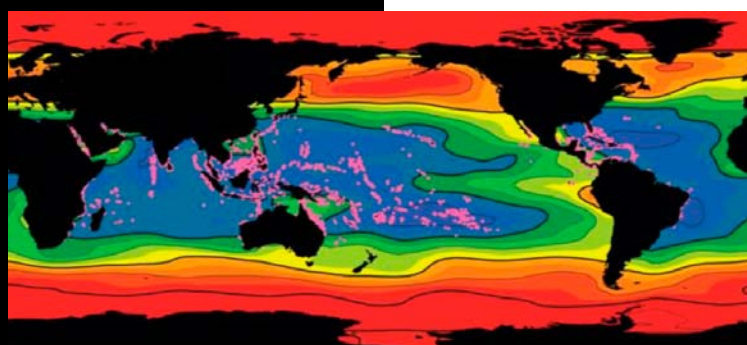
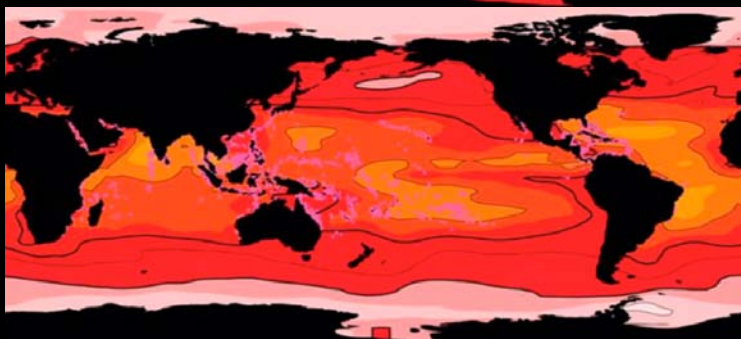
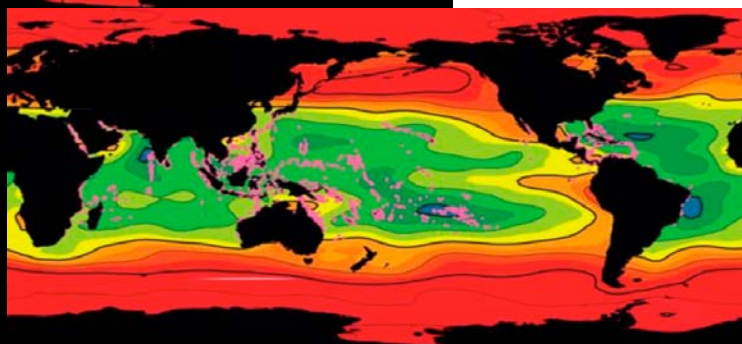




# 46



## Synthèse scientifique des impacts de l'acidification des océans sur la biodiversité marine





Cahier technique CDB No 46

**Synthèse scientifique des  
impacts de l'acidification des  
océans sur la biodiversité marine**

Publié par le Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique  
ISBN: 92-9225-271-2  
Copyright © 2010

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part du Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique aucune prise de position quant au statut juridique de tel ou tel pays, territoire, ville ou zone, ou de ses autorités, ni quant au tracé de ses frontières.

La production de ce document a été rendue possible grâce au soutien financier du Gouvernement français, Agence des aires marines protégées. Les points de vue exprimés dans ce document ne reflètent pas nécessairement la position officielle du Gouvernement de la France ni celle du Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique.

Cette publication peut être reproduite sans autorisation préalable des détenteurs des droits d'auteur, si cette reproduction est à but non lucratif ou éducatif, à condition de faire référence à la source.

#### **Citation**

Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique (2010). Synthèse scientifique des impacts de l'acidification des océans sur la biodiversité marine: Montréal, Cahier technique No 46, 61 pages.

Pour toute information complémentaire, veuillez contacter:

Le Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique

Centre de commerce mondial

413, rue St-Jacques Ouest, bureau 800

Montréal (Québec) Canada H2Y 1N9

Téléphone : +1 (514) 288 2220, Télécopieur : +1 (514) 288 6588

Courriel: [secretariat@cbd.int](mailto:secretariat@cbd.int), Site Web : [www.cbd.int](http://www.cbd.int)

**Mise en page :** Em Dash Design et G. Bolognese

**Image de page de couverture:** Dr. Riccardo Rodolfo-Metalpa, in Hall-Spencer J. and Rauer, E. (2009). Champagne Seas—Foretelling the Ocean's Future? *Édition courante : The Journal of Marine Education*, Vol. 25(1): 11-12.

**Cartes de page de couverture:** Prof. Ken Caldeira, Department of Global Ecology, Carnegie Institution of Washington, Stanford University, US. D'autres cartes, à partir des mêmes données, ont été publiées dans Cao, L and Caldeira, K. (2008). Atmospheric CO<sub>2</sub> stabilization and ocean acidification, *Geophysical Research Letters* 35:L19609, pp. 5.

Les cartes montrent l'état de saturation de l'aragonite par rapport à des taux de stabilisation de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) atmosphérique croissants. Dans chacun des scénarios, la valeur est dérivée de la valeur de CO<sub>2</sub> nécessaire à la stabilisation utilisée par le modèle pour trois années différentes, soit en haut : valeur pré-industrielle (280 ppm en 1765), au milieu : valeur actuelle (380 ppm en 2010\*), et en bas : projection future (750 ppm en 2250). La valeur pour 2250 vient d'une extrapolation basée sur une augmentation de 50 ppm tous les 25 ans à partir de 450 ppm en 2100.

corrosif  optimum

\* les concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique actuelles sont de 387 ppm (2009)

## TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS .....	5
PRÉFACE .....	7
REMERCIEMENTS .....	8
RÉSUMÉ ANALYTIQUE .....	9
<b>I. CONTEXTE ET INTRODUCTION .....</b>	<b>10</b>
A. Objectifs du rapport.....	11
B. Définition(s) de l'acidification des océans.....	11
C. Description scientifique de l'acidification des océans.....	12
<b>II. SITUATION MONDIALE ET TENDANCES DE L'ACIDIFICATION DES OCÉANS .....</b>	<b>21</b>
A. Les eaux de surface des régions de haute latitude.....	22
B. Les eaux de surface des régions tempérées.....	24
C. Les eaux de surface des régions tropicales.....	26
D. Des environnements à pH naturellement bas .....	26
E. Activités anthropiques.....	27
F. Tendances futures.....	28
<b>III. SYNTHÈSE DE L'INFORMATION SCIENTIFIQUE SUR LES IMPACTS POTENTIELS DE L'ACIDIFICATION DES OCÉANS .....</b>	<b>30</b>
A. Méthodes et approches pour l'évaluation des impacts de l'acidification des océans .....	30
B. Le rôle du CaCO <sub>3</sub> chez les organismes calcifiants .....	32
C. Les communautés benthiques.....	32
D. Les communautés pélagiques.....	43
E. Conséquences écologiques.....	49
F. Impacts sur les services écosystémiques et les moyens de subsistance.....	53
<b>IV. INCERTITUDES ET AUTRES CONSIDÉRATIONS .....</b>	<b>55</b>
<b>V. CONCLUSIONS.....</b>	<b>59</b>



## AVANT-PROPOS

Depuis dix ans, la Conférence des Parties (CdP) à la CDB n'a cessé de faire part de ses inquiétudes par rapport aux menaces du réchauffement climatique sur la biodiversité, et a fourni des orientations politiques appropriées. Des efforts importants de sensibilisation ont donc été entrepris vis-à-vis des impacts négatifs du réchauffement climatique sur la biodiversité et du rôle important qu'elle joue dans l'adaptation et l'atténuation du réchauffement climatique.



Durant sa 4<sup>e</sup> réunion en 1998, la CdP a fait part de son inquiétude profonde concernant l'étendue et la sévérité du blanchiment des coraux à l'époque, et a noté que ce phénomène pouvait être attribuable au réchauffement climatique. Durant sa 5<sup>e</sup> réunion, la CdP a exigé que la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) prenne toutes les mesures possibles pour réduire les effets du réchauffement climatique sur la température de l'eau et pour faire face aux impacts socio-économiques sur les pays et les populations les plus affectés par le blanchiment des coraux.

Plus récemment, au cours de sa neuvième réunion, la CdP a fait part de son inquiétude quant aux impacts de l'acidification des océans, qui résulte directement de l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique se produisant indépendamment des changements climatiques. Cet ouvrage a été préparé afin de répondre directement à la requête de CdP 9 de réunir et de faire la synthèse de toute l'information scientifique disponible sur l'acidification des océans et ses impacts sur la biodiversité et les habitats marins, car elle pourrait menacer gravement les coraux d'eaux froides ainsi que d'autres aspects de la biodiversité marine.

Cette étude montre entre autres qu'une augmentation de l'acidification des océans réduit la disponibilité dans l'eau de mer des minéraux de carbonate, composantes importantes des plantes et des animaux marins, et que d'ici 2100, 70% des coraux d'eaux froides, refuges clés et zones de nourriture pour certaines espèces de poissons commerciales, seront exposés à des eaux corrosives. En outre, en vue des taux d'émissions actuels, on prévoit que les eaux de surface deviendront sous-saturées en minéraux essentiels de carbonate d'ici 2032 dans l'océan Arctique riche en production, et d'ici 2050 dans l'océan Austral, entraînant la perturbation d'une partie importante du réseau trophique marin.

Cet effort initial, accompli en conjonction avec le Centre Mondial de Surveillance pour la Conservation de l'UNEP (UNEP-WCMC), confirme qu'il est urgent d'établir un partenariat d'experts au sein de la CDB, en collaboration avec les organisations internationales/ONU appropriées, afin de faire le suivi et l'évaluation des impacts de l'acidification des océans sur la biodiversité marine et côtière, et de sensibiliser les décideurs politiques aux conséquences écologiques et socio-économiques possibles, afin de favoriser un programme commun de travail entre les deux Conventions de Rio, la CCNUCC et la CDB.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'A. Djoghlaoui', written over a white background.

Dr. Ahmed Djoghlaoui  
Secrétaire exécutif  
Convention sur la diversité biologique





## PRÉFACE

En 1980, j'écrivais dans l'avant-propos de *Conservation Biology*, de Michael Soulé et Bruce Wilcox, que «*des centaines de milliers d'espèces vont disparaître, et [que] cette perte de 10 à 20 pourcent de la vie sur terre s'effectuera au cours de la moitié d'une vie humaine environ... Cette diminution de la diversité biologique de notre planète est le problème le plus fondamental de notre temps.*» Cette pensée ne trouva aucun preneur au sein de la communauté ou de la classe politique globale avant que la Convention sur la diversité biologique (CDB) n'entre en vigueur en 1993.



Seize ans après que la Convention eut été adoptée et avec moins d'un mois pour réaliser les objectifs de 2010 relatifs à la diversité biologique, le problème fondamental de notre époque, la biodiversité, n'a pas encore touché le cœur de tous les citoyens de la terre. Le débat global actuel sur les changements climatiques semble d'ailleurs avoir pris la relève, mais sans tenir compte du fait que la planète est un système biophysique. De ce fait, trop de décideurs politiques présents à la conférence de Copenhague sur les changements climatiques semblent ignorer que la diversité biologique non seulement sous-tend et se situe au cœur du développement durable global, mais qu'elle est gravement menacée par les changements climatiques. Il est donc aussi essentiel qu'urgent de comprendre le rôle que joue la biodiversité dans la réalisation de notre objectif commun de durabilité.

De ce point de vue, ce présent rapport de la CDB sur les impacts de l'acidification des océans sur la biodiversité marine est opportun et pertinent, confirmant à nouveau l'importance des enjeux de la durabilité dans les négociations sur les changements climatiques. Il est malheureusement vrai, et qui plus est évident, que nous nous heurtons à de graves problèmes biologiques, et que nous nous acheminons vers une extinction d'espèces inégalée depuis celle qui fit disparaître les dinosaures, et dont nous sommes responsables. Ce n'est pas une exagération de rappeler que le taux de disparition des espèces est d'environ 1000 à 10 000 fois plus élevé que la normale, et qu'au moins un quart des espèces risquent de disparaître au cours des deux prochaines décennies. Il faut mettre la diversité biologique au centre de toute discussion sur la durabilité et des efforts pour l'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques.

Cette synthèse scientifique du Secrétariat de la CDB et du Centre Mondial de Surveillance pour la Conservation de l'UNEP (WCMC) est particulièrement importante. Il est attendu que la CDB, en collaboration avec les organisations internationales et les communautés scientifiques pertinentes, continue à s'investir dans la consolidation de cet ouvrage, afin d'améliorer la recherche scientifique sur l'acidification des océans, et plus particulièrement sur ses conséquences biologiques et biogéochimiques, y compris la détermination exacte des niveaux sub-critiques des impacts ou des seuils critiques pour les espèces marines, les écosystèmes, et les biens et services qu'ils fournissent.

A handwritten signature in black ink, which appears to read "Thomas E. Lovejoy".

Dr. Thomas E. Lovejoy  
Biodiversity Chair  
Heinz Center for Science, Economics and the Environment  
Washington, D.C. USA

## REMERCIEMENTS

Le Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique souhaiterait remercier Nicola Barnard et Stefan Hain de UNEP-WCMC pour leur direction de recherche et leur préparation du rapport de ce Cahier technique CDB. Le Secrétariat souhaiterait adresser ses plus vifs remerciements au gouvernement espagnol pour la générosité de l'aide financière qu'il a apportée à cette étude, et remercier l'UNEP-WCMC d'avoir fourni les fonds nécessaires à la publication de ce rapport. La production de ce document traduit à partir de la version originale anglaise a été rendue possible grâce au soutien financier du Gouvernement français, Agence des aires marines protégées. Le Secrétariat aimerait aussi exprimer sa reconnaissance au Brésil, à la Nouvelle-Zélande, à la Norvège, à la Thaïlande, aux États-Unis, au Vietnam, à Greenpeace International, à Elva Escobar, William R Howard, Jean-Pierrra Gattuso, Francine Kershaw, Suzanne R Livingstone, Hine - Wai Loose et Kristian Teleki pour leurs contributions et leurs commentaires très appréciés durant la rédaction de ce rapport. Le personnel du Secrétariat ayant contribué à la révision de ce rapport est aussi vivement remercié.

## RÉSUMÉ ANALYTIQUE

La surface de l'océan joue un rôle essentiel dans le cycle global du carbone en absorbant environ un quart du dioxyde de carbone émis dans l'atmosphère par la combustion de carburants fossiles, la déforestation et autres activités humaines. Tandis que la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> d'origine anthropique dans l'atmosphère a augmenté, l'océan a absorbé des quantités croissantes à une allure grandissante. Si ce service fourni par les océans n'existait pas, le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique serait bien supérieur au taux actuel, et les effets des changements climatiques mondiaux plus marqués.

L'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique a néanmoins entraîné des changements dans l'équilibre chimique des océans (naturellement légèrement alcalins), les rendant plus acides. Depuis la Révolution industrielle, il y a 250 ans, il y a eu une augmentation marquée de l'acidité des océans de 30%.

Les prévisions annoncent une augmentation des concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique de 0,5-1,0% par an au cours du 21<sup>e</sup> siècle. L'acidification des océans suit de près l'accélération des émissions globales de CO<sub>2</sub>, et il est possible de déterminer avec une grande certitude l'ampleur de l'acidification des océans, grâce aux réactions chimiques et aux cycles prévisibles du carbonate marin. On prévoit que l'augmentation de l'acidité des océans pourrait atteindre 150% d'ici 2050. Cette hausse significative est 100 fois plus rapide que tout changement d'acidité de l'environnement marin depuis 20 millions d'années, ne laissant que peu de temps à une adaptation évolutionnaire des systèmes biologiques.

Une augmentation de l'acidification des océans diminue la disponibilité dans l'eau de mer des minéraux de carbonate, une composante importante pour les plantes et des animaux marins. Les concentrations d'ions de carbonate sont plus basses maintenant qu'à aucun autre moment durant les 800 000 dernières années. D'après les taux actuels d'émissions, on prévoit aussi que les eaux de surface du très productif océan Arctique deviendront sous-saturées en minéraux de carbonates essentiels d'ici 2032, et d'ici 2050 pour l'océan Austral, perturbant une large partie du réseau trophique marin. Les fluctuations saisonnières de la saturation en minéraux de carbonate de l'océan Austral pourraient produire des conditions nuisibles au bon fonctionnement des écosystèmes marins, menaçant particulièrement les organismes calcifiants, à des échelles de temps beaucoup plus courtes.

On prévoit que d'ici 2100, 70% des coraux d'eaux froides, représentant des refuges clés et des zones de nourriture pour les espèces de poissons commerciales, seront exposés à des eaux corrosives. Les eaux tropicales, comme celles de la Grande Barrière de corail, subiront aussi des baisses rapides en ions de carbonate, réduisant les taux nets d'accrétion des récifs de coraux d'eaux chaudes; la bioérosion et l'augmentation du niveau de la mer l'emporteront sur ces récifs à grande biodiversité.

Un nombre croissant d'études scientifiques indique que de nombreux effets liés à l'acidification des océans sur les organismes et les écosystèmes marins seront variables et complexes, avec un impact différent sur les stades de développement et les stades adultes de toutes les espèces suivant la génétique, les mécanismes de préadaptation et la synergie des facteurs environnementaux. L'évidence obtenue à des endroits naturellement acidifiés confirme cependant que même si quelques espèces peuvent en bénéficier, les communautés biologiques soumises à des conditions d'eau de mer acidifiée sont moins diverses, et les espèces calcifiantes sont absentes.

Beaucoup de questions persistent sur les conséquences biologiques et biogéochimiques de l'acidification des océans sur la biodiversité et les écosystèmes océaniques, ainsi que sur les impacts de ces changements sur les écosystèmes marins et les services qu'ils fournissent, comme la pêche, la protection côtière, le tourisme, la séquestration du carbone et la régulation du climat. Pour prédire les conséquences avec précision, il faut considérer les effets écologiques dans le contexte des autres changements environnementaux associés aux changements climatiques mondiaux.

L'acidification des océans est irréversible sur une échelle de temps de dizaines de milliers d'années au moins, et seule une réduction urgente et rapide des émissions globales de CO<sub>2</sub>, ainsi que la reconnaissance et l'intégration de ce problème critique au débat mondial sur les changements climatiques, pourront éviter d'importants dégâts aux écosystèmes océaniques.

## I. CONTEXTE ET INTRODUCTION

La hausse des concentrations de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), liée entre autres à la combustion de carburants fossiles, la fabrication du ciment et la déforestation, a entraîné une augmentation de l'absorption du CO<sub>2</sub> par les eaux de surface océaniques. Le système de carbone inorganique est un équilibre chimique important dans les océans, qui contrôle pour une grande part le pH de l'eau de mer<sup>1</sup>. Par conséquent, l'absorption du CO<sub>2</sub> par les océans, estimée entre un quart et un tiers des émissions atmosphériques de CO<sub>2</sub> liées aux activités humaines depuis 1800, a produit des changements dans l'équilibre chimique de l'eau de mer et un abaissement du pH, phénomène couramment dénommé "l'acidification des océans"<sup>2,3</sup>.

L'acidification des océans est une conséquence de l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique<sup>4</sup> actuelle et future, que l'on peut à la fois observer et prévoir, puisque le comportement physico-chimique et les réactions du CO<sub>2</sub> lors de sa dissolution dans l'eau de mer sont bien établis. Pourtant, bien que l'acidification des océans commence à être reconnue comme une menace globale, ses impacts sur les espèces marines et les processus écosystémiques sont encore peu connus<sup>5</sup>. Les conséquences prévues sur les plantes et les animaux marins, la sécurité alimentaire et la santé humaine sont profondes, et incluent la perturbation de processus biogéochimiques fondamentaux, des cycles régulant les océans, des chaînes trophiques et de la production marines, ainsi que de la structure et du fonctionnement des écosystèmes<sup>6,7</sup>.

En 2008, 155 scientifiques en provenance de 26 pays, réunis pour le deuxième Symposium international sur l'Océan dans un monde avec un taux élevé de CO<sub>2</sub> ont signé une déclaration (la Déclaration de Monaco) demandant aux leaders du monde d'agir afin d'atténuer les effets déjà détectables de l'acidification des océans, et leur signalant qu'un manque d'action aurait des effets prévus rapides et de grande envergure sur la pérennité des biens et services fournis par l'océan<sup>8</sup>. En 2009, le Groupe inter-académies sur les questions internationales (GIA) publia un communiqué sur l'acidification des océans, approuvé par 70 des principales académies scientifiques du monde, réclamant l'inclusion de l'acidification des océans dans le débat sur les changements climatiques, et recommandant une diminution urgente des émissions globales de CO<sub>2</sub> d'au moins 50% d'ici 2050 afin de stabiliser l'augmentation de température et l'acidification à des niveaux sub-critiques<sup>9</sup>. L'acidification des océans a aussi fait le sujet de revues et de synthèses issues de diverses institutions à travers le monde<sup>10</sup>.

La recherche sur l'acidification des océans en est encore à ses débuts, et il reste encore beaucoup de questions par rapport à ses conséquences biologiques et biogéochimiques, et à la détermination exacte de niveaux sub-critiques, ou de seuils critiques pour les espèces marines, les écosystèmes et les services au niveau mondial. Jusqu'à présent, la connaissance des impacts biologiques liés à l'acidification des océans provient surtout de l'étude des réponses d'organismes individuels. Il y a un besoin urgent de mieux comprendre les impacts au niveau de l'écosystème (par exemple les changements de composition des espèces, la production et la calcification au niveau de la communauté). Dans sa décision IX/20 ( biodiversité marine et côtière ), la Conférence des Parties à la Convention sur la diversité biologique "... prie le Secrétaire exécutif, en collaboration avec les Parties, les autres gouvernements et les organisations concernées, de compiler et de résumer les informations scientifiques disponibles sur l'acidification des océans et ses conséquences pour la biodiversité marine et les habitats, identifiée dans la synthèse comme étant une menace potentiellement grave

- 
- 1 Fabry, V. J., Seibel, B. A., Feely, R. A., Orr, J. C. (2008). Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science*, 65:414–432.
  - 2 Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., Kleypas, J. A. (2009). Ocean Acidification: The Other CO<sub>2</sub> problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1:169–192.
  - 3 Canadell *et al.*, 2007: Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks, in *Proceedings of the National Academy of Science* 104:47:18866–18870, doi: 10.1073/pnas.0702737104
  - 4 Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., Kleypas, J. A. (2009). Ocean Acidification: The Other CO<sub>2</sub> problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1:169–192
  - 5 Kleypas, J. A., Buddemeier, R. W., Archer, D., Gattuso, J. P., Langdon, C., Opdyke, B. N. (1999). Geochemical Consequences of Increased Atmospheric Carbon Dioxide on Coral Reefs. *Science*, Vol 284:118–120.
  - 6 EUR-OCEANS. (2007). Fiche d'information 7: Ocean Acidification – the other half of the CO<sub>2</sub> problem. [www.eur-oceans.eu/KTU](http://www.eur-oceans.eu/KTU)
  - 7 GC(52)/INF/3 (2008). *Nuclear Technology Review 2008*.
  - 8 Déclaration de Monaco. Second International Symposium on the Ocean in a High-CO<sub>2</sub> World, Monaco, October 2008. <http://ioc3.unesco.org/oanet/Symposium2008/MonacoDeclaration.pdf>
  - 9 Inter-Academy Panel on International Issues (IAP). 2009. Statement on Ocean Acidification. Endorsed, June 2009. [www.interacademies.net/CMS/9075.aspx](http://www.interacademies.net/CMS/9075.aspx)
  - 10 Hobart Communiqué on Ocean Acidification: Australian Impacts in the Global Context, Antarctic Climate & Ecosystems Cooperative Research Centre, Hobart, Tasmania, Workshop Report 2–4 June 2008; Royal Society of New Zealand, (2009), Ocean Acidification: Emerging Issues, 4 pp, Wellington, New Zealand, [www.royalsociety.org.nz/includes/download.aspx?ID=102240](http://www.royalsociety.org.nz/includes/download.aspx?ID=102240)

*pour les coraux d'eau froide et autre biodiversité marine, et de rendre ces informations disponibles pour examen à une future réunion de l'Organe subsidiaire chargé de fournir des avis scientifiques, techniques, et technologiques (SBSTTA) et avant la dixième réunion de la Conférence des Parties*<sup>11</sup>.

## A. OBJECTIFS DU RAPPORT

Ce rapport présente une revue et une synthèse de la littérature et de l'information scientifique existant sur les impacts potentiels de l'acidification des océans sur la biodiversité marine, en conformité avec la décision IX/20. Ce rapport tient compte des commentaires et des réactions soumis par les Parties, les autres gouvernements et les organisations ainsi que les experts qui ont bien voulu faire la révision de ce rapport.

En accord avec les demandes proposées dans la décision IX/20, les résultats de ce travail seront soumis comme document informatif au SBSTTA 14 prévu en mai 2010.

La recherche entreprise pour ce rapport a été effectuée en collaboration avec le Centre Mondial de Surveillance pour la Conservation de l'UNEP (UNEP-WCMC), avec une aide financière généreuse du gouvernement espagnol.

### TABLE DE CONVERSION DES UNITÉS DE CARBONE ET DE CO<sub>2</sub>

Les mesures d'atténuation des changements climatiques font souvent référence à l'absorption naturelle ou aux activités de séquestration et au stockage du carbone (C), tandis que, dans le contexte des émissions de gaz à effet de serre, on se réfère au carbone sous sa forme gazeuse, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). La relation entre les deux est comme suit:

**1 tonne de carbone** correspond à **3.67 tonnes de dioxyde de carbone**

Dans ce rapport, les tonnes sont des tonnes métriques (soit 10<sup>6</sup> grammes), les stocks totaux de carbone sont exprimés en gigatonnes de carbone (Gt C) et les stocks par unité de surface en tonnes de carbone par m<sup>2</sup> (t C m<sup>2</sup>). Les flux de carbone sont exprimés en tonnes de carbone par an (t C par an) ou tonnes de carbone par m<sup>2</sup> par an (t C m<sup>2</sup> par an).

