ecologist, Plymouth Marine Laboratory, UK

Richard Zeebe, Associate Professor, University of Hawaii at Manoa, USA

Assurance qualité

En outre nous sommes reconnaissants aux personnes suivantes qui ont donné des conseils sur l'élaboration de ce rapport:

Jelle Bijma, Biogeochemist, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Germany

Humphrey Crick, Principal Specialist -Climate Change, Chief Scientist's Team, Natural England, UK

Sarah Cooley, Postdoctoral Investigator, Woods Hole Oceanographic Institution,

Richard A. Feely, Senior Scientist, NOAA Pacific Marine Environmental Laboratory, USA

Jean-Pierre Gattuso, Directeur de recherche, Centre National de la Recherche Scientifique and Université Pierre et Marie Curie-Paris 6, France

Lina Hansson, EPOCA Project Manager, Laboratoire d'Oceanographie, Villefranche-sur-mer, France

Dorothée Herr, Marine Programme Officer, Global Marine Programme, IUCN, Washington, USA

Michael Holcomb, Postdoctoral Research Associate, Centre Scientifique de Monaco, Monaco Andy Ridgwell, Royal Society University Research Fellow, University of Bristol, UK

Ulf Riebesell, Professor for Biological Oceanography, Leibniz Institute of Marine Sciences IFM-GEOMAR, Germany

Donna Roberts, Antarctic Climate & Ecosystems Cooperative Research Centre, Australia

Daniela Schmidt, Royal Society University Research Fellow, University of Bristol, UK

Carol Turley, Senior Scientist, Plymouth Marine Laboratory and KE Coordinator for the UK Ocean Acidification Research Programme, UK

Ed Urban, Scientific Committee on Oceanic Research, University of Delaware, USA

Phil Williamson, Science Coordinator for the UK Ocean Acidification Research Programme, UK

Nous sommes également reconnaissants aux personnes suivantes qui ont réalisé les traductions en plusieurs langues:

Arabic: Haifa Abdulhalin, edited by Nashat Hamidan and reviewed by Khaldoun Alomari.

Chinese: Vera Shi, Hui Lui, Guang Gao and Kunshan Gao.

French: Stéphanie Reynaud, Eric Béraud, François Simard and Jean-Pierre Gattuso. Spanish: Juancho Movilla, Elisa Fernandez-Guallart, Carles Pelegero and Marta Estrada.

Nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidé à diffuser cette information au-delà des anglophones.

Merci de citer ce document de la manière suivante: Ocean Acidification Reference User Group (2010). Ocean Acidification: Questions Answered. Laffoley, D. d'A., and Baxter, J.M. (eds). European Project on Ocean Acidification (EPOCA). 24 pp.

Ce guide a été réalisé avec le soutien financier de Fondation du Prince Albert II de Monaco, Scottish Natural Heritage, Natural England, IUCN, EPOCA et le programme de recherches anglais sur l'acidification de l'océan et il repose sur les approches pionnières de communication

de communication mises au point par UK's Marine Climate Change Impacts Partnership.