**1 Gt C** de carbone correspond à **10<sup>9</sup> t C**.

## B. DÉFINITION(S) DE L'ACIDIFICATION DES OCÉANS

L'unité de mesure utilisée pour déterminer l'acidité d'une solution est le pH. Sur cette échelle logarithmique, une baisse d'une unité correspond à un décuplement de la concentration d'ions d'hydrogène (H<sup>+</sup>) et représente un acidification importante. Actuellement, les eaux de surface des océans sont légèrement alcalines, avec un pH moyen global de ~8,1 dans l'échelle de pH de l'eau de mer, c'est-à-dire à peu près 0,1 unité de moins que les valeurs estimées pour la période préindustrielle<sup>12</sup>.

La dissolution du CO<sub>2</sub> dans les océans a pour effet d'augmenter la concentration en ions d'H<sup>+</sup>, ce qui abaisse le pH, et acidifie les océans. Il faut bien noter que le pH des océans est actuellement supérieur à pH = 7 (pH neutre); le terme d'acidification des océans se réfère donc aux océans devenant progressivement moins basiques dans l'échelle de pH (voir Fig.1).

11 voir <http://www.cbd.int/decision/cop/?id=11663>, dernièrement accédé le 10 mai 2009

12 Feely, R. A., Doney, S. C., and S.R. Cooley (2009), Ocean Acidification: Present conditions and future changes in a high-CO<sub>2</sub> world, Oceanography, submitted for publication.

En 2007, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a défini l'acidification des océans comme étant la *“Diminution du pH de l'eau de mer due à l'absorption de dioxyde de carbone anthropique.”*<sup>13</sup>

Il existe beaucoup d'autres définitions et descriptions plus détaillées (voir aussi Section C ci-dessous) du terme acidification des océans dans la littérature scientifique, telles que:

*“... Une addition de dioxyde de carbone causant un abaissement du pH océanique et des changements dans la spéciation du carbonate”, le pH étant défini comme “une mesure de l'acidité océanique et de la concentration d'ions d'hydrogène H+;  $pH = -\log_{10}[H^+]$ ”*<sup>14</sup>

*“... L'absorption du CO<sub>2</sub> par les océans force le système de carbonate vers un pH plus bas et vers des états de saturation moins élevés par rapport aux minéraux de carbonate de calcite, d'aragonite et de calcite magnésienne, matériaux dont se servent de nombreux groupes d'organismes marins importants pour construire leurs structures squelettiques. ...”*<sup>15</sup>

Concentration d'ions d'hydrogène par rapport à l'eau distillée		Exemples de solutions à ce pH
10,000,000	pH = 0	Acide de batterie, acide hydrofluorique (fort)
1,000,000	pH = 1	Acide hydrochlorique produit par l'estomac
100,000	pH = 2	Jus de citron, Acide gastrique, Vinaigre
10,000	pH = 3	Jus de pamplemousse, Jus d'orange, Soda
1,000	pH = 4	Jus de tomate, Pluie acide
100	pH = 5	Eau potable douce, Café noir
10	pH = 6	Urine, Salive
1	pH = 7	“Eau pure”
1/10	pH = 8	Eau de mer
1/100	pH = 9	Bicarbonate de soude
1/1000	pH = 10	Great Salt Lake, Lait de magnésie
1/10,000	pH = 11	Solution d'ammoniac
1/100,000	pH = 12	Eau savonneuse
1/1,000,000	pH = 13	Eaux de Javel, décapant à four
1/10,000,000	pH = 14	Décapant d'égoût

**FIGURE 1:** L'échelle de pH. *Source: US Environmental Protection Agency*

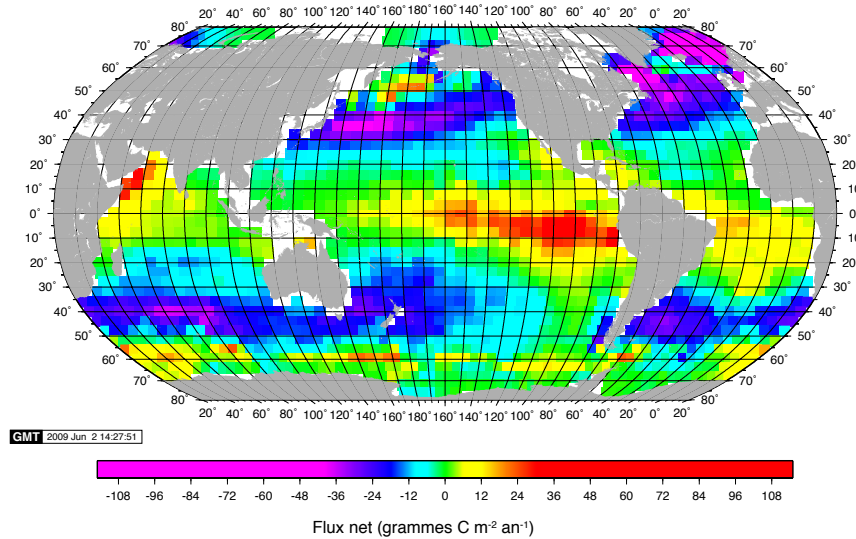
### C. DESCRIPTION SCIENTIFIQUE DE L'ACIDIFICATION DES OCÉANS

Les océans sont l'un des plus grands réservoirs naturels de carbone, avec une absorption journalière estimée à 22 millions de tonnes métriques de CO<sub>2</sub><sup>16</sup>. Il existe un échange aisé de gaz à l'interface air-mer grâce à la différence de pression partielle de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) entre l'océan et l'atmosphère, les océans ayant par conséquent un rôle considérable dans le cycle global du carbone<sup>17</sup>. Il existe d'importantes interactions et feedbacks entre les changements d'état des océans et les changements du climat et de la chimie atmosphérique au niveau mondial, qui peuvent influencer la capacité des océans à absorber le CO<sub>2</sub> supplémentaire de l'atmosphère, avec des répercussions sur la rapidité et l'échelle des changements climatiques mondiaux<sup>18</sup>.

#### *Solubilité et distribution du CO<sub>2</sub> dans les océans*

La solubilité et la distribution du CO<sub>2</sub> dans les océans dépend des conditions climatiques ainsi que de facteurs physiques (comme le mélange de la colonne d'eau, la température), chimiques (par exemple la chimie du carbonate) et biologiques (comme la productivité biologique). Par exemple, l'absorption du CO<sub>2</sub> par les algues marines durant la photosynthèse crée un déficit de CO<sub>2</sub> dans les eaux océaniques de surface, entraînant la dissolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans la surface de l'océan afin de restaurer l'équilibre<sup>19</sup>. La figure 2 montre la moyenne annuelle calculée du flux mer-air de CO<sub>2</sub>, les couleurs jaune-rouge indiquant un dégagement net de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère, et les couleurs bleu-violet indiquant une absorption nette de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère.

13 IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, USA  
 14 Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., Kleypas, J. A. (2009). Ocean Acidification: The Other CO<sub>2</sub> problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1:169–192.  
 15 Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L., Robbins, L. L. (2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18–20 April 2005, St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S Geological Survey, 88 pp.  
 16 Feely, R. A., Sabine, C. L., Hernandez-Ayon, J. M., Lanson, D., Hales, B. (2008). Evidence for Upwelling of Corrosive “Acidified” Water onto the Continental Shelf. *Science*, Vol320:1490 -1492.  
 17 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>  
 18 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>  
 19 Chisholm, S. W. (2000). Stirring times in the Southern Ocean. *Nature*. Vol 407. 12 October 2000.



**FIGURE 2:** Flux air-mer moyen annuel de CO<sub>2</sub> pour 2000 (Révision juin 2009). Source: [http://www.ideo.columbia.edu/res/pi/CO2/carbondioxide/pages/air\\_sea\\_flux\\_2000.html](http://www.ideo.columbia.edu/res/pi/CO2/carbondioxide/pages/air_sea_flux_2000.html) based on Takahashi, et al. 2009<sup>20</sup>. Distribution climatique moyenne de la pCO<sub>2</sub> des eaux de surface des océans du globe sous des conditions de non-El Niño, présentée avec une résolution spatiale de 4° (latitude) x 5° (longitude) pour l'année de référence 2000, basée sur 3 millions de mesures de pCO<sub>2</sub> d'eaux de surface obtenues entre 1970 et 2007. Données de vitesse de vent fournies par les réanalyses NCEP-DOE AMIP-II 1979–2005 et coefficient de transfert de gaz avec un facteur d'échelle de 0,26. La moyenne annuelle du flux d'absorption nette de CO<sub>2</sub> pour tous les océans actuellement est calculée à  $-1.4 \pm 0.7$  Pg-C/an. Si l'on prend en compte un état d'équilibre préindustriel de la source océan de  $0.4 \pm 0.2$  Pg-C/an, le flux d'absorption océanique total, incluant le CO<sub>2</sub> anthropique est calculé à  $-2.0 \pm 0.7$  Pg-C/an en 2000.

Une fois le CO<sub>2</sub> absorbé par les eaux de surface, il est transporté horizontalement et verticalement vers l'océan profond par une série de processus dépendant de la biologie et de la physique. En dehors de l'advection et du mélange, l'océan peut changer la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique essentiellement par trois mécanismes: la "pompe de solubilité", la "pompe de carbone organique" et la "contre-pompe CaCO<sub>3</sub>"—on associe souvent les deux dernières en un seul mécanisme, la "pompe biologique" (Figure 3)<sup>21</sup>.

**La pompe biologique** La "pompe de carbone organique" (pompe biologique) est gouvernée par la production primaire du phytoplancton marin, qui, par la photosynthèse, convertit le carbone inorganique dissous (CID) (la somme des ions de bicarbonate, du CO<sub>2</sub> (aq) non-dissocié et des ions de carbonate)<sup>22</sup>, et les nutriments en matière organique<sup>23</sup>. Ce processus est limité par la disponibilité de la lumière et des nutriments, par exemple le phosphate, le nitrate et l'acide silicique, ainsi que des micronutriments, tels que le fer. L'absorption du CO<sub>2</sub> par l'intermédiaire de la photosynthèse capte une quantité de CO<sub>2</sub> atmosphérique supplémentaire, alimente le flux de carbone organique particulière en direction de l'océan profond lié à la mort ou la consommation des organismes, et gouverne les réseaux trophiques marins globaux. Ce cycle maintient le gradient vertical de la concentration de CID, avec des valeurs plus élevées en profondeur et moins élevées à la surface<sup>24</sup>.

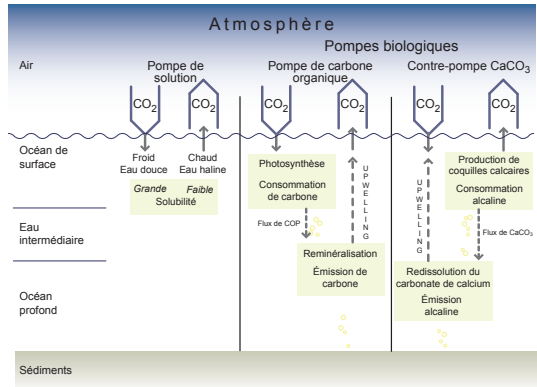
20 Takahashi, T., S. C. Sutherland, R. Wanninkhof, C. Sweeney, R. A. Feely, D. W. Chipman, B. Hales, G. Friederich, F. Chavez, A. Watson, D. C. E. Bakker, U. Schuster, N. Metzl, H. Yoshikawa-Inoue, M. Ishii, T. Midorikawa, Y. Nojiri, C. Sabine, J. Olafsson, Th. S. Arnarson, B. Tilbrook, T. Johannessen, A. Olsen, Richard Bellerby, A. Körtzinger, T. Steinhoff, M. Hoppema, H. J. W. de Baar, C. S. Wong, Bruno Delille and N. R. Bates (2009). Climatological mean and decadal changes in surface ocean pCO<sub>2</sub>, and net sea-air CO<sub>2</sub> flux over the global oceans. *Deep-Sea Res. II*, 56, 554–577

21 IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, USA

22 Le Queré, C. and Metzl, N. (2004). Natural Processes Regulating the Ocean Uptake of CO<sub>2</sub>. In: *The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World*. (C. B. Field and M. R. Raupach, Eds.) Island Press: Washington, D.C., USA. pp. 243–255

23 Ibid.

24 Hofmann, M. and Schellnhuber, H. J. (2009). Ocean acidification affects marine carbon pump and triggers extended marine oxygen holes. *PNAS* 106, 3017–3022.



**FIGURE 3:** La régulation des fluctuations naturelles du  $\text{CO}_2$  atmosphérique par les océans est contrôlée par trois pompes de carbone océaniques principales. Source: Denman, K.L et al. (2007). *Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (redrawn after Heinze, C., E. Maier-Reimer, and K. Winn, 1991: *Glacial  $p\text{CO}_2$  reduction by the World Ocean: experiments with the Hamburg carbon cycle model* *Paleoceanography* 6(4), 395–430.)

Bien que la plupart du  $\text{CO}_2$  absorbé par le phytoplancton soit recyclé près de la surface, une fraction importante, peut-être 30%, s'enfonce dans les eaux plus profondes avant d'être reconvertie (reminéralisée) en  $\text{CO}_2$  par les bactéries marines. Seulement 0,1% environ atteint le fond de la mer et s'enfonce dans les sédiments<sup>25</sup>. Il faut noter que le captage du  $\text{CO}_2$  associé à la production primaire a pour effet d'augmenter le pH des eaux de surface, tandis que l'addition de  $\text{CO}_2$  par la respiration abaisse le pH, entraînant une variation de pH diurne que l'on peut observer dans les systèmes très productifs<sup>26</sup>.

**La pompe de solubilité** En plus de l'absorption ou du dégagement de  $\text{CO}_2$  dûs aux processus biologiques, les changements de solubilité du  $\text{CO}_2$  gazeux peuvent modifier les concentrations de  $\text{CO}_2$  dans les océans et l'atmosphère sus-jacent. La pompe de solubilité témoigne du rapport de la solubilité du  $\text{CO}_2$  à la température (la solubilité est d'autant plus grande que l'eau est froide) et de la stratification thermique de l'océan<sup>27</sup>. La pompe de solubilité est un autre mécanisme important contrôlant l'inventaire du carbone océanique. La circulation thermohaline à grande échelle est entraînée par la formation d'eau profonde à haute latitude, où l'eau dense et froide coule et s'enfonce dans les bassins océaniques profonds. Comme ces masses d'eau profondes sont formées sous les mêmes conditions de surface que celles favorisant la solubilité du dioxyde de carbone, elles contiennent une forte concentration de CID, accumulé en surface, qui est alors transporté vers le fond des océans lorsque la masse d'eau coule.

Les processus de circulation à grande échelle de l'océan transportent lentement sur de longues distances, depuis l'Atlantique jusqu'aux océans Indien et Pacifique, ces eaux profondes riches en  $\text{CO}_2$ . Celles-ci accumulent davantage de CID le long de leur parcours. Les concentrations de CID sont en effet environ 10-15% plus élevées dans les eaux profondes qu'à la surface, et moins élevées dans l'océan Atlantique que dans l'océan Indien, les concentrations les plus élevées se situant dans les vieilles eaux profondes de l'océan Pacifique nord. La figure 4 montre la distribution pré-industrielle moyenne du carbone inorganique dissous le long de transects nord-sud dans les océans Atlantique, Indien et Pacifique. La figure 5 montre les distributions moyennes estimées des concentrations de  $\text{CO}_2$  d'origine anthropique le long des mêmes transects.

Les données permettent d'estimer que, globalement, les océans ont accumulé  $112 (\pm 17)^{28}$  petagrammes de carbone (Pg C) depuis le début de l'ère industrielle, soit  $118 (\pm 19)^{29}$  Pg C entre 1800 – 1994, correspondant à une absorption d'à peu près 29% des émissions totales de  $\text{CO}_2$  provenant entre autres des combustibles fossiles, du changement d'utilisation des terres et de l'industrie du ciment dans les dernières 250 années<sup>30, 31</sup>. Une absorption annuelle du

25 Feely, R. A., Sabine, L., Takahashi, T., Wanninkhof, R. (2001). Uptake and Storage of Carbon Dioxide in the Ocean: The Global  $\text{CO}_2$  Survey. *Oceanography*, Vol. 14(4): pp. 18–32

26 Raven, J.A., Falkowski, P.G. (1999) Oceanic sinks for atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Plant, Cell and Environment*. Vol 22. pp. 741–755

27 Ito, T., Follows, M. J. (2003). Upper ocean control on the solubility pump of  $\text{CO}_2$ . *Journal of Marine Research*, 61:485–489.

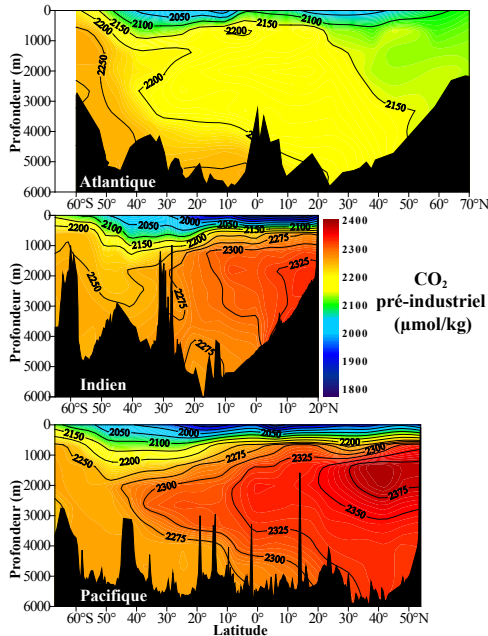
28 Lee, et al. (2003). An updated anthropogenic  $\text{CO}_2$  inventory in the Atlantic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles* 17, 1116

29 Sabine, C. L., Freely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., Bullister, J. L., et al. (2004). The oceanic sink for  $\text{CO}_2$ . *Science*, 305:367–371.

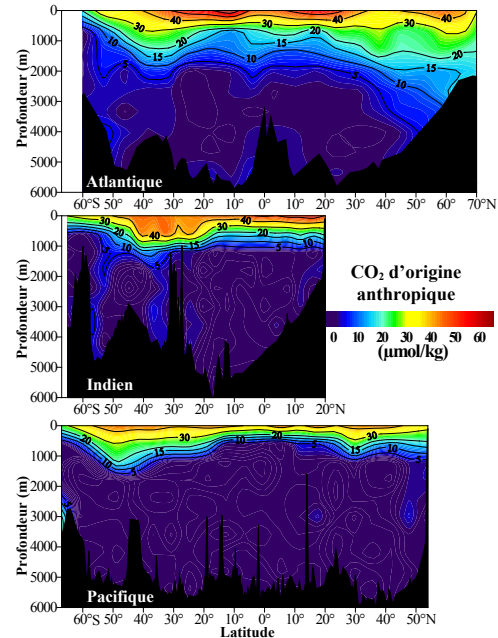
30 Lee, et al. (2003). An updated anthropogenic  $\text{CO}_2$  inventory in the Atlantic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles* 17, 1116

31 Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., Bullister, J. L., et al. (2004). The oceanic sink for  $\text{CO}_2$ . *Science*, 305:367–371.





**FIGURE 4:** Distributions préindustrielles moyennes par zones du carbone inorganique dissous (en  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) le long de transects nord-sud dans les océans Atlantique, Indien et Pacifique. *Source: Feely, R. A., Sabine, L., Takahashi, T., Wanninkhof, R. (2001). Uptake and Storage of Carbon Dioxide in the Ocean: The Global CO<sub>2</sub> Survey. Oceanography 14(4): pp. 18–32.*



**FIGURE 5:** Distributions moyennes par zones des concentrations de CO<sub>2</sub> anthropique estimées (en  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) le long de transects nord-sud dans les océans Atlantique, Indien et Pacifique. *Source: Feely, R. A., Sabine, L., Takahashi, T., Wanninkhof, R. (2001). Uptake and Storage of Carbon Dioxide in the Ocean: The Global CO<sub>2</sub> Survey. Oceanography 14(4): pp. 18–32.*

CO<sub>2</sub> d'origine anthropique par les océans de  $2,2 (\pm 0,4) \text{ Pg C an}^{-1}$  entre 1990-1999 a permis d'estimer à 24% la part des émissions anthropiques totales absorbées par le puits océanique entre 2000-2006<sup>32</sup>.

Les pénétrations les plus importantes de carbone d'origine anthropique ont été observées dans les zones de formation des eaux profondes et intermédiaires, comme l'Atlantique nord, et l'océan Austral 40–50°S. La figure 5 montre que le signal de CO<sub>2</sub> d'origine anthropique peut être retrouvé à 2500m de profondeur dans certaines zones, mais des études plus récentes dans l'Atlantique nord ont révélé d'importants changements de taux de concentration de CO<sub>2</sub> dans les masses d'eau profondes situées entre 3000 et 5000m de profondeur, montrant que le signal de CO<sub>2</sub> a peut-être déjà atteint cette profondeur à certains endroits<sup>33</sup>.

Selon la position et les courants océaniques, le CO<sub>2</sub> peut être retenu dans les eaux profondes pendant des centaines (voire un millier) d'années<sup>34, 35</sup>. Une quantité équivalente de CO<sub>2</sub> est dès lors temporairement enlevée (séquestrée) à l'atmosphère pendant cette période. L'upwelling des eaux océaniques profondes entraîné par le vent ou la topographie ramène vers la surface des eaux chargées en CID, résultant souvent en un efflux de CO<sub>2</sub> vers l'atmosphère.

32 Canadell *et al.*, 2007: Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks, in Proceedings of the National Academy of Science 104:47:18866–18870, doi: 10.1073/pnas.0702737104

33 Tanhua, T., Körtzinger, A., Friis, K., Waugh, Wallace, D.W.R. (2007). An estimate of anthropogenic CO<sub>2</sub> inventory from decadal changes in oceanic carbon content. Proceedings of the National Academy of Sciences. Vol. 104 (9). pp. 3037–3042

34 IPCC (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp

35 Chisholm, S. W. (2000). Oceanography: Stirring times in the Southern Ocean. Nature 407. pp. 685–687

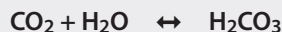
On estime que la contribution de la pompe de solubilité à la distribution/gradient vertical(e) du CID est d'environ 20% ; les autres 80% sont fournis par la(les) pompe(s) biologique(s)<sup>36</sup>. Il faut noter qu'une hausse des températures à la surface de la mer liée aux changements climatiques entraînera une diminution de la solubilité du CO<sub>2</sub>. Divers modèles climatiques prédisent une augmentation de la température des océans au cours du siècle<sup>37</sup>, entraînant une absorption moindre du CO<sub>2</sub> à la surface. Les modèles suggèrent une forte corrélation entre l'efficacité de la pompe de solubilité et les températures moyennes à la surface et dans les eaux profondes océaniques<sup>38</sup>. À long-terme, il est possible que la solubilité du CO<sub>2</sub> puisse ralentir, voire interrompre, la pompe de solubilité des océans. Une circulation océanique plus lente ou une plus grande stratification liée à la densité, deux effets que l'on peut anticiper d'un climat plus chaud, ralentiraient le flux vertical du carbone, de l'alcalinité et des nutriments, ainsi que le réapprovisionnement de la surface des océans en eau n'ayant pas encore été en contact avec du CO<sub>2</sub> anthropique<sup>39</sup>. Ceci aurait une influence importante sur la capacité des océans à absorber le carbone.

Une étude conclut en effet qu'en dépit d'un taux moyen de  $\sim 5,0 \pm 0,6$  Pg C an<sup>-1</sup> d'accumulation de carbone par les puits dans les sols et les océans depuis l'an 2000, certains grands puits régionaux se sont affaiblis. Dans l'océan Austral par exemple, le puits de CO<sub>2</sub> a diminué de 0,8 Pg C an<sup>-1</sup> entre 1981 et 2004<sup>40</sup>. On pense que le déplacement vers les pôles et l'intensification des vents d'ouest causés par l'activité humaine ont intensifié la ventilation des eaux riches en carbone de l'océan Austral, normalement isolées de l'atmosphère, du moins depuis 1980, contribuant ainsi à près de la moitié de la diminution de l'absorption de CO<sub>2</sub> par les océans estimée par les modèles<sup>41</sup>. Une diminution rapide du pouvoir tampon du CO<sub>2</sub> a aussi pu être observée dans la mer du Nord<sup>42</sup>.

### Le système des carbonates océaniques

Il existe quatre formes principales de molécules de CO<sub>2</sub> dans l'eau de mer: la forme indissociée (CO<sub>2</sub> (aq)) et l'acide carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), ainsi que deux formes ioniques, le bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et le carbonate (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) (voir Tableau 1 et Figure 6). La proportion de chacune des composantes du carbone dans l'eau de mer dépend de la température, de la composition chimique et de la pression, et par conséquent de la latitude et de la profondeur, causant ainsi des variations dans la chimie du carbonate dans sa réponse à l'absorption du CO<sub>2</sub> par les océans<sup>43</sup>. La différence entre la pression partielle du CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) dans l'eau de mer de surface et celle de l'air sus-jacent fournit le potentiel thermodynamique gouvernant le transfert de CO<sub>2</sub> à travers la surface de la mer<sup>44,45</sup>.

Lors de sa dissolution dans l'eau de mer de surface, le CO<sub>2</sub> réagit avec l'eau pour former un acide carbonique faible (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).



- 36 Feely, R. A., Sabine, L., Takahashi, T., Wanninkhof, R. (2001). Uptake and Storage of Carbon Dioxide in the Ocean: The Global CO<sub>2</sub> Survey. *Oceanography*, Vol. 14(4): pp. 18–32
- 37 Matthews, H. D. and Caldeira, K. (2008). Stabilizing climate requires near-zero emissions. *Geophysical Research Letters* 35, L04705
- 38 Cameron, D. R., Lenton, T. M., Ridgwell, A. J., Shepherd, J. G., Marsh, R., and Yool, A. (2005). A factorial analysis of the marine carbon cycle and oceanic circulation controls on atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Biogeochemical Cycles* 19, GB4027
- 39 IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, USA
- 40 Le Quéré, Corinne, Rodenbeck, Christian, Buitenhuis, Erik T., Conway, Thomas J., Langenfelds, Ray, Gomez, Antony, Labuschagne, Casper, Ramonet, Michel, Nakazawa, Takakiyo, Metzl, Nicolas, Gillett, Nathan, and Heimann, Martin (2007). Saturation of the Southern Ocean CO<sub>2</sub> Sink Due to Recent Climate Change. *Science* 1136188.
- 41 Canadell *et al.*, 2007: Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks, in *Proceedings of the National Academy of Science* 104:47:18866–18870, doi: 10.1073/pnas.0702737104
- 42 Thomas, H., Prowe, A. E. F., van Heuven, S., Bozec, Y., De Baar, H. J. W., Schiettecatte, L.-S., Suykens, K., Koné, M., Borges, A. V., Lima, I. D., and Doney, S. C. (2007). Rapid decline in CO<sub>2</sub> buffering capacity in the North Sea and implications for the North Atlantic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles* 21, GB4001.
- 43 Veron, J. E. N. (2008) Mass extinctions and ocean acidification: biological constraints on geological dilemmas. *Coral Reefs* 27:459–472.
- 44 Feely, R. A., Sabine, C. L., Takahashi, T., Wanninkhof, R. (2001). Uptake and storage of Carbon Dioxide in the Ocean: The Global CO<sub>2</sub> Survey. Special Issue – JGOFS, *Oceanography* Vol 14 (4).
- 45 Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., Bullister, J. L., *et al.* (2004). The oceanic sink for CO<sub>2</sub>. *Science*, 305:367–371.

L'acide carbonique se dissocie en ions de bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) et d'hydrogène ( $\text{H}^+$ ). Le dégagement d'ions d'hydrogène réduit le pH (soit une augmentation de l'acidité) dans les eaux environnantes.



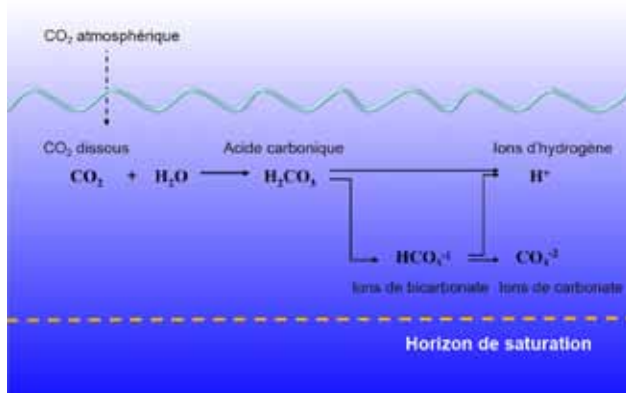
L'excès d'ions d'hydrogène ( $\text{H}^+$ ) réagit avec les ions de carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) pour former des ions de bicarbonate.



L'acidité des océans est déterminée par la concentration d'ions d'hydrogène; plus il y a d'ions, plus les conditions sont acides, représentées par un pH plus bas.

Le taux de  $\text{CO}_2$  dissous dans les eaux de surface aura donc une forte influence sur l'acidité et le pH des océans<sup>46</sup>. D'après la loi de Henry<sup>47</sup>, une augmentation de concentration de  $\text{CO}_2$  atmosphérique liée par exemple aux émissions anthropiques entraînera une augmentation correspondante de  $\text{pCO}_2$  à la surface de l'océan<sup>48</sup>.

La proportion d'ions de  $\text{HCO}_3^-$ , de  $\text{CO}_3^{2-}$  et de  $\text{CO}_2$  dans l'eau de mer par rapport au pH est illustré dans le tableau 1. Dans les conditions océaniques actuelles, le bicarbonate est la forme la plus abondante de  $\text{CO}_2$  dissous dans l'eau de mer. Une absorption accrue du  $\text{CO}_2$  à la surface de l'océan augmentera à la fois les concentrations d'ions de bicarbonate et d'hydrogène, et diminuera en même temps la disponibilité des ions de carbonate<sup>49</sup>, nécessaires à la formation du squelette et de la coquille à base de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) des organismes marins tels que les coraux, les crustacés et le plancton marin<sup>50</sup>.



**FIGURE 6:** Réaction entre le  $\text{CO}_2$  et l'eau de mer. *Source: D'après Doney, 2006*<sup>51</sup>.

46 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

47 La loi de Henry établit que "À température constante, la quantité de gaz dissous dans un liquide est directement proportionnelle à la pression partielle qu'exerce ce gaz sur le liquide".

48 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

49 The Antarctic Climate and Ecosystems Cooperative Research Centre. (2008). Position Analysis:  $\text{CO}_2$  and climate change: ocean impacts and adaptation issues. [www.acecrc.org.au/uploaded/117/797618\\_20pa02\\_acidification\\_0805.pdf](http://www.acecrc.org.au/uploaded/117/797618_20pa02_acidification_0805.pdf).

50 Feely, R. A., Sabine, C. L., Hernandez-Ayon, J. M., Lanson, D., Hales, B. (2008). Evidence for Upwelling of Corrosive "Acidified" Water onto the Continental Shelf. *Science*, Vol320:1490 -1492.

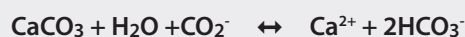
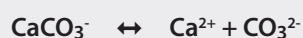
51 Doney, S. C. (2006). The Dangers of Ocean Acidification. *Scientific American* March 2006. [www.sciam.com](http://www.sciam.com)

**TABLEAU 1.** Formes de carbone inorganique dissous (CID) dans l'eau de mer.

Carbone inorganique dissous (CID) dans l'eau de mer		% de la composante CID à un pH de 8,2 <sup>52</sup> .	% de la composante CID à un pH de 8,1 <sup>53</sup>	Effet net sur le CID d'une addition de CO <sub>2</sub> dans les eaux de surface
Ion de bicarbonate	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	88	91	Augmentation
Ion de carbonate	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	11	8	Diminution
Dioxyde de carbone aqueux (y compris le H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	CO <sub>2(aq)</sub>	0.5	1.0	Augmentation

### Minéralisation et dissolution du carbonate de calcium

La “contre-pompe” de CaCO<sub>3</sub> décrit les effets de la production et de la dissolution des matériaux à base de carbonate de calcium (par exemple les coquilles calcaires des organismes planctoniques) sur l'alcalinité et le pH de l'eau de mer. Comme montré auparavant, la contre-pompe de CaCO<sub>3</sub> et la pompe organique de carbone (pompe biologique), en conjonction avec la pompe de solubilité, sont des mécanismes permettant à l'océan d'influencer les concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique (voir Figure 3)<sup>54</sup>. Les réactions chimiques principales de la formation minérale et de la dissolution du carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) sont les suivantes:



Le carbonate de calcium se forme de droite à gauche, et se dissout de gauche à droite. La calcification et la dissolution ont un impact à la fois sur le CID et sur la capacité de l'eau de mer à neutraliser les acides (alcalinité totale (A<sub>T</sub>)). À l'échelle globale, le CaCO<sub>3</sub> joue un double rôle dans la régulation de la séquestration du carbone par les océans. L'équilibre entre les processus de précipitation et de dissolution du CaCO<sub>3</sub> est influencé par les concentrations de CO<sub>2</sub> dans les eaux de surface<sup>55</sup>. La précipitation du CaCO<sub>3</sub> dans l'océan supérieur due à l'élaboration de squelettes calcaires par les organismes marins crée des conditions moins alcalines, réduisant ainsi la capacité de l'océan supérieur à absorber le CO<sub>2</sub> atmosphérique<sup>56</sup>, alors qu'une diminution de la production de l'océan supérieur, ou bien la dissolution des carbonates marins en profondeur, y compris celle des calcites magnésiennes biogéniques (provenant des algues corallines), de l'aragonite (provenant des coraux et des ptéropodes), et de la calcite (provenant des coccolithophoridés et des foraminifères), ont pour effet d'élever le pH et d'augmenter la capacité des océans à absorber et à stocker le CO<sub>2</sub> provenant de l'atmosphère<sup>57</sup>. Or ces deux réactions étant sensibles à la température et à la pression, l'équilibre se situe donc plus vers la gauche dans le cas de mers plus chaudes et moins profondes (minéralisation), tandis que l'équilibre tend vers la droite dans les mers plus profondes et plus froides (dissolution). Il faut aussi remarquer que jusqu'à 60 - 80% du CaCO<sub>3</sub> exporté des eaux de surface peut être dissous dans les 1000m supérieurs de la colonne d'eau<sup>58</sup>.

52 Fabry, V. J., Seibel, B. A., Feely, R. A., Orr, J. C. (2008). Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science*, 65:414–432.

53 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

54 IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. (Chapter 7: Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry) Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, USA.

55 Kleypas, J. A., Buddemeier, R. W., Archer, D., Gattuso, J. P., Langdon, C., Opdyke, B. N. (1999). Geochemical Consequences of Increased Atmospheric Carbon Dioxide on Coral Reefs. *Science*, Vol 284:118–120.

56 Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L., Robbins, L. L. (2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18–20 April 2005, St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S Geological Survey, 88 pp.

57 Feely, R. A., Sabine, C. L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V. J., Millero, F. J. (2004). Impact of anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> system in the oceans. *Science*, 305:362–365.

58 Ibid.

### ***L'effet tampon des carbonates***

La réaction du CO<sub>2</sub> avec l'eau de mer pour se dissocier en CO<sub>2</sub> (aq) et en CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> et en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, signifie que l'augmentation résultante de la concentration en CO<sub>2</sub> gazeux de l'eau de mer est en fait inférieure au taux de CO<sub>2</sub> absorbé par l'eau de mer. Cet "effet tampon chimique" est le processus océanique contribuant quantitativement le plus au puits de carbone de l'océan<sup>59</sup>, et permet de maintenir le pH basique de l'eau de mer dans une tranche de valeurs assez restreintes, en dépit de l'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique. L'effet tampon n'est cependant pas une fonction constante, mais dépend, entre autres, des changements de pCO<sub>2</sub> et du rapport entre le CID et l'A<sub>T</sub>. On prédit qu'alors que l'alcalinité des océans diminuera en raison de l'absorption du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, et que le pCO<sub>2</sub> de surface augmentera, l'effet tampon global des océans vis-à-vis du CO<sub>2</sub> diminuera, avec des conséquences potentiellement graves<sup>60</sup>.

### ***Horizon de saturation du carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>)***

On sait que l'effet tampon abaisse le degré de saturation de l'eau de mer ("état de saturation ( $\Omega$ )") en minéraux de carbonate tels que la calcite et l'aragonite, avec des effets sur la stabilité et le taux de production de ces composantes essentielles<sup>61,62</sup>. Une supersaturation en aragonite et en calcite ( $\Omega > 1$ ) de l'eau de mer, comme c'est le cas actuel pour toutes les eaux de surface océaniques, favorisera la formation de coquilles et de squelettes. Inversement, une sous-saturation de l'eau de mer vis-à-vis de ces minéraux ( $\Omega < 1$ ) la rend corrosive, et entraîne un risque croissant de dissolution de la coquille des organismes calcifiants<sup>63</sup>. Le CaCO<sub>3</sub> devient plus soluble à mesure que la température baisse et que la pression augmente, donc en fonction de la profondeur de l'océan, où se crée ainsi une frontière naturelle surnommée "l'horizon de saturation", au-dessus duquel le CaCO<sub>3</sub> peut se former, mais en dessous duquel il se dissout aisément<sup>64</sup>. L'horizon de saturation se situe à une profondeur variant entre 200m à certaines hautes latitudes et dans l'océan Indien, et 3 500m dans l'océan Atlantique<sup>65</sup>.

La profondeur de l'horizon de saturation ( $\Omega = 1$ ) de l'aragonite, qui est une forme plus soluble de CaCO<sub>3</sub>, est naturellement beaucoup moins profonde que celle de la calcite, comme le montre la figure 7<sup>66</sup>. Lorsque l'acidité de l'océan liée au CO<sub>2</sub> augmente, les ions de carbonate sont éliminés du système par l'effet tampon du carbonate (voir ci-dessus), et l'horizon de saturation remonte vers les eaux de surface, un processus surnommé le "shoaling". La remontée de ces horizons de saturation et la dissolution résultante des carbonates sédimentaires est l'un des mécanismes tampon importants à long terme permettant la restauration du pH des océans. Cependant, ce processus fonctionne à des échelles millénaires et ne sera effectif que lorsque le CO<sub>2</sub> anthropique sera transporté à ces profondeurs de saturation par la circulation océanique<sup>67</sup>. La remontée de l'horizon de saturation réduit l'habitat disponible aux organismes calcifiants qui dépendent des minéraux de carbonate, avec des conséquences sur la productivité et le fonctionnement des écosystèmes, ainsi que les services fournis, en particulier pour les espèces d'eaux froides et profondes tels que les coraux d'eaux froides.

59 IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, USA

60 Ibid.

61 Zeebe, R. E., Zachos, J. C., Tyrrell, T. (2008) Carbon emissions and Acidification. *Science* Vol 321:51-52.

62 Fabry, V. J. (2008). Marine Calcifiers in a High-CO<sub>2</sub> Ocean. *Science* Vol 320:1020-1022.

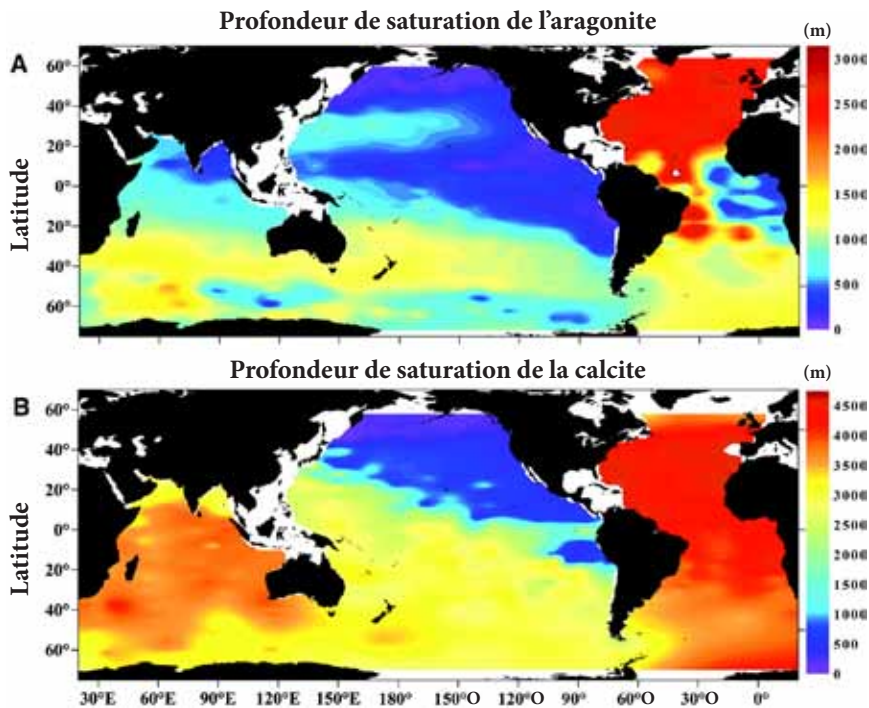
63 Feely *et al* (1988). *Mar. Chem.* 25:227.

64 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

65 IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, USA

66 Feely, R. A., Sabine, C. L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V. J., Millero, F. J. (2004). Impact of anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> system in the oceans. *Science*, 305:362-365.

67 Montenegro *et al*, Brovkin, A., V., Eby, M., Archer, D., and Weaver, A. J. (2007), Long term fate of anthropogenic carbon, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L19707, doi:10.1029/2007GL030905



**FIGURE 7:** Distribution de la profondeur de saturation ( $\Omega=1$ ) de l'aragonite (A) et de la calcite (B) dans les océans de la planète. *Source: Feely et al. 2004<sup>68</sup>. L'effet de pression sur la solubilité est estimé à partir de l'équation de Mucci<sup>69</sup> qui inclut les ajustements aux constantes recommandées par Millero<sup>70</sup>. La profondeur à laquelle l'aragonite et la calcite sont en équilibre thermodynamique s'appelle la profondeur de saturation. Lorsque le degré de saturation est supérieur à 1, l'eau de mer est sursaturée en aragonite et en calcite; inversement, l'eau de mer est sous-saturée vis-à-vis de ces minéraux lorsqu'il est <1. Cette profondeur est beaucoup moindre pour l'aragonite que pour la calcite, parce que l'aragonite est plus soluble dans l'eau de mer que la calcite.*

Certaines études de laboratoire et de terrain ont relevé que le degré de saturation a un effet très important sur les taux de calcification des espèces et des communautés, aussi bien dans les habitats planctoniques que benthiques, car une baisse de pH réduit la saturation de l'eau de mer, rendant la calcification plus difficile (plus coûteuse en énergie) pour les organismes marins et affaiblissant les structures déjà élaborées (voir Section III). Le  $\text{CaCO}_3$  rend les organismes calcifiants plus denses ("ballast minéral") et augmente la vitesse de chute du carbone organique particulaire mort et en décomposition. Une diminution de la calcification réduit la quantité de ballast disponible pour la sédimentation de la matière organique et du  $\text{CaCO}_3$ , ce qui impacte sur la pompe biologique et la séquestration du carbone à l'intérieur de l'océan<sup>71</sup>.

68 Feely, R. A., Sabine, C. L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V. J., Millero, F. J. (2004). Impact of anthropogenic  $\text{CO}_2$  on the  $\text{CaCO}_3$  system in the oceans. *Science*, 305:362–365.

69 A. Mucci, *Am. J. Sci.* 238, 780 (1983).

70 F. J. Millero, *Geochim. Cosmochim. Acta* 59, 661 (1995).

71 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

## II. SITUATION MONDIALE ET TENDANCES DE L'ACIDIFICATION DES OCÉANS

La concentration atmosphérique mondiale de CO<sub>2</sub>, à partir d'un taux préindustriel d'environ 280 parties par million (ppm), a atteint 384 ppm en 2007<sup>72</sup> (~387 ppm en 2009<sup>73</sup>), augmentation dont la moitié est advenue pendant les 30 dernières années<sup>74</sup>. On pense que la concentration actuelle de CO<sub>2</sub> atmosphérique est la plus élevée que la planète ait connue depuis 800 000 ans<sup>75</sup>. Cependant, si le CO<sub>2</sub> d'origine anthropique n'avait pas été absorbé par les océans, le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique excéderait le taux actuel de ~55 ppm, et les effets des changements climatiques mondiaux seraient plus marqués<sup>76</sup>. L'absorption du CO<sub>2</sub> par les océans a beau modérer les effets des changements climatiques mondiaux, la chimie de l'océan se transforme à une allure rapide et sans précédent<sup>77</sup>.

Les eaux océaniques de surface sont légèrement alcalines, avec un pH global moyen de ~8,1 sur l'échelle de l'eau de mer<sup>78</sup>. Depuis 250 ans, le pH moyen à la surface de la mer a baissé d'environ 0,1 unité de pH, soit une augmentation de 30% des ions d'hydrogène—une acidification considérable des océans<sup>79</sup>. Les prévisions annoncent une augmentation de la concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique de 0,5-1,0% par an au cours du 21<sup>e</sup> siècle<sup>80,81</sup>. Une augmentation de l'acidification des océans fait directement suite (bien qu'avec un délai) aux émissions croissantes de CO<sub>2</sub> dans le monde, et l'ampleur de l'acidification des océans peut être anticipée avec un très haut degré de précision, basé sur les réactions chimiques complexes mais prévisibles du carbonate dans la mer et des cycles décrits dans la section précédente. Concurrentement à un abaissement du pH dans les eaux de surface, il se produira un changement important dans la chimie du carbonate (lié aux changements de pCO<sub>2</sub>, de pH, d'AT et aux états de saturation des minéraux), impliquant une diminution de la concentration des ions de carbonate<sup>82</sup>. Les effets de l'acidification des océans sur les organismes et écosystèmes marins sont beaucoup moins clairs<sup>83</sup>.

L'exemple géologique se rapprochant le plus des concentrations actuelles de CO<sub>2</sub> atmosphérique est le maximum thermique du Paleocène-Eocène (MTPE), un phénomène survenu il y a 55 millions d'années. Une acidification des océans marquée s'est produite durant cette période, associée à un apport rapide et considérable de carbone dans le système océan-atmosphère. Cet événement a été caractérisé par une remontée de 2km de l'horizon de saturation profond de la calcite, et par une augmentation rapide de la température de la surface de la mer de 5–9°C sur une période de 1000-2000 ans, produisant des changements dans les communautés planctoniques marines<sup>84,85</sup>. Les

72 Solomon, S., Quinn, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. (eds) (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.

73 Feely pers comm.

74 Inter-Academy Panel on International Issues (IAP). 2009. Statement on Ocean Acidification. Endorsed, June 2009. [www.interacademies.net/CMS/9075.aspx](http://www.interacademies.net/CMS/9075.aspx)

75 Luthi, D., Le Floch, M., Bereiter, M., Blunier, T., Barnola, J. M., *et al.* (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000 – 800,000 years before present. *Nature* 453:379–382.

76 Solomon, S., Quinn, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. (eds) (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.

77 Turley, C. M., Roberts, J. M., Guinotte, J. M. (2007). Corals in deepwater: will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems. *Coral Reefs* 26:445–448.

78 Feely, R. A., Doney, S. C., and S.R. Cooley (2009), Ocean Acidification: Present conditions and future changes in a high-CO<sub>2</sub> world, *Oceanography*, submitted for publication.

79 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

80 Guinotte, J., Fabry, V. J. (2009) The Threat of Acidification to Ocean Ecosystems. *The Journal of Marine Education*, Vol, 25 (1):2–7.

81 Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L., Robbins, L. L. (2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18–20 April 2005, St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S Geological Survey, 88 pp.

82 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

83 Ibid.

84 Kennett, J. P., Stott, L. D. (1991). Abrupt deep-sea warming, paleoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Paleocene. *Nature*, 353:225–229.

85 Zachos, J. C., Rohl, U., Schellenberg, S. A., Sluijs, A., Hodell, D. A., *et al.* (2003). Rapid acidification of the ocean during the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Science*, 308:1611–1615.

extinctions de masse ont uniquement touché les foraminifères benthiques, mais on ne sait pas si la cause principale fut l'acidification des océans ou bien une anoxie des eaux de fond due aux changements de la circulation océanique<sup>86</sup>. L'évolution de la vie sur terre depuis la fin de la période ordovicienne (il y a 434 millions d'années) a été largement influencée par les cinq extinctions massives d'espèces qui ont eu lieu, avec un impact majeur sur les écosystèmes des récifs coralliens. Les causes auxquelles on attribue chaque extinction massive d'espèces peuvent être regroupées entre celles n'ayant aucun lien avec le cycle du carbone, telles la destruction physique directe, la maladie et la perte de biodiversité, et celles liées au cycle du carbone, comme la pluie acide. Une étude faite par Veron indique qu'il y a des rapports entre les causes primaires de chacun de ces événements et une perturbation générale du cycle du carbone, en particulier les changements dans la chimie océanique, et qu'il existe un lien très clair avec les niveaux de CO<sub>2</sub> atmosphérique<sup>87</sup>.

Le registre fossile des organismes benthiques calcifiés comprenant les coraux de récifs et les algues calcaires montre une interruption marquée au début de la période triassique (il y a 250 millions d'années), alors que les concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique augmentaient considérablement jusqu'à des teneurs cinq fois plus élevées que celles de nos jours<sup>88</sup>, et il fallut des centaines de milliers d'années pour qu'une restauration se fasse<sup>89</sup>. Selon les prévisions, le pH océanique en 2050 sera plus bas qu'il ne l'a été depuis environ 20 millions d'années<sup>90</sup>, et les leçons tirées de l'histoire de notre planète suscitent des craintes que l'acidification des océans puisse engendrer une sixième extinction massive d'espèces, indépendamment des extinctions d'origine anthropique actuelles<sup>91</sup>.

L'acidification des océans est un problème mondial. Néanmoins, les influences régionales et saisonnières, en conjonction avec les facteurs biologiques, chimiques et physiques (soit la chimie du carbonate, la productivité biologique et les effets de la température sur la solubilité du CO<sub>2</sub>), ont un impact sur l'absorption du CO<sub>2</sub>, avec pour résultat une couche de surface mélangée à pH variable et une acidification globale des océans variant de  $\pm 0,3$  unité de pH, soit d'un pH de 7,90 à un pH de 8,20<sup>92</sup>. On peut observer des variations importantes allant d'un pH de 7,3 à l'intérieur des estuaires profonds, à un pH de 8,6 dans les floraisons productives littorales de plancton, allant jusqu'à un pH de 9,5 dans les flaques résiduelles. Les concentrations les plus élevées de CO<sub>2</sub> d'origine anthropique se situent dans les eaux proches de la surface, parce que le CO<sub>2</sub> anthropique pénètre l'océan par un échange gazeux à l'interface air-mer<sup>93</sup>.

## A. LES EAUX DE SURFACE DES RÉGIONS DE HAUTE LATITUDE

La solubilité du CO<sub>2</sub> étant plus élevée dans les eaux plus froides, celles-ci retiennent naturellement plus de CO<sub>2</sub> et sont plus acides que les eaux plus chaudes<sup>94</sup>. Il semble qu'avec l'augmentation des concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique ce seront les eaux de surface des océans de haute latitude qui seront les premières à devenir sous-saturées

86 Zachos, J. C., Dickens, G. R., Zeebe, R. E. (2008). An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon cycle dynamics. *Nature*, 451:279–83.

87 Veron, J. E. N. (2008) Mass extinctions and ocean acidification: biological constraints on geological dilemmas. *Coral Reefs* 27:459–472.

88 Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., and Hatziolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737–1742.

89 MCCIP (2009). Marine Climate Change Ecosystem Linkages Report Card 2009. (Eds. Baxter, J. M., Buckley, P. J., Frost, M. T.), Summary Report, MCCIP, Lowestoft, 16pp.

90 Turley, C. M., Roberts, J. M., Guinotte, J. M. (2007). Corals in deepwater: will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems. *Coral Reefs* 26:445–448.

91 Veron, J. E. N. (2008) Mass extinctions and ocean acidification: biological constraints on geological dilemmas. *Coral Reefs* 27:459–472.

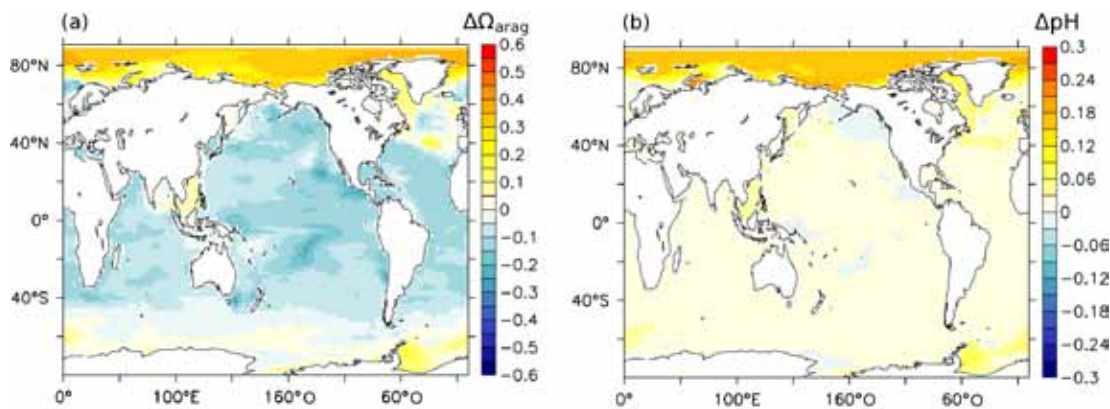
92 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

93 Sabine, C. L., Freely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., Bullister, J. L., *et al.* (2004). The oceanic sink for CO<sub>2</sub>. *Science*, 305:367–371.

94 Guinotte, J. M., Fabry, V. J. (2008). Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1134: 320.



en carbonate de calcium<sup>95</sup>. Les modèles de CO<sub>2</sub> atmosphérique incluant la circulation océanique et les variations géographiques de température indiquent que la partie froide du sud de l'océan Austral est particulièrement vulnérable aux changements d'état de saturation des carbonates en vue des taux de saturation actuels peu élevés<sup>96</sup>, de l'uniformité des températures et de l'ampleur du mélange dans la colonne d'eau. Les modèles à l'échelle de la planète indiquent qu'aux taux actuels d'émissions, les eaux de surface de l'océan Austral deviendront sous-saturées en aragonite d'ici 2050, et que d'ici 2100 cette sous-saturation pourrait s'étendre à tout l'océan Austral et à l'océan Pacifique nord subarctique. La concentration moyenne d'ions de carbonate à la surface de l'océan aurait alors diminué de presque 50%<sup>97</sup>. Les fluctuations saisonnières de la saturation du carbonate donnent à entendre que la sous-saturation hivernale vis-à-vis de l'aragonite pourrait se produire plus tôt, avant 2030 selon l'un des modèles, et pas plus tard que 2038 d'après le scénario de *status quo* du GIEC<sup>98</sup>. Ces prédictions suggèrent que les conditions néfastes à la continuation du bon fonctionnement des écosystèmes marins, et plus particulièrement des organismes calcifiants, pourraient se produire à une échelle beaucoup plus courte que celle envisagée jusqu'à présent<sup>99</sup>, et que le commencement de l'acidification future des océans dépendra de la variabilité naturelle de la dynamique du carbone.



**FIGURE 8.** Différence entre la saturation de surface de l'aragonite (a) et le pH (b) anticipés par la simulation du Rapport Spécial sur les émissions Scénario A2 (émissions moyennes-basses) avec ou sans réchauffement, avec une moyenne calculée pour la décennie 2090-2099. Les valeurs positives indiquent une acidification augmentée par les changements climatiques, les valeurs négatives indiquent une acidification réduite. Source: Steinacher, et al. (2009)<sup>100</sup>.

Des prévisions récentes suggèrent que les changements de pH les plus importants au cours de ce siècle se produiront dans les eaux de surface de l'océan Arctique, où la concentration d'ions d'hydrogène pourrait augmenter de 185% (au maximum) (un abaissement de pH de 0,45 unité) si les émissions anthropiques suivent les tendances actuelles<sup>101</sup>. Dans cette éventualité, une moyenne annuelle arctique de  $\Omega_{\text{arag}} < 1$  sera obtenue en 2032, et atteindra  $\Omega_{\text{arag}} < 0,75$  avant 2060 (Figure 8). Ceci signifie que les eaux deviendront corrosives pour les calcifères arctiques tels que les ptéropodes (escargots planctoniques à coquille) et pour les bivalves tels que les palourdes, qui jouent un rôle fondamental dans les réseaux trophiques marins arctiques<sup>102</sup>. De plus, les conséquences anticipées des changements

95 Cao, L., Caldeira, K. (2008). Atmospheric CO<sub>2</sub> Stabilization and Ocean Acidification. *Geophys. Res. Lett.* Vol 35:LI9609.

96 OSPAR Commission (2006). Effects of the marine environment of ocean acidification resulting from elevated levels of CO<sub>2</sub> in the atmosphere.

97 Feely, R. A. Ocean Acidification Along the West Coast of North America. Part of Ocean Acidification: The Other Climate Change Story – Year of Science 2009 website [www.yearofscience2009.org](http://www.yearofscience2009.org).

98 McNeil, B. I., and R. J. Matear (2008), Southern Ocean acidification: A tipping point at 450-ppm atmospheric CO<sub>2</sub>, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, \_105(48), 18860–18864 doi:10.1073/pnas.0806318105

99 Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., et al. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437:681–686.

100 Steinacher, M., Joos, F., Frölicher, T. L., Plattner, G.-K., Doney, S. C. (2009). Imminent ocean acidification in the Arctic project with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model. *Biogeosciences*, 6:515–533.

101 Ibid.

102 Inter-Academy Panel on International Issues (IAP). 2009. Statement on Ocean Acidification. Endorsed, June 2009. [www.interacademies.net/CMS/9075.aspx](http://www.interacademies.net/CMS/9075.aspx)

climatiques (rafraîchissement et retraite des glaces marines) pendant cette période risquent d'accroître la diminution de la saturation moyenne et du pH des eaux de surface arctiques de plus de 20%<sup>103</sup>.

Des séries temporelles d'observations faites dans la mer d'Islande entre 1985 et 2008 confirment les conclusions des modèles, montrant une diminution hivernale du pH des eaux de surface de 0,0024 an<sup>-1</sup>, 50% plus rapide que celle des séries temporelles relevées aux stations subtropicales, et un taux de changement plus rapide que celui observé sous un régime d'eau profonde (>1500m)<sup>104</sup>. La mer d'Islande est une source importante pour l'Eau Profonde Nord Atlantique, qui abrite des coraux d'eaux froides à haute importance écologique, extrêmement sensibles à l'environnement ambiant et ayant des paramètres de croissance restreints<sup>105</sup>.

La remontée vers la surface ou « shoaling » de l'horizon de saturation de l'aragonite liée à l'absorption rapide du CO<sub>2</sub> anthropique est prévue dans toutes les eaux polaires pendant le siècle actuel<sup>106</sup>. L'horizon de saturation de l'aragonite dans l'océan Arctique profond se situe actuellement à 2500m, tandis que l'horizon dans la mer d'Islande se situe à une profondeur de 1750m et remonte de 4m par an<sup>107</sup>. En raison d'une élévation localisée du fond de la mer dans la mer d'Islande, 800km<sup>2</sup> supplémentaires de fond océanique, jusqu'alors baignés par des eaux saturées, deviennent exposés chaque année à des conditions de sous-saturation<sup>108</sup>. Dans la partie est de l'Atlantique sud et nord, l'horizon de saturation de l'aragonite est déjà remonté de jusqu'à 150m dans certains endroits. Par conséquent il existe peu de compte-rendus de coraux d'eaux froides formant des structures dans le Pacifique nord, où l'horizon de saturation de l'aragonite est peu profond (50-600m), suggérant donc que l'état de saturation limite la distribution des coraux sclératiniaires (rocheux, formant les récifs) et les taux de calcification<sup>109</sup>.

## B. LES EAUX DE SURFACE DES RÉGIONS TEMPÉRÉES

Il existe peu d'informations empiriques publiées sur la dynamique du pH océanique mesuré directement à des latitudes tempérées et moyennes<sup>110</sup>. La colonne d'eau de la mer Méditerranée, par exemple, est plus chaude et plus alcaline que celle des océans ouverts, avec, potentiellement, une diminution de pH plus importante que celle de l'océan Atlantique, et une saturation presque complète de la colonne d'eau qui pourrait subsister pendant de nombreuses années<sup>111</sup>. Huit années de données à haute résolution relevées au site littoral nord-tempéré de Tatoosh Island, USA, indiquent cependant une tendance à la diminution du pH pendant la période observée, ainsi que des fluctuations de pH annuelles et diurnes significatives, probablement dues à la photosynthèse, à la respiration et aux processus dynamiques et saisonniers de mélange<sup>112</sup>.

Dans les régions de haute productivité biologique et d'exportation, le CID est converti en carbone organique par le phytoplancton, et exporté par la pompe biologique vers les profondeurs de l'océan<sup>113</sup>. Le long des côtes tempérées,

103 Steinacher, M., Joos, F., Frölicher, T. L., Plattner, G.-K., Doney, S. C. (2009). Imminent ocean acidification in the Arctic project with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model. *Biogeosciences*, 6:515–533.

104 Olafsson, J., Olafsdottir, S. R., Benoit-Cattin, A., Danielsen, M., Arnarson, T. S., Takahashi, T. (2009). Rate of Iceland Sea acidification from time series measurements. *Biogeosciences Discuss*, 6:5251–5270.

105 Freiwald, A., Fossa, J. H., Grehan, A., Koslow, T., Roberts, J. M. (2004). *Cold-water Coral Reefs*. UNEP-WCMC, Cambridge, UK.

106 Turley, C. M., Roberts, J. M., Guinotte, J. M. (2007). Corals in deepwater: will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems. *Coral Reefs* 26:445–448.

107 Olafsson, J., Olafsdottir, S. R., Benoit-Cattin, A., Danielsen, M., Arnarson, T. S., Takahashi, T. (2009). Rate of Iceland Sea acidification from time series measurements. *Biogeosciences Discuss*, 6:5251–5270.

108 Ibid.

109 Feely, R. A., Sabine, C. L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V. J., Millero, F. J. (2004). Impact of anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> system in the oceans. *Science*, 305:362–365.

110 CIESM, 2008. Impacts of acidification on biological, chemical and physical systems in the Mediterranean and Black Seas. N° 36 in *CIESM Workshop Monographs* [F. Briand Ed.], 124 pages, Monaco

111 Ibid.

112 Wootton, T. J., Pfister, C. A., Forester, D. (2008). Dynamic patterns and ecological impacts of declining ocean pH in a high-resolution multi-year dataset. *PNAS*, Vol. 105(48): 18848–18853.

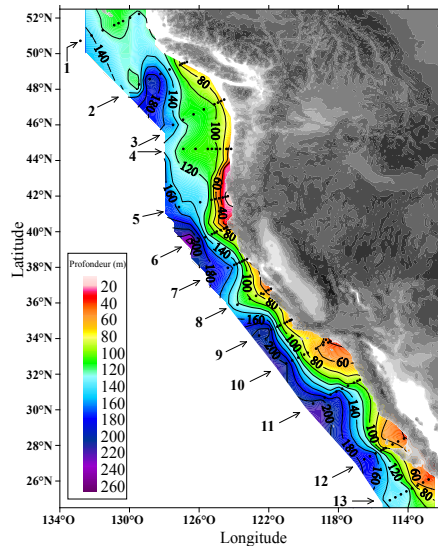
113 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

l'upwelling des eaux de sous-surface lié aux vents et aux saisons apporte des eaux riches en  $\text{CO}_2$  sur le plateau, et parfois dans l'océan de surface. Cette eau a une haute teneur en  $\text{CO}_2$  résultant des processus naturels de respiration dans les couches de sous-surface, et témoigne d'une contamination importante au  $\text{CO}_2$  d'origine anthropique.

Le long de la côte ouest de l'Amérique du Nord, par exemple, on peut observer un upwelling saisonnier d'eaux sous-saturées en aragonite sur le plateau continental, atteignant une profondeur de 40–120m (Figure 9)<sup>114</sup>. Bien que ce soit un phénomène naturel de cette région, l'absorption du  $\text{CO}_2$  anthropique par l'océan a élargi la surface occupée par ces eaux acidifiées et multiplié le risque qu'elles posent aux espèces calcifiantes vivant le long de la côte<sup>115</sup>.

Les eaux d'upwelling le long de la côte ont des teneurs de  $\text{CO}_2$  à la limite de la solubilité des aragonites  $\text{CaCO}_3$  (900 - 1000ppm), et pourtant on estime qu'elles étaient à la surface et en contact avec l'atmosphère il y a environ 50 ans, lorsque les concentrations de  $\text{CO}_2$  atmosphérique étaient d'environ 310ppm, une quantité significativement moindre que celle observée actuellement (~384ppm)<sup>116</sup>.

Une proposition provisoire suggère que l'acidification de l'océan aura pour effet d'augmenter le caractère oligotrophique de la mer Méditerranée et d'aggraver une limitation par le phosphore pré-existante, contribuant à une diminution de la productivité et de l'exportation<sup>117</sup>. Comme il le sera expliqué plus loin, certaines des pêches les plus productives au monde se situent dans les zones littorales de latitudes tempérées, ce qui donne à penser que les impacts de l'acidification des océans sur les réseaux trophiques marins pourraient être un problème plus grave et plus urgent qu'on ne le pensait auparavant. Ce scénario régional est une indication de l'impact futur sur l'écologie et la société des eaux corrosives d'upwelling, qui sera sans doute exacerbé au cours du demi-siècle à venir à mesure que l'eau exposée à des niveaux croissants de  $\text{CO}_2$  atmosphérique est intégrée au système<sup>118</sup>.



**FIGURE 9:** Distribution en profondeur de l'eau sous-saturée sur le plateau continental à l'ouest de l'Amérique du nord, de Queen Charlotte Sound, Canada, à San Gregorio, Mexico Source: Feely et al., 2008<sup>119</sup>.

114 Feely, R. A., Sabine, C. L., Hernandez-Ayon, J. M., Lanson, D., Hales, B. (2008). Evidence for Upwelling of Corrosive "Acidified" Water onto the Continental Shelf. *Science*, Vol320:1490 -1492.

115 Feely, R. A. *Ocean Acidification Along the West Coast of North America*. Part of *Ocean Acidification: The Other Climate Change Story*. [www.yearofscience2009.org](http://www.yearofscience2009.org).

116 UNESCO, IGBP, MEL, SCOR. (2009). *Ocean Acidification: A Summary for Policymakers from the Second Symposium on the Ocean in a High-CO<sub>2</sub> World*. [www.ocean-acidification.net](http://www.ocean-acidification.net)

117 CIESM, 2008. Impacts of acidification on biological, chemical and physical systems in the Mediterranean and Black Seas. N° 36 in *CIESM Workshop Monographs* [F. Briand Ed.], 124 pages, Monaco

118 ScienceDaily (May 23 2008). U.S Pacific Coast Waters Turning More Acidic – [www.sciencedaily.com/releases/2008/05/080522181511.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2008/05/080522181511.htm)

119 Feely, R. A., Sabine, C. L., Hernandez-Ayon, J. M., Lanson, D., Hales, B. (2008). Evidence for Upwelling of Corrosive "Acidified" Water onto the Continental Shelf. *Science*, Vol320:1490 -1492.

### C. LES EAUX DE SURFACE DES RÉGIONS TROPICALES

Le réchauffement des océans produit une stratification verticale plus marquée de la colonne d'eau et réduit le mélange des couches, phénomène que l'on peut souvent observer dans les régions tropicales. Le CO<sub>2</sub> a une solubilité moindre dans les eaux de surface plus chaudes, et celles-ci reçoivent moins de nutriments en provenance des couches profondes, ce qui entraîne une réduction des taux de production primaire et de l'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique<sup>120</sup>. Dans les régions tropicales, une moindre disponibilité des ions de carbonate liée à une diminution de pH sera certainement exacerbée par un mélange réduit entre les eaux de surface chaudes, peu profondes et chargées de CO<sub>2</sub> et les eaux océaniques froides et profondes produisant un effet tampon<sup>121</sup>. Pourtant, dans certaines zones spécifiques, comme le Pacifique tropical est (PTE), les eaux de surface ont un pH plus bas, une saturation en carbonate moins élevée, et des valeurs de pCO<sub>2</sub> plus élevées par rapport aux autres zones marines tropicales, grâce au processus d'upwelling qui mélangent les eaux profondes riches en CO<sub>2</sub> avec les couches de surface le long d'un thermocline peu profond<sup>122</sup>.

Les récifs coralliens de carbonate ne peuvent pas exister dans des eaux où la concentration d'ions de carbonate est inférieure à 200 µmol kg<sup>-1</sup>. Les concentrations actuelles d'ions de carbonate sont de ~210 µmol kg<sup>-1</sup>, la valeur la plus basse depuis 420 000 ans<sup>123</sup>. D'après des prédictions de modèles récentes, presque tous les récifs tropicaux ou subtropicaux baignaient dans des eaux propices à la croissance du corail avant la révolution industrielle. Les prédictions anticipent que la Grande Barrière de corail, la mer de Corail et la mer des Caraïbes seront soumises à des taux de saturation en aragonite bas plus rapidement que certaines autres régions tropicales (comme le Pacifique central) à mesure que les concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique augmenteront<sup>124</sup>.

### D. DES ENVIRONNEMENTS À pH NATURELLEMENT BAS

Certaines régions océaniques du globe ont un pH bas ou sont déjà sous-saturées en minéraux de CaCO<sub>3</sub>, phénomène que l'on peut observer lorsque des processus volcaniques causent des rejets de CO<sub>2</sub> par les sédiments sous-marins (Figure 10). Dans ces régions, le CO<sub>2</sub> réagit avec l'eau de mer, provoquant des changements chimiques et de pH. Ces environnements peuvent être une source de validation à l'échelle de l'écosystème des impacts prévus liés à l'augmentation de pCO<sub>2</sub> et à l'acidification sur les organismes et les structures d'habitat, et peuvent être étudiés afin de mieux comprendre les seuils écologiques au-delà desquels les principaux organismes marins seront affectés par une hausse de pCO<sub>2</sub><sup>125</sup>.

Dans la zone des cheminées hydrothermales froides du littoral de l'île d'Ischia en Italie, le fond marin émet des bulles de CO<sub>2</sub> presque pur à une profondeur d'environ 6 mètres. Le pH moyen directement à la source est abaissé de 0,6 - 1,5 unité (pH 6,7 - 7,6), remontant graduellement à une valeur normale de pH de 8,1 - 8,2 unités à une distance de 70 - 120m des cheminées. Les niveaux de saturation du CaCO<sub>3</sub> (calcite et aragonite) et les concentrations de pCO<sub>2</sub> suivent un déplacement de valeurs similaire<sup>126</sup>.

120 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

121 Veron, J. E. N. (2008) Mass extinctions and ocean acidification: biological constraints on geological dilemmas. *Coral Reefs* 27:459-472.

122 Manzello, D.P., Kleypas, J.A., Budd, D.A., Eakin, C.M., Glynn, P.W. and Langdon, C. (2008). Poorly cemented coral reefs of the eastern tropical Pacific: Possible insights into reef development in a high-CO<sub>2</sub> world. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol 105 (30). pp. 10450 - 10455

123 Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., and Hatziolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737-1742.

124 Ibid.

125 Hall-Spencer, J. M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S. M., Rowley, S. J., Tedesco, D., Buia, M. C. (2008). Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature*, Vol 454:96-99.

126 Ibid.



**FIGURE 10:** Bulles provenant de la zone de cheminées de CO<sub>2</sub> d'Ischia. Source: Hall-Spencer and Rauer, 2009<sup>127</sup>.

## E. ACTIVITÉS ANTHROPIQUES

Il est maintenant clair que toute augmentation du CO<sub>2</sub> océanique liée à des flux aussi bien naturels qu'anthropiques causera une aggravation de l'acidification des océans. Ceci est particulièrement pertinent pour toute activité de géo-ingénierie ou de macro-ingénierie visant à augmenter artificiellement l'absorption et la séquestration du CO<sub>2</sub> par les océans afin de réduire les concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique et d'atténuer les changements climatiques. Le GIEC a récemment examiné tout un éventail de projets de stockage de CO<sub>2</sub> dans l'océan pour évaluer la faisabilité et l'adéquation des techniques<sup>128</sup>. Les mécanismes proposés, comprenant l'injection directe de CO<sub>2</sub> dans la colonne d'eau (injection "dissolution") ou au fond de la mer (injection "lac"), quoique potentiellement capables de piéger le CO<sub>2</sub> atmosphérique temporairement, risquent plutôt d'aggraver l'acidification des océans<sup>129</sup>. La fertilisation de l'océan, c'est-à-dire toute activité humaine cherchant principalement à stimuler la productivité primaire des océans pour absorber le CO<sub>2</sub> atmosphérique par des processus biologiques, contient un risque inhérent de modification de la chimie et du pH de l'océan, surtout si elle se fait d'une façon répétée et à grande échelle. Les impacts (y compris

127 Hall-Spencer J. and Rauer, E. (2009). Champagne Seas—Foretelling the Ocean's Future? *Current: The Journal of Marine Education*, Vol. 25(1): 11–12.

128 IPCC (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp

129 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

les effets de l'acidification de l'océan) de la fertilisation de l'océan sur la biodiversité marine sont résumés dans un rapport séparé<sup>130</sup>.

L'addition de larges quantités de composés alcalins, tels que l'hydroxyde de calcium  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou l'hydroxyde de magnésium  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , a été proposée comme mécanisme de réduction du  $\text{CO}_2$  atmosphérique, tout en atténuant l'acidification des océans. Il existe cependant des incertitudes sur l'efficacité de cette méthode, à savoir l'importance de ses effets sur l'acidification des océans, ainsi que sur les effets localisés et les seuils critiques liés aux additions alcalines, relativement à l'état de saturation et la précipitation du  $\text{CaCO}_3$ <sup>131</sup>. De plus, les dégâts écologiques liés à l'extraction et au transport des minéraux alcalins en quantités suffisantes pour ces interventions visant à modifier le pH océanique donnent lieu à de sérieuses inquiétudes, et risquent de rendre cette approche prohibitive<sup>132</sup>.

## F. TENDANCES FUTURES

En 2000, le GIEC a publié des scénarios d'émissions (Rapport spécial sur les scénarios d'émissions - RSSE), conçus pour explorer l'incidence de différentes évolutions sociales, démographiques, économiques et technologiques sur les émissions de gaz à effet de serre. Les concentrations futures de  $\text{CO}_2$  atmosphérique et océanique évaluées à partir du scénario d'émissions anthropiques poursuivant la tendance actuelle (*status quo* A2 et B1), et les modèles de circulation du GIEC (GIEC IS92a) indiquent que les concentrations de  $\text{CO}_2$  atmosphérique pourraient dépasser 500 ppm d'ici 2050, et 800 ppm avant 2100<sup>133</sup>.

Une baisse concomitante du pH des eaux de surface de 0,14 à 0,3-0,4 unité, pour se situer à 7,9, équivaudrait à une augmentation de la concentration d'ions d'hydrogène de 150%, et à une diminution de la concentration d'ions de carbonate de 50% par rapport à leurs niveaux préindustriels<sup>134</sup>. Le taux de changement observé est au moins 100 fois plus rapide qu'aucun autre ayant eu lieu durant les derniers 100 000 ans<sup>135</sup>. Ceci est significatif pour les systèmes biologiques, et ne laisse pratiquement pas de temps pour une adaptation évolutionnaire des organismes marins face aux changements chimiques de l'océan<sup>136, 137</sup>.

Les modèles du scénario de *status quo* signalent aussi des changements importants dans la chimie des eaux océaniques littorales mondiales, et indiquent que l'état de saturation des eaux de surface en aragonite et en calcite diminuera de 45% d'ici 2100 et de 73% d'ici 2300<sup>138</sup>. De plus, les prévisions indiquent que les hausses de  $\text{CO}_2$  atmosphérique et de température, et les teneurs élevées en nutriments et en matière organique dans les zones littorales réduiront les taux de production du  $\text{CaCO}_3$  de 40% d'ici 2100, entraînant un taux de dissolution du  $\text{CaCO}_3$  supérieur à son taux de production d'ici 2150.

130 SCBD (2009) Scientific Synthesis on the Impacts of Ocean Fertilization on Marine Biodiversity. Technical Series No. 45, SCBD, Montreal.

131 [www.cquestrate.com](http://www.cquestrate.com)

132 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

133 Feely, R. A., Sabine, C. L., Hernandez-Ayon, J. M., Lanson, D., Hales, B. (2008). Evidence for Upwelling of Corrosive "Acidified" Water onto the Continental Shelf. *Science*, Vol320:1490 -1492.

134 Steinacher, M., Joos, F., Frölicher, T. L., Plattner, G.-K., Doney, S. C. (2009). Imminent ocean acidification in the Arctic project with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model. *Biogeosciences*, 6:515–533.

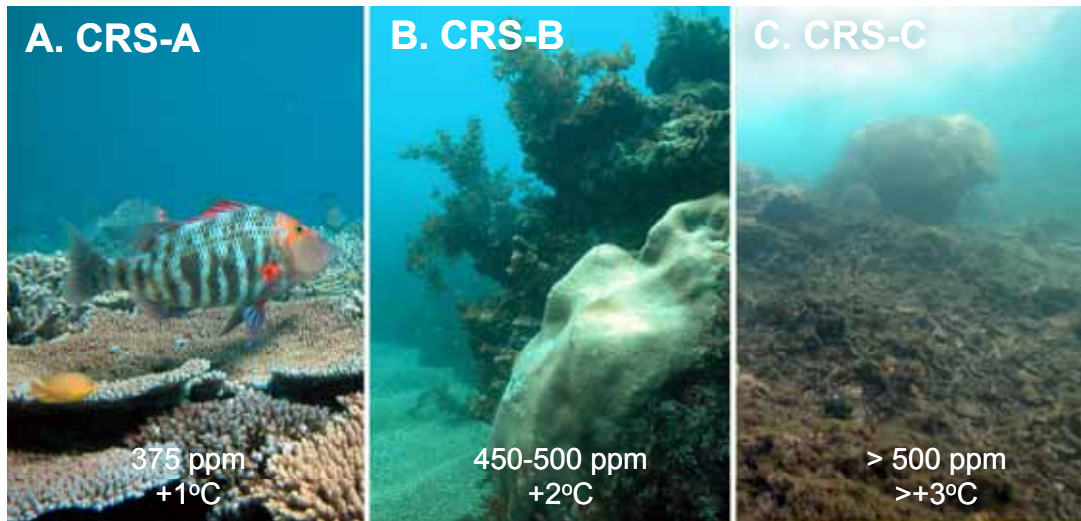
135 OSPAR Commission (2006). Effects of the marine environment of ocean acidification resulting from elevated levels of  $\text{CO}_2$  in the atmosphere.

136 Veron, J. E. N. (2008) Mass extinctions and ocean acidification: biological constraints on geological dilemmas. *Coral Reefs* 27:459–472.

137 Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., and Hatziolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737–1742.

138 Andersson, A. J., Mackenzie, F. T., Lerman, A. (2006). Coastal Ocean  $\text{CO}_2$  – carbonic acid- carbonate sediment system of the Anthropocene. *Global Biogeochem. Cy.*, 20, doi:10.1029/2005GB002506.

L'un des modèles prédisant le futur des récifs de corail au niveau mondial prévoit que même à des concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique de 450–500 ppm (estimation prudente), la concentration d'ions de carbonate deviendra inférieure à 200 µmol par kg, valeur en-deçà de laquelle la construction de récifs de CaCO<sub>3</sub> n'est plus viable, le taux d'érosion des récifs étant supérieur à leur taux de calcification<sup>139</sup>. Il semble qu'un changement de cette ampleur réduira les écosystèmes des récifs coralliens à des systèmes moins diversifiés et moins productifs (Figure 11)<sup>140</sup>.



**FIGURE 11:** Analogues de structures écologiques prévues par trois scénarios où les récifs coralliens sont soumis à une augmentation de CO<sub>2</sub> et de température aux valeurs indiquées. Les augmentations de [CO<sub>2</sub>]<sub>atm</sub> et de température sont celles des scénarios et non des sites photographiés. **A.** Communauté de pente de récif à Heron Island. **B.** Communautés mixtes d'algues et de coraux associées aux récifs côtiers entourant St. Bees Island près de Mackay. **C.** Pente du récif côtier des Low Isles près de Port Douglas. *Source: Hoegh-Guldberg et al., 2007*<sup>141</sup>.

L'acidification des océans est irréversible sur une période d'au moins des dizaines de milliers d'années<sup>142</sup>; elle est déterminée à long terme par les processus physiques de mélange de l'océan, qui permettent à l'effet tampon des sédiments océaniques d'agir sur la chimie de l'océan. Il se peut aussi que le réchauffement des océans lié aux changements climatiques mondiaux réduise le taux de mélange avec les eaux profondes, retardant davantage tout rétablissement possible<sup>143</sup>. Malgré une augmentation attendue des taux de dissolution et de l'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique, associée à un abaissement des états de saturation du CaCO<sub>3</sub>, il est probable que la rapidité des augmentations de concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique parvienne éventuellement à saturer les mécanismes tampon naturels de l'océan, entraînant une absorption du carbone par les océans beaucoup moins efficace durant les deux prochains siècles<sup>144</sup>. Une réduction de l'effet tampon de l'océan vis-à-vis du CO<sub>2</sub> entraînera une augmentation de la fraction de CO<sub>2</sub> retenue dans l'atmosphère, créant une boucle de feedback négatif augmentant davantage l'acidification de l'océan.

139 Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., and Hatzitolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737–1742.

140 Ibid.

141 Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., and Hatzitolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737–1742.

142 Inter-Academy Panel on International Issues (IAP). 2009. Statement on Ocean Acidification. Endorsed, June 2009. [www.interacademies.net/CMS/9075.aspx](http://www.interacademies.net/CMS/9075.aspx)

143 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

144 Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., Kleyvas, J. A. (2009). Ocean Acidification: The Other CO<sub>2</sub> problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1:169–192.

### III. SYNTHÈSE DE L'INFORMATION SCIENTIFIQUE SUR LES IMPACTS POTENTIELS DE L'ACIDIFICATION DES OcéANS

#### A. MÉTHODES ET APPROCHES POUR L'ÉVALUATION DES IMPACTS DE L'ACIDIFICATION DES OcéANS

Des changements de pH pourraient avoir des conséquences immenses sur les écosystèmes marins en vue du rôle critique joué par le pH dans la médiation des réactions physiologiques. Il existe d'autre part de nombreux groupes importants d'organismes marins dont le squelette à base de  $\text{CaCO}_3$  se dissout lorsqu'il entre en réaction avec une eau de mer acidifiée corrosive. La baisse de pH pourrait donc perturber des processus critiques comme la construction des récifs, la séquestration du carbone lors de la sédimentation du phytoplancton, et l'interaction consommateur-ressource des organismes marins<sup>145</sup>. La réaction au changement de pH au niveau de l'écosystème n'est ni une simple fonction liée aux parties calcaires de l'organisme ni un déclin général de la fonction de l'organisme, mais dépend des mécanismes de régulation du pH et d'adaptation spécifiques à chaque organisme, et de l'interaction entre les composantes de l'écosystème<sup>146</sup>.

Les connaissances actuelles sur la réaction des organismes marins à l'acidification des océans se basent largement sur des expériences in-vitro, à court-terme, en aquarium et en mésocosme, et contiennent d'importantes lacunes au niveau des impacts physiologiques et écologiques, et sur les conséquences pour les écosystèmes océaniques en général<sup>147</sup>. En dépit de progrès récents, les premières études n'ont pas tenu compte de variables clés comme la température, la lumière et les nutriments, dont on sait qu'elles ont un effet sur le taux de calcification, et il n'existe que peu d'observations obtenues sur des périodes suffisamment longues pour indiquer si les organismes seront capables de s'adapter génétiquement aux changements<sup>148</sup>. Il n'est d'ailleurs pas certain que l'on puisse extrapoler les réponses observées chez une seule espèce aux populations génétiquement diverses existant dans les écosystèmes naturels<sup>149</sup>.

Des résultats expérimentaux ont cependant clairement démontré que le taux de calcification des organismes calcificateurs marins est directement lié à l'état de saturation du carbonate de l'eau de mer<sup>150</sup>. On peut donc prédire que les biens et services fournis par l'océan, dont dépendent les populations humaines, ne seront pas les mêmes dans les océans acidifiés du futur, puisque la hausse de pression partielle du  $\text{CO}_2$  ( $p\text{CO}_2$ ) a une influence, par l'intermédiaire de l'eau de mer, sur la physiologie, le développement et la survie des organismes marins<sup>151</sup>. On comprend de mieux en mieux les effets à court terme de l'acidification des océans sur les espèces de la biote marine, et les expériences scientifiques menées actuellement engendrent une meilleure connaissance de l'écosystème et de son contexte, ainsi que des conséquences à long terme.

Pendant les années 1990, plusieurs programmes à grande échelle (comme le Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS), et l'Ocean Atmosphere Carbon Exchange Study (OACES)) furent menés afin de mesurer la chimie du carbonate océanique et de reconstituer l'histoire des enregistrements de  $\text{CO}_2$ . Ces programmes ont permis de calculer la quantité de carbone océanique d'origine anthropique antérieure et actuelle, par région et relativement à la profondeur, et d'évaluer les changements d'état de saturation de la calcite et de l'aragonite. Les observations obtenues au cours de ces programmes confirment que plus de la moitié du carbone anthropique accumulé dans l'océan est

---

145 Wootton, J. T., Pfister, C. A., Forester, J. S. (2008). Dynamic patterns and ecological impacts of declining ocean pH in a high-resolution multi-year dataset. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2008 December 2; 105(48): 18848–18853. Published online 2008 November 24. doi: 10.1073/pnas.0810079105

146 Ibid.

147 Hall-Spencer, J. M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S. M., Rowley, S. J., Tedesco, D., Buia, M. C. (2008). Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature*, Vol 454:96–99.

148 ISRS (2008). Coral Reefs and Ocean Acidification. Briefing Paper 5, International Society for Reef Studies, 9pp.

149 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

150 Andersson, A. J., Mackenzie, F. T., Bates, N. R. (2008). Life of the margin: implications of ocean acidification on Mg-calcite, high latitude and cold-water marine calcifiers. *Mar Ecol Prog Ser*. Vol. 373:265–273.

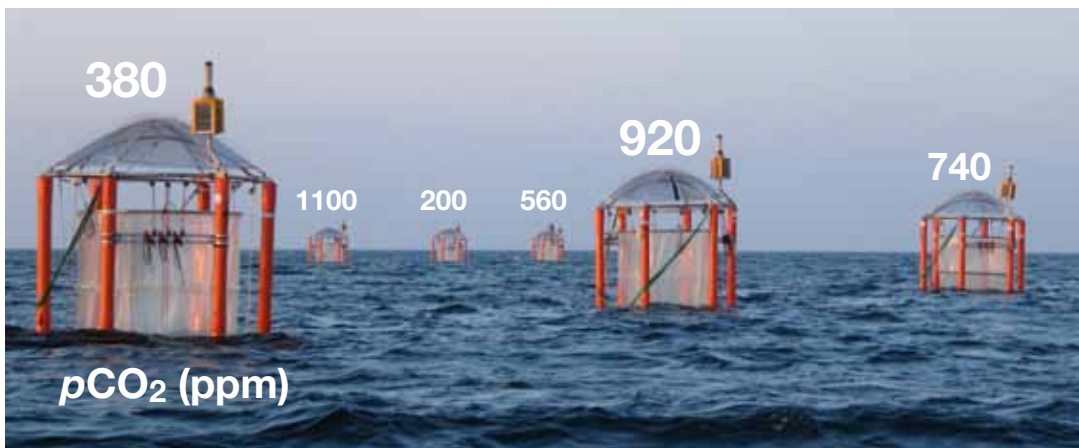
151 Hofmann, G. E., O'Donnell, M. J., Todgham, A. E. (2008). Using functional genomics to explore the effects of ocean acidification on calcifying marine organisms. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol. 373:219–225.



stocké dans les 400 mètres supérieurs de la colonne d'eau; ces couches productives contiennent la majorité des organismes marins<sup>152</sup>.

Plusieurs projets européens ont démarré depuis (par exemple l'European Project on Ocean Acidification (EPOCA) et BioAcid), pour aider à mieux comprendre les effets de l'acidification des océans sur le plan biologique, écologique, biogéochimique et au niveau de la société, et pour combler le manque de connaissances sur les réponses physiologiques des organismes marins à l'acidification des océans. Un guide des meilleures pratiques pour la recherche et le rapport des données sur l'acidification des océans (A Guide to Best Practices in Ocean Acidification Research and Data Reporting) a été publié afin de fournir un cadre de recherche aux scientifiques travaillant dans ce domaine en pleine expansion<sup>153</sup>.

Des dispositifs expérimentaux pour les observations en mésocosme à large échelle (60 000 litres) ont été testés pour la première fois dans la mer Baltique en 2009, pour simuler les conditions de pH océanique futures, dans des conditions quasi-naturelles (Figure 12). Un programme d'échantillonnage détaillé utilisant cette technologie, coordonnée par l'Institut Leibniz des sciences marines en Allemagne (IFM-GEOMAR), sera réalisé en 2010 au large de Svalbard, en Norvège, pour mieux comprendre comment ces hautes latitudes sont menacées. L'étude de sites à fortes concentrations de CO<sub>2</sub> naturelles permet aussi d'observer et de mieux comprendre l'acidification des océans à l'échelle des écosystèmes et sur des périodes suffisamment longues pour pouvoir observer ses effets sur les communautés de macro-organismes<sup>154</sup>.



**FIGURE 12.** Tests de dispositifs expérimentaux pour les observations en mésocosme à large échelle dans la mer Baltique en 2009, avec divers enrichissements en pCO<sub>2</sub>. Source: Ulf Riebesell (IFM-GEOMAR).

Jusqu'à présent, les résultats indiquent que les impacts seront plus variés qu'il n'avait été anticipé, de nombreuses espèces n'étant plus viables tandis que d'autres réussissent à s'adapter et à proliférer. Il est probable que l'acidification des océans aura une influence sur la dynamique biogéochimique du carbonate de calcium, du carbone organique, du nitrate et du phosphore océaniques, ainsi que sur la spéciation des métaux traces, des éléments traces et de la matière organique dissoute dans l'eau de mer<sup>155</sup>.

152 Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L., Robbins, L. L. (2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18–20 April 2005, St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S Geological Survey, 88 pp.

153 Riebesell, U., Fabry, V. J., Gattuso, J.-P. (2009). Guide to Best Practices in Ocean Acidification Research and Data Reporting. <http://www.epoca-project.eu/index.php/Home/Guide-to-OA-Research/>

154 Hall-Spencer, J. M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S. M., Rowley, S. J., Tedesco, D., Buia, M. C. (2008). Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature*, Vol 454:96–99.

155 Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., Kleypas, J. A. (2009). Ocean Acidification: The Other CO<sub>2</sub> problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1:169–192.

## B. LE RÔLE DU $\text{CaCO}_3$ CHEZ LES ORGANISMES CALCIFIANTS

De nombreux organismes marins se servent des minéraux de calcium pour former leurs coquilles et leurs squelettes, y compris les algues corallines encroûtantes, certains phytoplanctons, les coraux des eaux chaudes et froides, et une série d'invertébrés pélagiques et benthiques, depuis les petits escargots pélagiques nageurs (ptéropodes) jusqu'aux homards. Ces organismes sont importants dans presque tous les écosystèmes, des régions tropicales jusqu'aux hautes latitudes et à la mer profonde<sup>156</sup>. La capacité de calcification des ces organismes dépend de l'acidité de l'eau de mer, de la disponibilité des ions de carbonate et de la température. Les organismes calcifiants sont sensibles aux changements d'état de saturation des minéraux importants que sont la calcite et l'aragonite. L'état de saturation global de l'eau de mer est plus bas à haute latitude et dans les eaux profondes qu'à basse latitude et dans les mers peu profondes. On en sait beaucoup moins sur les variations de pH et d'état de saturation dans les écosystèmes côtiers.

Les minéraux de calcite magnésienne ayant un pourcentage molaire (% mol) important de  $\text{MgCO}_3$  sont généralement plus solubles que l'aragonite et la calcite en l'absence de Mg. Le pourcentage molaire du magnésium déposé par les organismes marins varie selon les espèces, allant de quelques % mol à 30 % mol<sup>157</sup>, avec par conséquent des variations importantes dans la réponse des taxa aux changements de leurs conditions ambiantes<sup>158</sup>. Les calcificateurs marins qui produisent des parties dures à fortes concentrations de magnésium et de calcite magnésienne (par exemple les algues corallines rouges — algues dont la fonction de ciment permet la construction des récifs), ainsi que les organismes calcifiants vivant dans des environnements de haute latitude et d'eaux froides, sont immédiatement menacés par l'acidification des océans, parce qu'ils sont totalement submergés dans une eau de mer à peine sur-saturée vis-à-vis des phases de carbonate qu'ils sécrètent<sup>159</sup>.

On pense que le rôle du  $\text{CaCO}_3$  change selon les étapes du cycle de vie. Jusqu'à présent, les expériences se sont centrées sur les effets létaux du  $\text{CO}_2$  et de l'acidification sur les organismes adultes, et il faudrait plus d'information sur les effets sublétaux d'un petit changement de pH sur la reproduction, le taux de croissance et la morphologie pour pouvoir prédire à long terme les conséquences de l'acidification des océans sur les écosystèmes<sup>160</sup>. Ci-suit une discussion du rôle du  $\text{CaCO}_3$  dans les communautés benthiques et pélagiques, ainsi que les différentes réponses de la biote marine à une augmentation de l'acidification des océans et du  $\text{pCO}_2$ , dans le cadre des scénarios d'émissions de  $\text{CO}_2$  prévues.

## C. LES COMMUNAUTÉS BENTHIQUES

Les organismes benthiques jouent un rôle important dans l'écosystème marin, en accroissant la stabilité du sédiment et en fournissant un habitat aux petits invertébrés et aux poissons, servant aussi de nourriture aux poissons de fond et aux poissons pélagiques des zones peu profondes, ainsi qu'aux humains. Les plateaux continentaux sont riches en organismes benthiques calcificateurs et en communautés constituées d'organismes calcifiants, dont un grand nombre ont une importance économique directe ou bien sont des éléments clés dans l'habitat des poissons, contribuant à des processus écologiques fondamentaux. Le tableau 2 fait la synthèse des groupes benthiques clés, du rôle que joue le  $\text{CaCO}_3$  dans leur bon fonctionnement, et des impacts observés et de leurs conséquences après une exposition à un taux élevé de  $\text{CO}_2$  et une diminution de pH.

---

156 Andersson, A. J., Mackenzie, F. T., Bates, N. R. (2008). Life of the margin: implications of ocean acidification on Mg-calcite, high latitude and cold-water marine calcifiers. *Mar Ecol Prog Ser.* Vol. 373:265–273.

157 Ibid.

158 Hofmann, G. E., O'Donnell, M. J., Todgham, A. E. (2008). Using functional genomics to explore the effects of ocean acidification on calcifying marine organisms. *Mar Ecol Prog Ser.* Vol. 373:219–225.

159 Andersson, A. J., Mackenzie, F. T., Bates, N. R. (2008). Life of the margin: implications of ocean acidification on Mg-calcite, high latitude and cold-water marine calcifiers. *Mar Ecol Prog Ser.* Vol. 373:265–273.

160 Kurihara, H., Shirayama, Y. (2004). Effects of increased atmospheric  $\text{CO}_2$  on sea urchin early development. *Mar Ecol Prog Ser.* Vol 274:161–169.

**TABLEAU 2:** Synthèse des impacts observés et prédits (\*) d'un taux élevé de CO<sub>2</sub> et de l'acidification des océans sur les organismes benthiques marins.

Organisme	Fonction du CaCO <sub>3</sub>	Impacts observés et prédits (*) d'un taux élevé de CO <sub>2</sub>	Impacts observés et prédits (*) d'un pH bas	Implications socio-écologiques
<b>Coraux d'eaux chaudes</b>	Protection; ancrage au substrat; accès à la colonne d'eau; compétition pour l'espace; stabilisation du fond de la mer	Risque d'être supplanté par les espèces non-calcififiantes <sup>*461</sup> Délais de reproduction dus à des taux de croissance moins élevés <sup>602</sup> Diminution de l'état de saturation de l'aragonite <sup>603</sup> Prédiction d'une diminution de ~30% de la croissance des squelettes de la plupart des coraux à des concentrations de CO <sub>2</sub> atmosphérique de 560ppm <sup>*164</sup> 40% de réduction des taux de croissance des algues corallines encroûtantes observée dans des expériences de CO <sub>2</sub> élevé <sup>605</sup> Perte nette de matériau de CaCO <sub>3</sub> liée à une diminution de la calcification et une augmentation de la dissolution dans une réplique de communauté de récif subtropical <sup>166</sup>	Diminution de 14,2% observée dans les taux de calcification de la Grande Barrière de corail <sup>607</sup> Baisse des taux de calcification liée à l'état de saturation du carbonate <sup>608</sup> Les squelettes de deux coraux durs de la Méditerranée <i>Oculina patagonica</i> et <i>Madracis pharensis</i> maintenus à un pH bas ont été complètement dissous; ils sont toutefois restés en bonne santé et sont revenus à la normale après avoir été replacés dans leurs conditions ambiantes habituelles <sup>609</sup> Nouvelle croissance et accrétion des récifs limitées <sup>*170</sup>	Perte de fonctions de l'écosystème, par exemple la protection contre les tempêtes et l'érosion <sup>171</sup> Changement vers une exportation accrue des matières organiques, une déposition et une reminéralisation bactérienne plus élevées, donnant suite à des zones d'anoxie <sup>172</sup> Effet synergique de menaces à tous niveaux réduisant la santé et la viabilité des récifs <sup>173</sup>
<b>Coraux d'eau froide</b>	Ossature structurelle pour l'écosystème	Prévision que 70% de toutes les communautés de coraux d'eaux froides recensées seront soumises à une eau de mer corrosive d'ici 2100, et 2020 dans certaines régions <sup>*174</sup>	Certains modèles prédisent une remontée de l'horizon de saturation, réduisant l'habitat viable <sup>175</sup> Diminution de 59% des taux de calcification observée chez les jeunes polypes du corail profond <i>Lophelia pertusa</i> comparée à des polypes plus âgés <sup>176</sup>	Dissolution de zones de récifs productives et perte de biodiversité et d'habitats importants du point de vue commercial 40% des zones de pêche actuelles se situent dans des eaux où l'on trouve des coraux d'eaux froides <sup>177</sup> ; il pourrait s'agir d'habitats propices aux nourriceries pour les poissons 85% des espèces de poissons d'importance commerciale observées le long de transects submersibles au large des îles Aléoutiennes étaient associées à des coraux d'eaux froides <sup>178</sup>
<b>Échinodermes</b>	Protection; capture de proies; reproduction; régulation de la flottabilité; rôle dans la reminéralisation des surfaces de sédiments <sup>179</sup> Métabolisme de la calcite magnésienne très soluble	<i>Hemicentrotus pulcherrimus</i> et <i>Echinodetra mathaei</i> témoignent d'une diminution de succès de reproduction, de taux de développement et de taille larvaires <sup>180</sup> Diminution du taux de fertilisation à partir d'un pH de 7,1-7,0 unités <sup>181</sup> Une exposition de l'ophiure <i>Ophiothrix fragilis</i> à un pH bas entraîna une diminution temporaire de la taille larvaires, ainsi que des anomalies du développement et de la formation du squelette <sup>182</sup> Perte de masse musculaire des bras chez l'ophiure fousseuse <i>A. filiformis</i> suite à une exposition à un CO <sub>2</sub> élevé <sup>605</sup>	Diminution du taux de croissance, de la taille et du poids <sup>184</sup> Dissolution des tests (coquille) <sup>185</sup> Anomalies morphologiques des larves pluteuses entraînant une perte de l'avantage compétitif 100% de mortalité larvaires chez l'ophiure <i>Ophiothrix fragilis</i> , espèce clé des mers peu profondes de l'Europe du nord-ouest, après une baisse de pH de 0,2 unité <sup>186</sup> Diminution de 25% de la vitesse de nage, de la mobilité et du succès de reproduction de l'oursin <i>Helicodaris erythrogramma</i> après une acidification de 0,4 unité de pH <sup>187</sup> La fertilisation et le développement de <i>H. erythrogramma</i> ne sont pas sensibles à une diminution de pH dans le cadre des valeurs anticipées pour les changements de l'environnement <sup>188</sup>	Changement dans la composition de l'écosystème marin, disparition d'un groupe fonctionnel important Certains échinodermes (oursins, combres de mer) sont des ressources commerciales

Organisme	Fonction du CaCO <sub>3</sub>	Impacts observés et prédicts (*) d'un taux élevé de CO <sub>2</sub>	Impacts observés et prédicts (*) d'un pH bas	Implications socio-écologiques
<b>Mollusques</b>	Fonctions diverses, y compris structure et protection; défense passive; régulation du pH; régulation de la flottabilité; oxydation de la matière organique dans les sédiments pélagiques <sup>161</sup>	Taux de calcification de <i>Mytilus edulis</i> réduit de 25% <sup>90</sup> Jeunes particulièrement sensibles: manque total ou partiel de coquille chez 70% des larves de <i>Crassostrea gigas</i> élevées à un pH de 7,4 <sup>91</sup> Taux de calcification de l'huître <i>Crassostrea gigas</i> diminue de 10% <sup>92</sup> Réponse immunitaire et santé de l'organisme compromises chez <i>Mytilus edulis</i> après 32 jours d'exposition à un CO <sub>2</sub> élevé <sup>93</sup> Le céphalopode <i>Sepia officinalis</i> a maintenu ses taux de calcification à une pCO <sub>2</sub> élevée, avec une augmentation de masse corporelle de ~ 4% par jour et une augmentation de la masse d'os de seiche calcifiée de plus de 500% <sup>94</sup>	Diminution d'éclosion des œufs chez le gastropode <i>Babylonia areolata</i> <sup>95</sup> Diminution de 40% de la mobilité du sperme de <i>Crassostrea gigas</i> après des changements de pH passant de pH8 à pH6 <sup>96</sup> Dissolution importante de la coquille et augmentation du taux de mortalité chez les jeunes palourdes <i>Mercenaria mercenaria</i> <sup>97</sup> Développement plus lent, changements dans les mouvements embryonnaires et modification de la forme de la coquille chez le gastropode <i>Littorina obtusata</i> à un pH plus bas <sup>98</sup> Fertilisation réduite chez l'huître creuse d'Australie <i>Saccostrea glomerata</i> liée à une augmentation de pCO <sub>2</sub> et une température non optimale <sup>99</sup> 16% de perte de surface de coquille et 42% de moins de contenu en calcium chez l'huître <i>Crassostrea virginica</i> élevée en eau d'estuaire et soumise à divers régimes de pCO <sub>2</sub> afin de comparer l'ère préindustrielle à 2100 <sup>100</sup> . Aucun changement de croissance ou de calcification chez les larves de <i>Crassostrea ariakensis</i> soumises aux mêmes traitements	Perte d'espèces marines importantes au niveau commercial et écologique Impacts sur les moyens de subsistance (aquaiculture et pêche) et sur la sécurité alimentaire Perturbation des réseaux trophiques de la planète et de la relation prédateur-proie <sup>101</sup>
<b>Crustacés</b>		Aucun effet observé d'un CO <sub>2</sub> élevé (2380ppm) sur le taux de développement, la survie ou la taille du copépode <i>Acartia tsuensis</i> <sup>102</sup> Diminution de la masse de la carapace et du contenu en minéraux de l'exosquelette du homard européen <i>Homarus gammarus</i> exposé à divers niveaux d'acidification d'eau de mer par le CO <sub>2</sub> <sup>103</sup>	Aucun effet observé d'une baisse de pH sur la condition des larves, la taille des cyprides (dernier stade larvaire), la fixation et la métamorphose des cyprides, la croissance des jeunes jusqu'au stade adulte, ou sur la production d'œufs de la balane <i>Amphibalanus amphitrite</i> <sup>104</sup>	

161 Atkinson, M. J., Cuet, P. (2008). Possible effects of ocean acidification on coral reef biogeochemistry: topics for research. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol. 373:249–256.

162 Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L., Robbins, L. L. (2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18–20 April 2005, St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S Geological Survey, 88 pp.

163 Guinotte, J. M., Fabry, V. J. (2008). Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1134: 320.

164 Langdon, C., and M.J. Atkinson. 2005. Effect of elevated pCO<sub>2</sub> on photosynthesis and calcification of corals and interactions with seasonal change in temperature/irradiance and nutrient enrichment, *Journal of Geophysical Research* 110, CC09S07, doi:10.1029/2004JC002576.

165 Kuffner, I. B., *et al* (2007). Decreased abundance of crustacean coraline algae due to ocean acidification. *Nature Geoscience*. 1:114–117.

166 Andersson, A. J., Kuffner, I. B., Mackenzie, F. T., Jokiel, P. L., Rodgers, K. S., & Tan, A., 2009. Net Loss of CaCO<sub>3</sub> from a subtropical calcifying community due to seawater acidification: mesocosm-scale experimental evidence. *Biogeosciences* 6(8): 1811–1823

167 De'ath, G., Lough, J. M., Fabricius, K. E. (2009). Declining Coral Calcification on the Great Barrier Reef. *Science* Vol 323:116–119.

168 Leclercq, N., Gattuso, J. P. (2002). Primary production, respiration, and calcification of a coral reef mesocosm under increased CO<sub>2</sub> partial pressure. *Limnol. Oceanogr.* 47(2):558–564.

169 Fine, M., Tchernov, D. (2007). Scleractinian Coral Species Survive and Recover from Decalcification. *Science*, Vol 315:1811.

170 Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., and Hatziolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737–1742.

171 Ibid.

- 172 Atkinson, M. J., Cuet, P. (2008). Possible effects of ocean acidification on coral reef biogeochemistry: topics for research. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol. 373:249–256.
- 173 Gledhill, D. K., Wanninkhof, R., Millero, F. J., Eakin, M. (2008). Ocean Acidification of the Greater Caribbean Region 1996–2006. *Journal of Geophysical Research* Vol 113:C10031.
- 174 Guinotte, J. M., Orr, J., Cairns, S., Freiwald, A., Morgan, L., George, R. (2006). Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea scleractinian corals? *Front Ecol Environ* 4(3):141–146.
- 175 Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., et al. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437:681–686.
- 176 Maier, C., Hegeman, J., Weinbauer, M. G., Gattuso, J.-P. (2009). Calcification of the cold-water coral *Lophelia pertusa* under ambient and reduced pH. *Biogeosciences*, 6: 1671–1680.
- 177 WWF. 2004. Cold-water corals: fragile havens in the deep.
- 178 Stone, R. P. (2006). Coral habitat in the Aleutia Islands of Alaska: depth distribution, fine scale species associations and fisheries interactions. *Coral Reefs*, 25:229–238.
- 179 Gilbert, F. et al. 2007 Sediment reworking by marine benthic species from the Gullmar Fjord (Western Sweden) Importance of faunal biovolume. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 348: 133–144
- 180 Shirayama, Y., Thornton, H. (2005). Effect of increased atmospheric CO<sub>2</sub> on shallow water marine benthos. *Journal of Geophysical Research*, Vol, 110:C09S08
- 181 Kurihara, H., Shirayama, Y. (2004). Effects of increased atmospheric CO<sub>2</sub> on sea urchin early development. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol. 274:161–169.
- 182 Dupont S., Havenhand J., Thorndyke W., Peck L. & Thorndyke M., 2008. Near-future level of CO<sub>2</sub>-driven ocean acidification radically affects larval survival and development in the brittlestar *Ophiothrix fragilis*. *Marine Ecology Progress Series* 373:285–294.
- 183 Wood, H. L., Spicer, J. I., Widdicombe, S. (2008). Ocean acidification may increase calcification – but at a cost. *Proc. R. Soc. Lond. B – Biol. Sci.*, 275(1644):1767–1773.
- 184 Michaelidis, B., Ouzounis, C., Paleras, A., Portner, H. O. (2005). Effects of long-term moderate hypercapnia on acid-base balance and growth rate in marine mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Mar Ecol Prog Ser* 293:109–118.
- 185 Shirayama, Y., Thornton, H. (2005). Effect of increased atmospheric CO<sub>2</sub> on shallow water marine benthos. *Journal of Geophysical Research*, Vol, 110:C09S08
- 186 Dupont S., Havenhand J., Thorndyke, Q., Peck, L., Thorndyke, M. (2008). Near-future level of CO<sub>2</sub>-driven ocean acidification rapidly affects larval survival and development in the brittlestar *Ophiothrix fragilis*. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol. 373:285–294.
- 187 Havenhand, J. N., Buttler, F. R., Thorndyke, M. C., Williamson, J. E. (2008). Near-future levels of ocean acidification reduce fertilization success in a sea urchin. *Current Biology*, Vol, 18(5):651–652.
- 188 Byrne, M., Ho, M., Selvakumaraswamy, P., Nguyen, H. D., Dworjanyn, S. A., Davis, A. R. (2009). Temperature, but not pH, compromises sea urchin fertilization and early development under near future climate change scenarios. *Proc. R. Soc. B*. 276:1883–1888.
- 189 Ingalls, A.E. et al. 2004 Organic matter diagenesis in shallow water carbonate sediments *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68 (21): 4363–4379
- 190 Gazeau, F., Quiblier, C., Jansen, J., Gattuso, J. P., Middleburg, J., Heip, C. (2007). Impact of elevated CO<sub>2</sub> on shellfish calcification. *Geophys Res Lett* 34:L07603.
- 191 Kurihara, H. (2008). Effects of CO<sub>2</sub> driven ocean acidification on the early developmental stages of invertebrates. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol. 373:275–284.
- 192 Gazeau, F., Quiblier, C., Jansen, J., Gattuso, J. P., Middleburg, J., Heip, C. (2007). Impact of elevated CO<sub>2</sub> on shellfish calcification. *Geophys Res Lett* 34:L07603.
- 193 Bibby, R., Widdicombe, S., Parry, H., Spicer, J., Pipe, R. (2008). Effects of ocean acidification on the immune response of the blue mussel *Mytilus edulis*. *Aquatic Biology*, Vol, 2:67–74.
- 194 Gutowska, M., Portner, H. O., Melzner, F. (2008). Growth and calcification in the cephalopod *Sepia officinalis* under elevated seawater pCO<sub>2</sub>. *Mar Ecol Prog Ser* 373:303–309.
- 195 Luo, J., Du, T., Liu, C. (2004). The influence of pH and salinity in hatching rate of egg sac of *Babylonia areolata* and the effect of different diet on the development, survival rate of the larvae. *Marine Sciences/ Haiyang Kexue* 28(6):5–9.
- 196 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>
- 197 Green, M. A., Jones, M. E., Boudreau, C. L., Moore, R. L., Westman, B. A. (2004). Dissolution mortality of juvenile bivalves in coastal marine deposits. *Limnology and Oceanography*, 49:727–734.
- 198 Ellis, R. P., Bersey, J., Rundle, S., Hall-Spencer, J. M., Spicer, J. I. (2009). Subtle but significant effects of CO<sub>2</sub> acidified seawater on embryos of the intertidal snail, *Littorina obtusata*. *Aquat Biol*, Vol 54:1–018.
- 199 Parker, L. M., P. M. Ross, and W. A. O'Connor (2009). The effect of ocean acidification and temperature on the fertilization and embryonic development of the Sydney rock oyster *Saccostrea glomerata* (Gould 1850). *Global Change Biology*, 15(9), 2123–2136, doi:10.1111/j.1365-2486.2009.01895.x.
- 200 Miller, A. W., Reynolds, A. C., Sobrino, C., Reidel, G. F. (2009). Shellfish Face Uncertain Future in High CO<sub>2</sub> World: Influence of Acidification on Oyster Larvae Calcification and Growth in Estuaries. *PLoSOne*, Vol 4(5) e5561.
- 201 Cooley, S. R., Doney, S. C. (2009). Economic vulnerability assessment of U.S. fishery revenues to ocean acidification. Submitted to Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0709640104](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0709640104).
- 202 Kurihara, H., Ishimatsu, A. (2008). Effects of high CO<sub>2</sub> seawater on the copepod (*Acartia tsunensis*) through all life stages and subsequent generations. *Mar Pollut Bull* 56:1086–1090.
- 203 Arnold, K. E., Findlay, H. S., Spicer, J. I., Daniels, C. L., & Boothroyd, D., 2009. Effect of CO<sub>2</sub>-related acidification on aspects of the larval development of the European lobster, *Homarus gammarus* (L.). *Biogeosciences* 6(8): 1747–1754.
- 204 McDonald, M. R., McClintock, J. B., Amsler, C. D., Rittschof, D., Angus, R. A., Orihuea, B., Lutostanski, K. (2008). Effects of ocean acidification over the life history of the barnacle *Amphibalanus amphitrite*. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol 385:179–187.

### Récifs coralliens d'eaux chaudes

Les récifs coralliens tropicaux recouvrent 284 803 km<sup>2</sup> de surface, avec une aire de répartition restreinte due à des paramètres de croissance stricts, notamment dans les eaux de surface illuminées des régions tropicales et subtropicales<sup>205</sup>. Ces écosystèmes variés et productifs constituent l'habitat de milliers d'espèces, et procurent des ressources importantes et précieuses aux populations et aux industries, fournissant des biens et des services, tels que protection du littoral, tourisme et source de protéines, évalués à \$30 milliards par an. Ne serait-ce qu'à Hawaï, le tourisme et la pêche liés aux récifs rapportent \$360 millions par an<sup>206</sup>.

L'élaboration d'un squelette CaCO<sub>3</sub> assure aux coraux et aux algues corallines une certaine rigidité face aux conditions hydrodynamiques; aide à l'ancrage au substrat; aide à la protection; et semble permettre à l'organisme de s'élever au-dessus du substrat, lui donnant ainsi accès à de meilleures conditions de lumière et de flux favorisant sa croissance et sa reproduction. Le taux de calcification des coraux est un baromètre important de la santé des écosystèmes récifaux.

L'aragonite est le minéral principal déposé dans le squelette des coraux sclératiniaires bâtisseurs de récifs. L'aragonite est plus soluble et sa profondeur limite de saturation est beaucoup moindre que celle de la calcite, rendant ainsi les coraux vulnérables aux changements d'état de saturation<sup>207</sup>. Du fait de l'augmentation des concentrations de CO<sub>2</sub>, l'état de saturation de l'aragonite a déjà diminué de ~16% par rapport aux niveaux préindustriels<sup>208</sup>. Des expériences conduites indépendamment ont montré que les coraux zooxanthellates d'eaux chaudes sont sensibles à des saturations en aragonite plus basses, avec une diminution correspondante de leur capacité de calcification dans des eaux à haute teneur en CO<sub>2</sub><sup>209</sup>. Des projections futures de l'état de saturation global de l'aragonite indiquent que bien que les coraux d'eaux chaudes aient des taux de saturation moins élevés et qu'ils souffrent peut-être d'une réduction de leur taux de calcification, ce sont les coraux d'eaux froides qui pourront bien être les premiers à être soumis à des conditions sous-saturées en aragonite<sup>210</sup>.

Les expériences montrent qu'une augmentation de la pCO<sub>2</sub> a un effet négatif sur la calcification des coraux et de la communauté récifale lié à une baisse de l'état de saturation de l'aragonite<sup>211</sup>. Une étude des taux annuels de calcification des espèces massives *Porites* de la Grande Barrière de corail d'Australie a révélé un déclin de 14,2% des taux de calcification des coraux observés entre 1990 et 2005. L'étude était basée sur les mesures de 328 colonies de *Porites* massifs sur 69 récifs s'étendant des zones côtières à l'océan et recouvrant la presque totalité de la longueur (>2000km) de la Grande Barrière de corail. Il semble que la température à la surface de la mer et l'état de saturation du carbonate soient tous deux les phénomènes les plus importants influençant la calcification à l'échelle de la Grande Barrière<sup>212</sup>. Des études antérieures suggèrent que les taux de calcification pourraient diminuer de 20 à 60% à des concentrations atmosphériques deux fois plus élevées que celles de l'ère préindustrielle (560ppm)<sup>213</sup>; une diminution de cette amplitude pourrait changer la structure du récif et le fonctionnement de ces écosystèmes importants de façon fondamentale, avec des conséquences néfastes.

205 Spalding *et al* (2001) World Atlas of Coral Reefs.

206 TNC (2008). The Honolulu Declaration on Ocean Acidification and Reef Management: Workshop Report 12–14 August 2008.

207 Turley, C. M., Roberts, J. M., Guinotte, J. M. (2007). Corals in deepwater: will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems. *Coral Reefs* 26:445–448.

208 Guinotte, J. M., Fabry, V. J. (2008). Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1134: 320.

209 Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L., Robbins, L. L. (2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18–20 April 2005, St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S Geological Survey, 88 pp.

210 Guinotte, J. M., Orr, J., Cairns, S., Freiwald, A., Morgan, L., George, R. (2006). Will human induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea scleractinian corals? *Front Ecol Environ* 4:141–146

211 Leclercq, N., Gattuso, J. P. (2002). Primary production, respiration, and calcification of a coral reef mesocosm under increased CO<sub>2</sub> partial pressure. *Limnol. Oceanogr.* 47(2):558–564.

212 De'ath, G., Lough, J. M., Fabricius, K. E. (2009). Declining Coral Calcification on the Great Barrier Reef. *Science* Vol323:116–119.

213 Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L., Robbins, L. L. (2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18–20 April 2005, St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S Geological Survey, 88 pp.

Le suivi *in-situ* des réponses directes des coraux à l'acidification des océans au niveau de la calcification est d'autant plus compliqué qu'il existe une synergie de facteurs autres que la simple chimie de l'eau de mer, comprenant la lumière, la température et les nutriments. D'autre part, il existe une variabilité diurne de la chimie du carbonate observée dans les eaux récifales correspondant à la photosynthèse-respiration, et à la calcification-dissolution de la communauté corallienne.

Les coraux sclératiniens *Oculina patagonica* et *Madracis pharencis*, placés dans un système à flux continu maintenu à température ambiante mais à des niveaux réduits de pH entre 7,3-7,6 et 8,0-8,3 pendant 12 mois, ont subi une dissolution totale de leur squelette tout en maintenant leurs fonctions essentielles et en retenant leurs algues symbiotiques, leur fixation sur le substrat et leur capacité de reproduction. Une fois transférés dans des conditions correspondant au pH environnant, les polypes à corps mou se sont calcifiés et ont reformé des colonies, signifiant peut-être que les coraux peuvent survivre à des changements à grande échelle dans l'environnement<sup>214</sup>. Toutefois, cette situation n'est pas nécessairement celle qui prédomine dans l'environnement naturel, où l'organisme a des exigences d'énergie supplémentaires, issues par exemple de la prédation et des variations dans la disponibilité de la nourriture.

On a observé une perte nette de matériau de CaCO<sub>3</sub> liée à une diminution du taux de calcification et une augmentation du taux de dissolution du carbonate dans des communautés coralliennes de récifs subtropicaux incubées dans des mésocosmes à flux continu soumis aux conditions d'eau de mer futures. Cette communauté d'espèces calcifiantes était dominée par le corail *Montipora capitata*. Le taux de calcification moyen journalier de la communauté était positif, à 3.3 mmol CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> à la pCO<sub>2</sub> de l'eau de mer environnante, mais était négatif, à -0.04 mmol CaCO<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> lorsque la pCO<sub>2</sub> de l'eau de mer était deux fois supérieure. Ces résultats expérimentaux renforcent la conclusion que certaines communautés calcifiantes nettes pourraient devenir des communautés subissant une dissolution nette dans le courant du siècle, en réponse à l'acidification d'origine anthropique des océans. Néanmoins, certains coraux exposés à ces conditions expérimentales d'eau de mer à une pCO<sub>2</sub> élevée sont restés en bonne santé, ont maintenu leur calcification (quoiqu'à un taux plus bas que leur taux normal), et ont formé des dépôts importants de CaCO<sub>3</sub><sup>215</sup>.

Les algues corallines encroûtantes, algues rouges omniprésentes, sont d'une importance fondamentale pour les écosystèmes des récifs coralliens, permettant la stabilisation des structures récifales et fournissant une source de nourriture importante pour les organismes benthiques comme les oursins, les poissons perroquets et plusieurs espèces de mollusques<sup>216</sup>, compris les ormeaux, prisés commercialement autant que culturellement. Les algues corallines encroûtantes sont une composante majeure du benthos marin des pôles aux régions tropicales, et on pense qu'elles influencent la fixation des recrues coralliennes. Des expériences de laboratoire exposant les algues à des taux de CO<sub>2</sub> jusqu'à deux fois supérieurs aux valeurs actuelles ont montré une diminution des taux de croissance allant jusqu'à 40%, une baisse du recrutement de 78%, et une couverture de surface réduite de 92%<sup>217</sup>. Dans les environnements tropicaux et subtropicaux, une dépendance des algues calcaires, ainsi que d'autres organismes calcifiants de récifs tels que les échinodermes et les foraminifères benthiques, sur la calcite magnésienne, le plus soluble de tous les minéraux de carbonate de calcium, risque de faire d'elles les premières victimes de l'acidification des océans. Ces algues sont essentielles à la consolidation des récifs; leur disparition poserait un risque grave à l'accrétion nette des récifs avant même qu'une réduction du taux de calcification ne soit devenue un problème important pour les coraux sclératiniens<sup>218, 219</sup>.

Alors que les océans deviennent moins saturés en minéraux de carbonate dans le temps, on s'attend à ce que les coraux construisent des squelettes plus faibles et que leur croissance soit plus lente, leur permettant mal de retenir

214 Fine, M., Tchernov, D. (2007). Scleractinian Coral Species Survive and Recover from Decalcification. *Science*, Vol 315:1811.

215 Andersson, A. J., Kuffner, I. B., Mackenzie, F. T., Jokiel, P. L., Rodgers, K. S., & Tan, A., 2009. Net Loss of CaCO<sub>3</sub> from a subtropical calcifying community due to seawater acidification: mesocosm-scale experimental evidence. *Biogeosciences* 6(8): 1811-1823

216 Chisholm, J. R. M. (2000). Calcification by crustose coralline algae on the northern Great Barrier Reef, Australia. *Limnol. Oceanogr.* 45:1476-1484.

217 Kuffner, I. B., et al (2007). Decreased abundance of crustose coralline algae due to ocean acidification. *Nature Geoscience*. 1:114-117.

218 Veron, J. E. N. (2008) Mass extinctions and ocean acidification: biological constraints on geological dilemmas. *Coral Reefs* 27:459-472.

219 Kuffner, I. B., et al (2007). Decreased abundance of crustose coralline algae due to ocean acidification. *Nature Geoscience*. 1:114-117.

un avantage compétitif sur les autres organismes marins<sup>220,221</sup>. Une plus grande fragilité des squelettes coralliens les rend vulnérables aux tempêtes et à la bioérosion, réduisant ainsi la complexité structurelle du système récifal, amoindrissant à son tour la qualité de l'habitat et la diversité avec une perte concomitante de la fonction de protection du littoral<sup>222</sup>. Les récifs coralliens sont menacés globalement par une série de menaces anthropiques et naturelles comprenant la croissance démographique, le blanchissement des coraux lié à des températures excessives, la surpêche, le développement côtier, la pollution des terres, le ruissellement des nutriments et les maladies coralliennes. On estime que 19% de la surface initiale totale de récifs coralliens a été effectivement perdue, et que 35% de cette surface risque de disparaître durant le prochain demi-siècle<sup>223</sup>. Les effets climatiques de la hausse de température et de l'acidification des océans aggravent toutes ces menaces pesant sur les écosystèmes récifaux<sup>224</sup>.

La réponse des récifs coralliens tropicaux à l'acidification des océans ira d'une réduction de croissance du squelette affectant la survie du corail à la perte de capacité de maintenir leur propre structure. Ces "seuils" pourront varier entre espèces de corail et d'un récif à l'autre. Par exemple, le succès reproductif et la maturité sexuelle de certaines espèces de corail comme *Goniastrea aspera* dépendent de la taille de la colonie plutôt que de son âge, et risquent donc d'être réduits dans des conditions de pH bas où les taux de croissance sont plus lents<sup>225</sup>. Il a été suggéré que la croissance du squelette de la plupart des coraux diminuera d'environ 30% une fois que la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique atteindra 560ppm<sup>226</sup> et que la plupart des récifs passeront d'un état de croissance à un état d'érosion de récif, surtout dans les zones où d'autres menaces globales sont prévalentes<sup>227</sup>.

L'analyse de nombreux sites de récifs coralliens de la côte est du Panama (Golfe de Panama et Golfe de Chiriqui) et des îles Galapagos montre que la chimie de l'eau spécifique au site a un effet crucial sur la croissance et le développement des récifs coralliens. Par rapport aux récifs du golfe du Mexique, les structures des récifs du Pacifique tropical est (PTE) sont très faiblement cimentées et ne sont maintenues en place que par une fine enveloppe formée d'organismes encroûtants. Ceci les rend extrêmement vulnérables à la bioérosion — les taux de bioérosion des récifs étudiés dans le PTE sont effectivement les plus élevés qui n'aient jamais été relevés. Cette étude indique que les récifs du PTE représentent un véritable exemple de croissance de récif corallien dans des eaux à basse saturation, qui permet d'entrevoir comment l'interface biologique-géologique des récifs coralliens peut changer dans un monde riche en CO<sub>2</sub><sup>228</sup>.

### ***Les communautés de coraux d'eaux froides***

Les communautés de coraux d'eaux froides, ou biohermes, sont réparties dans tous les océans du monde à une profondeur variant entre 200 et 1000m et à des températures allant de 4° à 12°C. Ces vastes zones de plus de 100 km<sup>2</sup>,

220 Guinotte, J. M., Orr, J., Cairns, S., Freiwald, A., Morgan, L., George, R. (2006). Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea scleractinian corals? *Front Ecol Environ* 4(3):141–146.

221 Atkinson, M. J., Cué, P. (2008). Possible effects of ocean acidification on coral reef biogeochemistry: topics for research. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol. 373:249–256.

222 Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., and Hatziolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737–1742.

223 Wilkinson, C. (2008). Status of Coral Reefs of the World: 2008. Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, Australia, 296 p.

224 Gledhill, D. K., Wanninkhof, R., Millero, F. J., Eakin, M. (2008). Ocean Acidification of the Greater Caribbean Region 1996–2006. *Journal of Geophysical Research* Vol 113:C10031.

225 Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L., Robbins, L. L. (2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18–20 April 2005, St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S Geological Survey, 88 pp.

226 Langdon, C., and M.J. Atkinson. 2005. Effect of elevated pCO<sub>2</sub> on photosynthesis and calcification of corals and interactions with seasonal change in temperature/irradiance and nutrient enrichment, *Journal of Geophysical Research* 110, CC09S07, doi:10.1029/2004JC002576.

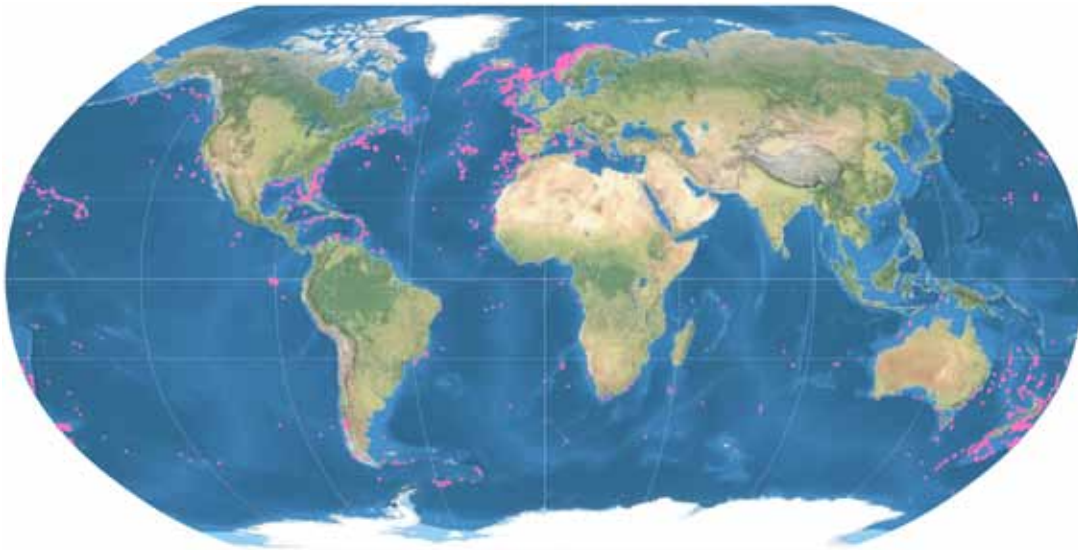
227 TNC (2008). The Honolulu Declaration on Ocean Acidification and Reef Management: Workshop Report 12–14 August 2008.

228 Manzello, D. P., Kleypas, J. A., Budd, D. A., Eakin, M., Glynn, P. W., Langdon, C. (2008). Poorly cemented coral reefs of the eastern tropical Pacific: Possible insights into reef development in a high-CO<sub>2</sub> world *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2008 July 29; 105(30): 10450–10455.



occupées par des structures récifales de carbonate (par exemple le récif de Røst en Norvège) construites par seulement six des 700 espèces connues, sont d'une grande importance en tant que refuge et zone de nourriture pour les organismes et les espèces commerciales de poisson<sup>229</sup>, supportant une faune caractéristique beaucoup plus diverse que celle des fonds de mer avoisinants<sup>230</sup>. On estime que 40% des zones de pêche actuelles se situent dans des eaux abritant des communautés de coraux d'eaux froides<sup>231</sup>. Ces coraux à croissance lente et d'une grande longévité sont particulièrement sensibles aux pressions liées aux activités anthropiques telles que le chalutage de fond, l'exploration des gisements de pétrole et de gaz et les activités industrielles sous-marines (par exemple les câbles sous-marins), qui s'ajoutent à la pression générale liée aux changements de la circulation et de la chimie de l'océan.

L'état de saturation du carbonate diminuant généralement avec la latitude et la profondeur, les eaux à teneur naturellement haute en CO<sub>2</sub> où l'on retrouve les coraux d'eaux froides sont souvent moins favorables à la calcification<sup>232</sup>. Toutefois plus de 95% des communautés de coraux d'eaux froides se situent dans des eaux supersaturées en aragonite, leur distribution globale étant donc restreinte aux bassins océaniques où l'horizon de saturation de l'aragonite est relativement profond (Figure 13). La remontée prévue dans le temps de l'horizon de saturation de l'aragonite associée à l'augmentation des concentrations de CO<sub>2</sub> atmosphérique risque de rendre une grande partie des océans inhabitable aux coraux d'eaux froides bien plus tôt qu'à leurs homologues des eaux chaudes<sup>233</sup>. En effet, d'après les prévisions, 70% des écosystèmes de coraux d'eaux froides pourraient se retrouver dans des conditions d'eaux corrosives avant la fin du siècle, et certains pourraient être en situation de sous-saturation d'aragonite dès 2020<sup>234, 235</sup>.



**FIGURE 13:** Coraux d'eaux froides (Version 2.0 2005, UNEP-WCMC). Sourced from A. Freiwald, Alex Rogers and Jason Hall-Spencer, and other contributors<sup>236</sup>.

229 Turley, C. M., Roberts, J. M., Guinotte, J. M. (2007). Corals in deepwater: will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems. *Coral Reefs* 26:445–448.

230 Ibid.

231 WWF. 2004. Cold-water corals: fragile havens in the deep.

232 Guinotte, J., Fabry, V. J. (2009) The Threat of Acidification to Ocean Ecosystems. *The Journal of Marine Education*, Vol, 25 (1):2–7.

233 Guinotte, J. M., Orr, J., Cairns, S., Freiwald, A., Morgan, L., George, R. (2006). Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea scleractinian corals? *Front Ecol Environ* 4(3):141–146.

234 Ibid.

235 Ibid.

236 <http://maps.grida.no/go/graphic/coldwater-coral-reefs-distribution>

L'évolution des coraux d'eaux profondes a pris place dans des environnements froids, sombres et riches en nutriments, et ils dépendent du flux de matière organique en provenance des eaux de surface. La hausse de température et les changements de salinité liés à l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans les océans de la planète pourraient modifier la circulation et par conséquent la disponibilité de nourriture pour les coraux, ainsi que leur physiologie et leur biochimie, avec des répercussions graves pour ces écosystèmes importants<sup>237</sup>.

Les communautés de coraux d'eaux froides n'ont que récemment fait l'objet d'études, grâce au développement d'instruments suffisamment complexes capables d'explorer les eaux profondes. Les premières mesures de taux de calcification de coraux profonds faites récemment sur *Lophelia pertusa* montrent que ce sont les jeunes polypes qui tendent à se calcifier le plus rapidement, avec des taux comparables à ceux des coraux bâtisseurs de récifs à croissance lente. En conditions de pH bas, on observe des taux de calcification nettement réduits en réponse à une augmentation de pCO<sub>2</sub> et une baisse de pH, les jeunes polypes étant plus touchés (59% de baisse) que les plus âgés (40% de baisse)<sup>238</sup>. Si l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> ne ralentit pas, l'acidification des océans pourrait menacer ces environnements de coraux d'eaux froides vulnérables avant que leur diversité et leur importance biologiques n'aient été adéquatement explorées<sup>239</sup>.

### **Échinodermes, crustacés, mollusques**

Bien que le rôle du CaCO<sub>3</sub> chez les échinodermes, les crustacés, les mollusques et les foraminifères puisse varier selon le stade du cycle de vie, le CaCO<sub>3</sub> est néanmoins essentiel à leur existence et à leur bon fonctionnement. Les fonctions physiologiques autres que celles concernant la structure et la protection comprennent la défense passive par la pigmentation de la coquille, et la régulation du pH en se refermant à l'eau de mer environnante, comme chez la balane. Les seiches ont une coquille d'aragonite interne leur servant à la fois de support de structure et de dispositif de contrôle de flottabilité<sup>240</sup>. Les exosquelettes durs des crustacés consistent de dépôts importants de CaCO<sub>3</sub>. Au cours du cycle de mue, les crustacés conservent leurs minéraux par l'absorption dans le flux sanguin du CaCO<sub>3</sub> présent dans leur coquille avant de la perdre, afin de renforcer leur nouvel exosquelette<sup>241</sup>, phase pendant laquelle ils sont vulnérables aux prédateurs et à la maladie.

Les connaissances sur les effets de l'augmentation de CO<sub>2</sub> sur le benthos marin des eaux peu profondes vont grandissant. Des études récentes ont examiné les effets d'une exposition à long terme (3–6 mois) à des environnements à taux de CO<sub>2</sub> élevés sur la physiologie et sur la calcification des mollusques et des oursins, et les résultats donnent à penser qu'une augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique de 200ppm aurait des conséquences marquantes sur la physiologie de certaines espèces, du fait de leur mécanismes de régulation du pH interne<sup>242</sup>. Des spécimens de la moule *Mytilus galloprovincialis*<sup>243</sup> et des oursins *Hemicentrotus pulcherrimus* et *Echinometra mathaei* ont témoigné d'une baisse importante de taux de croissance, de taille et de poids, ainsi que de dissolution de leur coquille, après avoir été exposés à un pH bas<sup>244</sup>. Il a été observé que les taux de calcification chez *Mytilus edulis* suivent une décroissance

237 Guinotte, J. M., Orr, J., Cairns, S., Freiwald, A., Morgan, L., George, R. (2006). Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea scleractinian corals? *Front Ecol Environ* 4(3):141–146.

238 Maier, C., Hegeman, J., Weinbauer, M. G., Gattuso, J.-P. (2009). Calcification of the cold-water coral *Lophelia pertusa* under ambient and reduced pH. *Biogeosciences*, 6: 1671–1680.

239 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

240 Gutowska, M., Portner, H. O., Melzner, F. (2008). Growth and calcification in the cephalopod *Sepia officinalis* under elevated seawater pCO<sub>2</sub>. *Mar Ecol Prog Ser* 373:303–309.

241 Pechenik, J. A. (2000). *Biology of the Invertebrates*, 4th ed. Boston: McGraw-Hill <http://www.biologyreference.com/Co-Dn/Crustacean.html#ixzz0W5s4vpmJ>

242 Shirayama, Y., Thornton, H. (2005). Effect of increased atmospheric CO<sub>2</sub> on shallow water marine benthos. *Journal of Geophysical Research*, Vol, 110:C09S08.

243 Michaelidis, B., Ouzounis, C., Paleras, A., Portner, H. O. (2005). Effects of long-term moderate hypercapnia on acid-base balance and growth rate in marine mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Mar Ecol Prog Ser* 293:109–118.

244 Shirayama, Y., Thornton, H. (2005). Effect of increased atmospheric CO<sub>2</sub> on shallow water marine benthos. *Journal of Geophysical Research*, Vol, 110:C09S08

linéaire par rapport à une augmentation de CO<sub>2</sub> et que 70% des larves de l'huître *Crassostrea gigas* élevées à un pH de 7,4 soit n'avaient aucune coquille ou bien n'avaient qu'une coquille partielle, par rapport au développement réussi de 70% des embryons de contrôle<sup>245</sup>. Par ailleurs, on a aussi observé que la mobilité du sperme de *C. gigas* diminue de 40% après des changements de pH importants passant de pH8 à pH6. Il faut cependant noter que ce changement excède le changement de pH océanique anticipé suite à l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> prévue dans le futur immédiat<sup>246</sup>.

*M. edulis* est dotée de mécanismes physiologiques robustes qui lui permettent de protéger ses tissus contre une exposition à court terme à l'eau de mer très acidifiée. Ces mécanismes ont néanmoins des coûts énergétiques, qui peuvent résulter en une croissance réduite pendant des expositions à long terme. Une exposition à moyen terme (32 jours) de *M. edulis* à des taux élevés de CO<sub>2</sub> eut pour effet la perturbation de réponses immunitaires importantes et une dégradation importante de la santé de l'organisme causée par la suppression du taux de phagocytose<sup>247</sup> et une augmentation d'ions de calcium dans l'hémolymphe suite à la dissolution des coquilles de CaCO<sub>3</sub>. Les changements de la chimie de l'eau de mer associés à l'acidification des océans anticipés à long-terme vont donc vraisemblablement avoir un effet important sur la santé et la survie des populations de *M. edulis*<sup>248</sup>. Les bancs de moules représentent un habitat côtier dominant la longueur du Pacifique Nord-Est et de l'Atlantique Nord-Ouest, et forment un habitat important le long de la plupart des côtes rocheuses tempérées, à la fois source d'alimentation et de structure pour toute une série d'espèces diverses dans ce qui serait autrement un environnement stressant.

Des diminutions importantes (25%) de la vitesse de nage, de la mobilité et du succès de reproduction du sperme ont été observées chez l'oursin *Heliocidaris erythrogramma* après l'avoir exposé à une acidification liée au CO<sub>2</sub> de 0,4 unité, ceci étant la limite supérieure des prédictions du GIEC pour 2100<sup>249</sup>. Les observations montrent aussi qu'un retard du développement produit une augmentation du taux de mortalité embryonnaire liée à la prédation durant la phase planctonique<sup>250</sup>. Toutefois, une autre étude indique que la fertilisation et le développement de *H. erythrogramma* durant les phases initiales ne sont pas sensibles à une diminution de pH dans le cadre des valeurs anticipées pour le changement de l'environnement, mais le sont à la température, celle-ci étant donc à l'origine de l'échec de développement. Ceci est dû en partie au pH bas (pH 7,6) favorisant naturellement la fertilisation de l'oursin, et aux possibilités d'adaptation de cette espèce à une fourchette de pH caractéristique aux habitats intertidaux large. Ceci indique que les embryons d'oursin risquent de ne pas atteindre le stage de la calcification dans un océan chaud, et souligne le besoin de conclure des expériences qui puissent examiner conjointement les deux agents principaux de pression qui vont transformer les océans de la planète: la température et l'acidification<sup>251</sup>. Bien que le mécanisme de ces effets ne soit pas encore bien compris, ces conclusions ont des conséquences importantes pour la reproduction et la viabilité de la population des espèces marines au frais dispersé dans les océans acidifiés et réchauffés du futur. Par ailleurs, les tests d'oursin sont constitués de calcite magnésienne, bien plus soluble que la calcite, et leur morphologie met leur cavité centrale en contact direct avec l'eau de mer environnante, les vulnérabilisant à des baisses de pH liées au CO<sub>2</sub><sup>252</sup>.

245 Kurihara, H. (2008). Effects of CO<sub>2</sub> driven ocean acidification on the early developmental stages of invertebrates. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol. 373:275–284.

246 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

247 Bibby, R., Widdicombe, S., Parry, H., Spicer, J., Pipe, R. (2008). Effects of ocean acidification on the immune response of the blue mussel *Mytilus edulis*. *Aquatic Biology*, Vol. 2:67–74.

248 Beesley, A., Lowe, D. M., Pascoe, C.K., Widdicombe, S. (2008). Effects of CO<sub>2</sub>-induced seawater acidification on the health of *Mytilus edulis*. *Climate Research*, Vol. 37:215–225.

249 Havenhand, J. N., Buttler, F. R., Thorndyke, M. C., Williamson, J. E. (2008). Near-future levels of ocean acidification reduce fertilization success in a sea urchin. *Current Biology*, Vol. 18(5):651–652.

250 Kurihara, H., Shirayama, Y. (2004). Effects of increased atmospheric CO<sub>2</sub> on sea urchin early development. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol 274:161–169.

251 Byrne, M., Ho, M., Selvakumaraswamy, P., Nguyen, H. D., Dworjanyn, S. A., Davis, A. R. (2009). Temperature, but not pH, compromises sea urchin fertilization and early development under near future climate change scenarios. *Proc. R. Soc. B*, 276:1883–1888.

252 Shirayama, Y., Thornton, H. (2005). Effect of increased atmospheric CO<sub>2</sub> on shallow water marine benthos. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110:C09S08

Une exposition de l'ophiure *Ophiothrix fragilis* à un pH bas fut suivi d'une diminution temporaire de la taille larvaire, ainsi que d'anomalies du développement et de la formation de squelette. Une acidification de 0,2 unité provoqua une mortalité larvaire de 100% en huit jours. Le taux de survie des larves de contrôle pendant la même période était de 70%. On pense que le squelette de calcite de la larve de l'ophiure aide des fonctions clés comme l'alimentation, la migration verticale et la défense contre les prédateurs. Des anomalies du développement du squelette auraient donc des conséquences dramatiques pour leur valeur sélective. On retrouve *Ophiothrix fragilis*, une espèce clé, dans toutes les mers peu profondes de l'Atlantique est, en grandes densités et en populations stables<sup>253</sup>. L'ophiure fouisseuse *Amphiura filiformis* joue un rôle important dans le cycle des nutriments par la bioturbation des sédiments et les activités d'irrigation de terrier. Les changements physiologiques d'*Amphiura filiformis* obtenus lors d'une étude où elles étaient exposées au CO<sub>2</sub> eurent un effet sur les flux de nitrate par la modification des activités d'irrigation, liée soit à un plus grand besoin d'oxygène ou de nourriture, soit à une perte de masse musculaire réduisant leur capacité de bioirrigation. Cette étude implique qu'une dégradation des organismes liée à l'acidification des océans peut avoir un effet sur les relations entre les composantes clés gouvernant les fonctions d'un écosystème<sup>254</sup>.

Une étude de la synergie des effets de l'acidification des océans et de la température sur la fertilisation et le développement embryonnaire de l'huître creuse d'Australie (*Saccostrea glomerata*) à haute importance économique et écologique, montra qu'une hausse de la pCO<sub>2</sub> et un éloignement de température de la température optimale pour la fertilisation (26°C) réduit nettement le taux de fertilisation. Une exposition prolongée à une pCO<sub>2</sub> et une température élevées durant les stades précoces du développement entraîna une diminution du nombre de larves veligères-D (à coquille), un plus grand nombre d'anomalies et une réduction de taille dans les environnements à haut CO<sub>2</sub>, et pourrait avoir des effets létaux à des températures suboptimales<sup>255</sup>.

Les organismes semblent être plus sensibles aux perturbations de l'environnement aux stades précoces de leur vie qu'une fois adultes<sup>256</sup>. Par exemple les jeunes de deux espèces d'escargots à Ischia, un site acidifié naturellement, étaient absents des zones où le pH descendait à 7,4, et les coquilles des adultes présents dans cette zone témoignaient d'une corrosion et d'une faiblesse liées à l'eau de mer acidifiée, qui augmentaient certainement leur risque de prédation (Figure 14)<sup>257</sup>. Des études examinant les effets de l'acidification des océans sur le développement des embryons du gastéropode intertidal *Littorina obtusata* ont révélé un développement généralement plus long, des changements dans les mouvements embryonnaires, et une modification de la forme de la coquilles des juvéniles, suggérant que l'acidification des océans peut avoir des effets subtils mais significatifs sur les embryons d'organismes marins<sup>258</sup>.

Ces résultats sont en contraste avec ceux d'une étude récente sur les effets de l'acidification des océans sur le cycle de vie de la balane *Amphibalanus Amphitrite*, qui ne révéla aucun effet lié à une baisse de pH sur la condition des larves, la taille des cyprides (dernier stage larvaire), la fixation et la métamorphose des cyprides, la croissance des juvéniles et des adultes, ou la production des œufs. Néanmoins, les balanes exposées à une acidification de l'eau de mer liée au CO<sub>2</sub> baissant à un pH de 7,4 tendaient à avoir des diamètres de base de coquille plus grands durant leur croissance, ce qui suggère un mécanisme de compensation dans la calcification. D'autre part, il fallait plus de force pour briser les coquilles d'adultes élevés à un pH de 7,4, indiquant une calcification plus lourde à la base de la paroi de la coquille, qui correspond à la zone de croissance<sup>259</sup>.

253 Dupont S., Havenhand J., Thorndyke W., Peck L. & Thorndyke M., 2008. Near-future level of CO<sub>2</sub>-driven ocean acidification radically affects larval survival and development in the brittlestar *Ophiothrix fragilis*. *Marine Ecology Progress Series* 373:285–294

254 Wood, H. L., Spicer, J. I., Widdicombe, S. (2008). Ocean acidification may increase calcification – but at a cost. *Proc. R. Soc. Lond. B – Biol. Sci.*, 275(1644):1767–1773.

255 Parker, L. M., P. M. Ross, and W. A. O'Connor (2009). The effect of ocean acidification and temperature on the fertilization and embryonic development of the Sydney rock oyster *Saccostrea glomerata* (Gould 1850). *Global Change Biology*, 15(9), 2123–2136, doi:10.1111/j.1365-2486.2009.01895.x.

256 Gazeau, F., Quiblier, C., Jansen, J., Gattuso, J. P., Middleburg, J., Heip, C. (2007). Impact of elevated CO<sub>2</sub> on shellfish calcification. *Geophys Res Lett* 34:L07603.

257 Hall-Spencer, J. M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S. M., Rowley, S. J., Tedesco, D., Buia, M. C. (2008). Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature* 454:96–99.

258 Ellis, R. P., Bersey, J., Rundle, S., Hall-Spencer, J. M., Spicer, J. I. (2009). Subtle but significant effects of CO<sub>2</sub> acidified seawater on embryos of the intertidal snail, *Littorina obtusata*. *Aquat Biol* 5:41–018.

259 McDonald, M. R., McClintock, J. B., Amsler, C. D., Rittschof, D., Angus, R. A., Orihuela, B., Lutostanski, K. (2008). Effects of ocean acidification over the life history of the barnacle *Amphibalanus Amphitrite*. *Mar Ecol Prog Ser* 385:179–187.



**FIGURE 14:** *P. caerulea* et *H. truculus* illustrant une érosion importante et un effritement de leurs coquilles dans des zones d'acidité naturelle descendant jusqu'à pH 7.4. Source: Hall-Spencer, 2008<sup>260</sup>.

Une étude du mollusque céphalopode actif *Sepia officinalis* a montré que cet invertébré est capable non seulement de maintenir son taux de calcification, mais aussi son taux de croissance et son métabolisme lorsqu'il est exposé à des pressions partielles de dioxyde de carbone élevées ( $pCO_2$ ). Pendant une période expérimentale de six semaines, des *S. officinalis* juvéniles ont conservé leur taux de calcification à des concentrations de  $CO_2$  de ~4,000 et ~6,000 ppm, et ont continué de grandir à la même vitesse et avec la même efficacité de croissance brute que les animaux de contrôle. Ils gagnèrent 4% de masse corporelle par jour et la masse de leur os de seiche calcifiée augmenta d'environ 500%. L'étude conclut que les céphalopodes actifs ont une certaine préadaptation au relèvement à long terme des niveaux de carbone<sup>261</sup>.

L'élevage de stades larvaires précoces du crustacé à grande importance économique, le homard européen *Homarus gammarus* dans de l'eau de mer acidifiée par le  $CO_2$  entraîna une diminution de la masse de la carapace durant le stade final du développement larvaire. Elle fut accompagnée d'une diminution du contenu minéral de l'exosquelette (calcium et magnésium), bien que les eaux de traitement aient été saturées en polymorphes de carbonate de calcium. Les changements physiologiques enregistrés ont été attribués à une acidose ou à une hypercapnie perturbant la fonction homéostatique normale. Bien qu'il n'y ait pas eu d'observations d'effets sur la survie, la longueur de carapace, ou le développement au stade zoé (stade larvaire), il semble que la perturbation indirecte de la calcification et de la masse de la carapace par l'acidification des océans puisse avoir un impact sur la valeur sélective et le succès du recrutement des larves de homards, avec des conséquences graves pour la dynamique de la population et le fonctionnement de l'écosystème marin<sup>262</sup>.

#### D. LES COMMUNAUTÉS PÉLAGIQUES

Les organismes calcifiants sont une composante importante des écosystèmes pélagiques, formant la base de la chaîne trophique marine, utilisant la majorité du carbone organique dont se servent les organismes vivant dans les couches moyennes et profondes des océans, et jouant un rôle important dans les interactions entre les océans de surface et l'atmosphère, par exemple dans l'échange de  $CO_2$ <sup>263</sup>. Toute modification du fonctionnement de ces organismes liée à l'acidification des océans pourrait avoir des conséquences importantes pour le fonctionnement de l'écosystème. Tout changement à la pompe biologique et donc au flux de matière organique particulaire des eaux surjacentes aux communautés benthiques pourrait changer le cycle des nutriments entre les sédiments de fond et la colonne d'eau surjacente de façon significative. Le tableau 3 fait la synthèse des groupes pélagiques clés, du rôle ou de l'influence du  $CaCO_3$ , et des impacts observés ainsi que des conséquences liées à une exposition à un taux élevé de  $CO_2$  et une baisse de pH.




260 Hall-Spencer, J. M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S. M., Rowley, S. J., Tedesco, D., Buia, M. C. (2008). Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature* 454:96–99.

261 Gutowska, M., Portner, H. O., Melzner, F. (2008). Growth and calcification in the cephalopod *Sepia officinalis* under elevated seawater  $pCO_2$ . *Mar Ecol Prog Ser* 373:303–309.

262 Arnold, K. E., Findlay, H. S., Spicer, J. I., Daniels, C. L., & Boothroyd, D., 2009. Effect of  $CO_2$ -related acidification on aspects of the larval development of the European lobster, *Homarus gammarus* (L.). *Biogeosciences* 6(8): 1747–1754.

263 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

**TABLEAU 3:** Résumé des impacts observés et prévus d'un taux élevé de CO<sub>2</sub> et de l'acidification des océans sur les organismes marins pélagiques.

Organisme	Fonction du CaCO <sub>3</sub>	Impacts observés d'un taux de CO <sub>2</sub> élevé	Impacts observés d'un pH bas	Implications socio-écologiques
Foraminifères  (Image: UCMP)	Protection mécanique	Diminution de la masse de coquille des foraminifères <i>Orbulina universa</i> 4–8% et <i>Globigerinoides sacculifer</i> 6–14% <sup>264</sup> dans des conditions de pCO <sub>2</sub> élevée	30–35% de diminution de la masse de coquille depuis l'holocène préindustriel chez <i>Globigerina bulloides</i> <sup>265</sup> Coquilles plus légères, à parois plus fines, chez les jeunes foraminifères planctoniques de <i>Globigerinoides ruger</i> à la surface du sédiment, comparées à des coquilles trouvées plus en profondeur dans le sédiment <sup>266</sup>	Production de la majorité du CaCO <sub>3</sub> pélagique au niveau mondial <sup>267</sup>
Ptérotopodes  (Image: NOAA)	Protection mécanique		Diminution de 28% de la calcification chez <i>Limacina helicina</i> en réponse à une baisse de pH, observée au pH prévu pour 2100, par rapport au taux observé au pH actuel <sup>268</sup> La coquille des ptérotopodes, <i>Clio pyramidata</i> , du Pacifique sub-arctique exposés à des sous-saturations d'aragonite similaires à celles prévues pour les eaux de l'océan Austral d'ici 2100 ont subi une dissolution de leur coquille en moins de 48 heures <sup>269</sup>	Perte de source de nourriture pour certains prédateurs marins clés - maquereau, saumon <sup>270</sup>
Coccolithophores  (Image: Celsias)	Plaques de calcite formant la structure	Diminution des taux de calcification de 40% liée à une hausse de pCO <sub>2</sub> chez <i>Emiliania huxleyi</i> <sup>271</sup> Pas de changement observé chez <i>Coccolithus pelagicus</i> en réponse à une pCO <sub>2</sub> élevée <sup>272</sup> Augmentation suivie d'une diminution du taux de calcification chez <i>Calcidiscus leptoporus</i> <sup>273</sup> Doublement du taux de calcification spécifique à la cellule à une pCO <sub>2</sub> de 750µatm comparée à 300µatm chez <i>E. Huxleyi</i> <sup>274</sup>		Changement dans la structure de la communauté phytoplanktonique Variations potentielles de la stœchiométrie de base des cellules liées à une augmentation de la pCO <sub>2</sub> , ayant une influence sur les choix de nourriture des herbivores au deuxième niveau trophique <sup>275</sup> Les floraisons aident l'effet albédo global de jusqu'à 0,13%, reflétant la lumière du soleil dans l'espace <sup>276</sup> La production de diméthylsulfide réduit le flux radiatif émis par la surface de la terre

Organisme	Fonction du CaCO <sub>3</sub>	Impacts observés d'un taux de CO <sub>2</sub> élevé	Impacts observés d'un pH bas	Implications socio-écologiques
Poissons de mer, invertébrés et mammifères marins		<p>Des sérioles adultes du Japon <i>Seriola quinqueradiata</i>, et respectivement en 8 et 48 heures durant une exposition à une eau de mer équilibrée avec 5% de CO<sub>2</sub>.<sup>277</sup></p> <p>Le crabe d'eaux profondes <i>Chionoectes tameri</i>, n'a pas la capacité de réguler le pH extracellulaire en réponse (24 heures) à une pCO<sub>2</sub> élevée. Par contre, le crabe d'eaux peu profondes <i>Cancer magister</i> réussit à rétablir le pH de son hémolymph.<sup>278</sup></p> <p>Augmentation du budget énergétique liée à la régulation acide-base et au contrôle cardio-respiratoire des poissons.<sup>279</sup></p> <p>Calcification de l'aragonite accrue dans les os de l'oreille interne (otolithes) du poisson <i>Atractoscion nobilis</i> élevé dans l'eau de mer à une pCO<sub>2</sub> élevée (993 et 2558 µatm de CO<sub>2</sub>).<sup>280</sup></p>	<p>Développement embryonnaire prolongé.<sup>281</sup></p> <p>Diminution de la capacité des larves du poisson-clown <i>Amphiprion percula</i> de reconnaître les références olfactives déclenchant la fixation lorsqu'elles sont élevées à un pH océanique de 7,8.<sup>282</sup></p> <p>L'eau de mer enrichie de CO<sub>2</sub> est plus toxique aux œufs et aux larves de la dorade japonaise, <i>Pagrus major</i>, que l'eau de mer acidifiée par le HCl, à pH d'eau de mer égal.<sup>283</sup></p>	<p>Juveniles et stades précoces du développement plus vulnérables, entraînant une réduction de la population et des changements dans la structure de l'écosystème.<sup>284</sup></p> <p>Peu d'évidence d'acclimatation respiratoire chez les poissons de mer.<sup>285</sup></p> <p>Les écosystèmes d'herbiers pourraient bénéficier d'une augmentation de la pCO<sub>2</sub> fournissant un habitat essentiel aux mammifères marins. L'herbe de mer <i>Zostera marina</i> subit une augmentation de sa biomasse et de son taux de reproduction.<sup>286</sup></p>

264 Bijma, J., Honisch, B., Zeebe, R. E. (2002). The impact of the ocean carbonate chemistry on living foraminiferal shell weight: Comment on "Carbonate ion concentration in glacial-age deep waters of the Caribbean Sea" by W. S. Broecker and E. Clark. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 3: 1064.

265 Moy, A. D., W. R. Howard, S. G. Bray, and T. W. Trull (2009). Reduced calcification in modern Southern Ocean planktonic foraminifera. *Nature Geoscience*, 2, 276–280, doi:10.1038/ngo460.

266 de Moel, H., Ganssen, G. M., Peeters, F. J. C., Jung, S. J. A., Kroon, D., Brummer, G. J. A., & Zeebe, R. E., 2009. Planktic foraminiferal shell thinning in the Arabian Sea due to anthropogenic ocean acidification? *Biogeosciences* 6(9): 1917–1925

267 Fabry, V. J., Seibel, B. A., Freely, R. A., Orr, J. C. (2008). Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science*, 65:414–432.

268 Comeau, S., Gorsky, G., Jeffrey, R., Teysie, J.-L., and Gattuso, J.-P. (2009) Key Arctic pelagic mollusc (*Limacina helicina*) threatened by ocean acidification. *Biogeosciences Discuss.*, 6, 2523–2537.

269 Guinotte, J. M., Fabry, V. J. (2008). Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1134: 320.

270 Fabry, V. J., Seibel, B. A., Feely, R. A., Orr, J. C. (2008). Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science*, 65:414–432.

271 Wolf-Gladrow, D. A., Riebesell, U., Burkhardt, S., Bijma, J. (1999). Direct effects of CO<sub>2</sub> concentration on growth and isotopic composition of marine plankton. *Tellus* 51B:461–476.

272 Langer, M. R., *et al.* (2006). Species-specific responses of calcifying organisms to changing seawater carbonate chemistry. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 7:np.

273 Langer G., Geisen M., Baumann K.H., Kläs J., Riebesell U., Thoms S. and Young J.R., 2006. Species - specific responses of calcifying algae to changing seawater carbonate chemistry. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7(9): 1–12.

274 Iglesias-Rodriguez, M. D., Halloran, P. R., Rickaby, R. E. M., Hall, I. R., Colmenero-Hidalgo, E., Gittins, J. R., Green, D. R. H., Tyrell, T., Gibbs, S. J., von Dassow, P., Rehm, E., Armbrust, E. V., Boessenkool, K. P. (2008). Phytoplankton Calcification in a High-CO<sub>2</sub> World. *Science*, 320:336–340.

275 Engel A., Zondervan I., Aerts K., Beaufort L., Benthien A., Chou L., Delille B., Gattuso J.P., Harlay J., Heemann C., Hoffmann L., Jacquet S., Neijstgaard J., Pizay M.D., Rochelle-Newall E., Schneider U., Terbruggen A. and Riebesell U., 2005. Testing the direct effect of CO<sub>2</sub> concentration on a bloom of the coccolithophorid *Emiliania huxleyi* in mesocosm experiments. *Limnol. Oceanogr.*, 50: 493–507.

276 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

277 Ishimatsu, A., Kikkawa, T., Hayashi, M., Lee, K. S. (2004) Effects of CO<sub>2</sub> on Marine Fish: Larvae and Adults. *Journal of Oceanography* 60:731–741.

278 Pane, E. E., Barry, J. P. (2007). Extracellular acid-base regulation during short term hypercapnia is effective in a shallow-water crab, but ineffective in a deep sea crab. *Mar Ecol Prog Ser* 334:1–9.

279 Ishimatsu, A., Hayashi, M., Kikkawa, T. (2008) Fishes in high CO<sub>2</sub> acidified oceans. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol 373:295–302.

280 Checkley Jr, D. M., Dickson, A. G., Takahashi, M., Radich, J. A., Eisenkolb, N., Asch, R. (2009). Elevated CO<sub>2</sub> enhances otolith growth in young fish. *Science* 324: 1683.

281 Eglisdottir, H., Spicer, J. I. & Rundle, S. D., in press. The effect of CO<sub>2</sub> acidified sea water and reduced salinity on aspects of the embryonic development of the amphipod *Echinogammarus marinus* (Leach). *Marine Pollution Bulletin* in press.

282 Munday, P.L., S.L. Dixon, J.M. Donelson, G.P. Jones, M.S. Pratchett, G.V. Devitsina, and K.B. Doving 2009. Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 106 (6) 1848–1852

283 Ishimatsu, A., Kikkawa, T., Hayashi, M., Lee, K. S. (2004) Effects of CO<sub>2</sub> on Marine Fish: Larvae and Adults. *Journal of Oceanography* 60:731–741.

284 Ibid.

285 Ishimatsu, A., Hayashi, M., Kikkawa, T. (2008) Fishes in high CO<sub>2</sub> acidified oceans. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol 373:295–302.

286 Palacios, S., Zimmerman, R. C. (2007). Response of eelgrass *Zostera marina* to CO<sub>2</sub> enrichment: possible impacts of climate change and potential for remediation of coastal habitats. *Mar Ecol Prog Ser*, 344:1–13.

## Foraminifères et ptéropodes

Les foraminifères et les ptéropodes planctoniques sont deux composantes importantes des écosystèmes polaires et subpolaires et représentent une source de nourriture pour les prédateurs marins, comprenant le saumon du Pacifique nord, le maquereau, le hareng, la morue et les baleines<sup>287</sup>. Les ptéropodes sont les calcifiants qui dominent l'océan Austral, pouvant atteindre des densités allant de plusieurs milliers à plus de 10 000 individus par m<sup>3</sup> dans les zones de haute latitude. Des données obtenues dans l'océan Austral indiquent que les foraminifères planctoniques font déjà preuve d'une calcification réduite, ce qui concorde avec les expériences de laboratoire et les mesures signalant une diminution de la saturation en calcite dans l'océan Austral<sup>288</sup>. Cette étude est la première évidence de terrain d'une diminution de la calcification dans le milieu naturel en réponse à l'acidification des océans. Ces résultats sont corroborés par une étude sur les effets de l'acidification des océans d'origine anthropique sur le poids et l'épaisseur de la paroi des coquilles du foraminifère planctonique *Globigerinoides ruber* de l'ouest de la mer d'Arabie. Les auteurs ont toutefois proposé un scénario où une production saisonnière de coquilles fines et épaisses pourrait aussi expliquer les changements de poids de coquille et d'épaisseur de paroi observés<sup>289</sup>. Une étude complémentaire sur la calcification des ptéropodes montre qu'il existe une variabilité interannuelle importante, mais permet cependant d'établir une ligne de base pour la détection des impacts de l'acidification sur les mollusques pélagiques dans le futur<sup>290</sup>.

Des ptéropodes vivants, *Clio pyramidata*, provenant du Pacifique subarctique et soumis en laboratoire à un niveau de sous-saturation en aragonite équivalent à celui envisagé pour les eaux de surface de l'océan Austral avant la fin du siècle, témoignèrent d'une dissolution de leur coquille en 48 heures, tout en continuant à nager activement<sup>291</sup>. L'impact des changements de la chimie du carbonate a récemment été étudié chez le ptéropode *Limacina helicina*, espèce clé des écosystèmes de l'Arctique. Les ptéropodes ont été élevés sous des conditions de pH contrôlées correspondant à des niveaux de pCO<sub>2</sub> de 350 et 760 µatm. On observa une diminution de 28% du taux de calcification à la valeur de pH prévue pour 2100 par rapport à la valeur de pH actuelle<sup>292</sup>.

Dans des expériences de laboratoire, les coquilles des foraminifères *Orbulina univera* et *Globigerinoides sacculifer*, élevés en eau de mer équivalente à des valeurs de pCO<sub>2</sub> de 560 and 740 ppmv, ont diminué respectivement de 4–8% et de 6–14%, par rapport à la masse de coquille formée lorsque la pCO<sub>2</sub> était à son niveau préindustriel<sup>293</sup>. Malgré des difficultés à élever ces deux groupes en laboratoire, les données indiquent qu'ils réduisent tous deux leur calcification en réponse à l'acidification des océans, mais le nombre restreint d'espèces étudiées ne permet pas d'en tirer des conclusions plus générales. Les ptéropodes fabriquent du CaCO<sub>3</sub> sous forme d'aragonite, et risquent donc d'être particulièrement sensibles à l'acidification des océans, davantage que les coccolithophores et les foraminifères produisant une calcite moins soluble<sup>294</sup>.

287 Fabry, V. J., Seibel, B. A., Freely, R. A., Orr, J. C. (2008). Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science* 65:414–432.

288 Moy, A. D., W. R. Howard, S. G. Bray, and T. W. Trull (2009). Reduced calcification in modern Southern Ocean planktonic foraminifera. *Nature Geoscience*, 2, 276–280, doi:10.1038/ngeo460

289 de Moel, H., Ganssen, G. M., Peeters, F. J. C., Jung, S. J. A., Kroon, D., Brummer, G. J. A., & Zeebe, R. E., 2009. Planktic foraminiferal shell thinning in the Arabian Sea due to anthropogenic ocean acidification? *Biogeosciences* 6(9): 1917–1925.

290 Roberts, D., Howard, W. R., Moy, A. D., Roberts, J. L., Trull, T. W., Bray, S. G., and Hopcroft, R. R. (2008). Interannual variability of pteropod shell weights in the high-CO<sub>2</sub> Southern Ocean. *Biogeosciences Discuss.*, 5(6), 4453–4480

291 Guinotte, J. M., Fabry, V. J. (2008). Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1134: 320.

292 Comeau, S., Gorsky, G., Jeffrey, R., Teyssié, J.-L., and Gattuso, J.-P. (2009) Key Arctic pelagic mollusc (*Limacina helicina*) threatened by ocean acidification, *Biogeosciences Discuss.*, 6, 2523–2537.

293 Bijma, J., Honisch, B., Zeebe, R. E. (2002). The impact of the ocean carbonate chemistry on living foraminiferal shell weight: Comment on "Carbonate ion concentration in glacial-age deep waters of the Caribbean Sea" by W. S. Broecker and E. Clark. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 3: 1064.

294 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>



## Coccolithophores

Les coccolithophores sont une composante dominante ou répandue de la communauté du phytoplancton dans la zone euphotique illuminée, répartis en fonction des zones de haute saturation en calcite. Les coccolithophores sécrètent des tests ou plaques de calcite et peuvent former des floraisons énormes recouvrant des centaines de milliers de kilomètres carrés, influençant le cycle de carbone et l'alcalinité de l'eau de mer<sup>295</sup>. Ces floraisons peuvent produire jusqu'à un million de tonnes de calcite et sont visibles depuis les satellites dans les régions tempérées et subpolaires. Des expériences de culture sur l'impact de l'augmentation du CO<sub>2</sub> sur la calcification des coccolithophores ont donné lieu à des résultats très controversés<sup>296</sup>. Une diminution des taux de calcification de 40% a pu être observée chez le coccolithophore *Emiliana huxleyi* liée à une augmentation de la pCO<sub>2</sub><sup>297</sup>, allant jusqu'à 66% lorsque la pCO<sub>2</sub> était de 800ppm<sup>15</sup>. Il faut cependant remarquer que la plupart des études se sont penchées uniquement sur cette espèce de coccolithophore, et que des résultats variables ont été obtenus avec *Coccolithus pelagicus*, qui ne manifestait pas de changement significatif du taux de calcification par rapport à une augmentation de CO<sub>2</sub><sup>298</sup>.

L'évidence expérimentale indique qu'il existe de grandes variations dans les besoins en CO<sub>2</sub>, la sensibilité et le métabolisme des divers groupes taxonomiques de phytoplancton, et souligne le fait que certains groupes, tels les coccolithophoridés calcifiants, pourraient bénéficier plus que d'autres de l'augmentation actuelle du CO<sub>2</sub> atmosphérique, par rapport aux diatomes non-calcifiants<sup>299</sup>. Par exemple, *Emiliana huxleyi* fait généralement preuve d'un taux de photosynthèse plus élevé en réponse à une hausse de CO<sub>2</sub>, aussi bien en laboratoire qu'à l'état naturel. On présume pourtant qu'une diminution de la calcification liée à une augmentation de l'acidification placerait les coccolithophores à un désavantage écologique dans les océans futurs<sup>300</sup>.

Il existe d'importants gradients verticaux de variables environnementales dans les 1000m supérieurs, et la plupart des zooplanctons font une migration verticale quotidienne entre les eaux proches de la surface et une profondeur de 200–700m. Ces migrations exposent le zooplancton à des variations de pCO<sub>2</sub> importantes, avec des valeurs supérieures à celles anticipées pour la moyenne des eaux de surface liées à l'acidification d'origine anthropique durant les cent prochaines années. Les espèces faisant des migrations verticales, tout comme celles qui vivent dans les zones intertidales ou près des cheminées hydrothermales, sont donc périodiquement soumises à des conditions simultanées d'hypoxie et de pCO<sub>2</sub> élevée, exigeant une adaptation spécifique pour pouvoir les tolérer. Ces espèces sont peut-être plus tolérantes d'une pCO<sub>2</sub> élevée, du moins à court-terme, que les espèces des zones bien oxygénées. Il n'y a pourtant aucune évidence qu'une adaptation à cette variabilité permette de tolérer une acidification des océans chronique comme celle que l'on prévoit durant le prochain siècle<sup>301</sup>.

## Poissons de mer et mammifères marins

En dehors de l'utilisation du CaCO<sub>3</sub> pour renforcer la structure du squelette, l'utilisation de minéraux de calcium pour les organes détectant la gravité est très répandue dans la faune marine, jouant par exemple un rôle actif dans la programmation neuromotrice permettant les mouvements de recherche de proies lors du comportement de chasse<sup>302</sup>. Chez les calmars et les poissons par exemple, ces organes sont faits d'aragonite.

295 Rost, B., Zondervan, I., Wolf-Gladrow, D. (200\*) Sensitivity of phytoplankton to future changes in ocean carbonate chemistry: current knowledge, contradictions and research directions. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol. 373:227–237.

296 CIESM, 2008. Impacts of acidification on biological, chemical and physical systems in the Mediterranean and Black Seas. N° 36 in *CIESM Workshop Monographs* [F. Briand Ed.], 124 pages, Monaco

297 Wolf-Gladrow, D. A., Riebesell, U., Burkhardt, S., Bjima, J. (1999). Direct effects of CO<sub>2</sub> concentration on growth and isotopic composition of marine plankton. *Tellus* 51B:461–476.

298 Langer, M. R., et al. (2006). Species-specific responses of calcifying organisms to changing seawater carbonate chemistry. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 7:np.

299 Riebesell, U. (2004). Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on Marine Phytoplankton. *Journal of Oceanography*, Vol 60:719–729.

300 Rost, B., Zondervan, I., Wolf-Gladrow, D. (200\*) Sensitivity of phytoplankton to future changes in ocean carbonate chemistry: current knowledge, contradictions and research directions. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol. 373:227–237.

301 Fabry, V. J., Seibel, B. A., Feely, R. A., Orr, J. C. (2008). Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science* 65:414–432

302 Ibid.

Lorsque le taux de pCO<sub>2</sub> de l'eau de mer augmente, le CO<sub>2</sub> dissous se diffuse plus facilement à travers la surface des animaux et les espaces des cellules, entraînant un abaissement des niveaux de pH. L'acidification des tissus de l'organisme (acidose), qui peut se produire en quelques heures chez les poissons et les invertébrés, réduit la capacité oxygène-portante du sang, et peut apparemment réduire l'énergie cellulaire et déprimer l'activité respiratoire<sup>303</sup>. Il y a aussi évidence d'effets à plus long terme, incluant une baisse des taux de synthèse des protéines ayant des effets sur la croissance et la reproduction. Aux stades précoces de leur développement, les jeunes poissons sont plus sensibles aux substances toxiques dans l'environnement que les adultes, entraînant une diminution progressive des populations et des changements dans la structure des écosystèmes<sup>304</sup>.

Un nombre croissant d'observations des poissons de récifs indiquent qu'à la fin de leur stade pélagique les larves se servent des sons du récif et de références olfactives pour déterminer l'habitat de récif le mieux adapté aux adultes. Une étude sur les effets de l'acidification des océans liée au CO<sub>2</sub> sur la capacité des poissons-clowns *Amphiprion percula* au stade de la fixation de détecter les références olfactives (par exemple anémones, parents, feuilles) montra que les larves étaient très attirées par des références olfactives qu'elles auraient normalement évitées si elles avaient été élevées à un pH océanique de 7,8. De surcroît, les larves cessaient de répondre à toute référence olfactive lorsqu'elles étaient élevées à un pH de 7,6. Ces résultats indiquent que la pCO<sub>2</sub> élevée qui pourrait exister dans les océans du monde au début du prochain siècle prochain peut avoir un effet dramatique sur les décisions de comportement des organismes marins durant les stades critiques de leur histoire de vie<sup>305</sup>.

Des augmentations de la pCO<sub>2</sub> ambiante pourrait forcer les poissons à consacrer plus d'énergie à des adaptations physiologiques, en particulier la régulation acide-base et le contrôle cardio-respiratoire. Le coût de l'osmorégulation chez les poissons de mer est estimé à 6–15% de la consommation d'oxygène au repos, et une hausse de pCO<sub>2</sub> exigerait une dépense d'énergie supplémentaire à ce niveau de référence. Il n'existe pas vraiment d'observations montrant que les poissons pourraient faire preuve d'adaptation respiratoire lors d'une exposition prolongée à un environnement à pCO<sub>2</sub> élevée<sup>306</sup>.

La plupart des études indiquent un ralentissement de la calcification des structures lorsque la pCO<sub>2</sub> est augmentée<sup>307</sup>. Lors d'une expérience récente, des œufs et des prélarves du bar blanc (*Atractoscion nobilis*) ont été élevés dans de l'eau de mer à pCO<sub>2</sub> élevée afin de déterminer son impact sur les structures osseuses à base d'aragonite associée à des protéines dont les poissons se servent pour l'orientation et l'accélération (otolithes). Contrairement à toute attente, les otolithes des poissons élevés dans une eau de mer à pCO<sub>2</sub> élevée (993 and 2558 µatm of CO<sub>2</sub>), et par conséquent un pH et un état de saturation en aragonite plus bas, étaient significativement plus grands que ceux des poissons élevés sous des conditions simulant les conditions actuelles (380 µatm of CO<sub>2</sub>). Ces résultats reflètent la capacité des jeunes poissons de contrôler la concentration d'ions (H<sup>+</sup> et Ca<sup>2+</sup>), mais pas la molécule neutre de CO<sub>2</sub>, dans l'endolymphe baignant l'otolithe. On ne sait pas si ces résultats sont aussi valables pour les autres taxa possédant des organes de sens à base d'aragonite, comme les calmars et les mysides (statolithes) ou d'autres espèces de poisson. On ne sait pas non plus si des otolithes plus grands peuvent avoir un effet néfaste, quoique l'on sache qu'une asymétrie des otolithes peut être nuisible<sup>308</sup>.

Des études de laboratoire pour évaluer la tolérance à court terme du crabe des neiges *Chionoecetes tanneri* à une augmentation de pCO<sub>2</sub> indiquent que cette espèce ne parvient pas à réguler le pH extracellulaire lors d'une exposition à court terme (24 heures) au CO<sub>2</sub>. Par contre, *Cancer magister*, un crabe vivant dans des eaux peu profondes, réussit à ré-équilibrer le pH de son hémolymphe (analogue du sang chez les arthropodes) au cours d'une exposition de 24 heures

303 Ibid.

304 Ishimatsu, A., Kikkawa, T., Hayashi, M., Lee, K. S. (2004) Effects of CO<sub>2</sub> on Marine Fish: Larvae and Adults. *Journal of Oceanography* 60:731–741.

305 Munday, P.L., S.L. Dixon, J.M. Donelson, G.P. Jones, M.S. Pratchett, G.V. Devitsina, and K.B. Doving 2009. Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 106 (6) 1848–1852.

306 Ishimatsu, A., Hayashi, M., Kikkawa, T. (2008) Fishes in high CO<sub>2</sub> acidified oceans. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol 373:295–302.

307 Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., Kleypas, J. A. (2009). Ocean Acidification: The Other CO<sub>2</sub> problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1:169–192.

308 Checkley Jr., D. M., Dickson, A. G., Takahashi, M., Radich, J. A., Eisenkolb, N., Asch, R. (2009). Elevated CO<sub>2</sub> enhances otolith growth in young fish. *Science* 324: 1683.

à une  $p\text{CO}_2$  élevée (hypercapnie), par une accumulation nette de bicarbonate provenant du milieu ambiant. Ces résultats soutiennent l'hypothèse que l'hypercapnie aura un effet physiologique important sur les organismes d'eaux profondes aux taux métaboliques réduits et sans capacité de régulation acide-base à court terme leur permettant de maîtriser le stress d'une hypercapnie aiguë<sup>309</sup>.

Plusieurs espèces de mammifères marins menacés ou d'ordre supérieur, comme le dugong et le lamantin, dépendent des herbiers marins pour une grande partie de leur nourriture. L'écosystème des herbiers est peut-être l'un des seuls à bénéficier d'une augmentation de  $p\text{CO}_2$  de l'eau de mer<sup>310</sup>. Ors d'expériences menées sur l'herbe de mer *Zostera marina*, on a observé une plus grande biomasse et une augmentation du taux de reproduction à des taux de  $\text{CO}_2$  élevés, indiquant la possibilité d'une plus grande productivité de ces habitats d'herbiers critiques<sup>311</sup>.

## E. CONSÉQUENCES ÉCOLOGIQUES

On s'attend à ce que l'acidification des océans ait des impacts négatifs majeurs sur les coraux et autres organismes marins constructeurs de squelettes et de coquilles à base de  $\text{CaCO}_3$ , et dont le succès dépend largement de la chimie du carbonate. De nombreuses espèces calcifiantes se trouvent à la base ou au milieu de réseaux trophiques océaniques mondiaux, et par conséquent la perte d'organismes à coquille liée à l'acidification des océans aura pour effet de transformer la relation prédateur-proie, avec des répercussions dans tout l'écosystème<sup>312</sup>. En plus de la perturbation probable d'importantes composantes du réseau trophique marin, une perte ou une modification de la biodiversité pourrait avoir des conséquences biologiques graves<sup>313</sup>.

La remontée de l'horizon de saturation de l'aragonite et de la calcite a des retombées sur tous les organismes calcifiants du globe, qui forment une part importante des écosystèmes pélagiques et benthiques. Les inquiétudes sont particulièrement fortes à l'égard des régions polaires, où les états de saturation sont naturellement bas. La diminution et la cessation possible de la calcification par les organismes océaniques au niveau régional auraient un effet majeur sur la régulation des écosystèmes et sur le flux de matériel organique vers le plancher océanique, par la perte du ballast minéral de  $\text{CaCO}_3$  et une efficacité moindre de la pompe biologique dans le transfert du carbone vers l'intérieur de l'océan<sup>314, 315</sup>.

Le stock global actuel de carbone inorganique particulaire (CIP) dépend de la production et de la dissolution du carbonate de calcium, toutes deux affectées par l'acidification des océans. Toute une série d'organismes marins contribuent au CIP, ce qui rend la combinaison des effets du changement de climat et de l'acidification des océans difficile à prédire<sup>316</sup>. Les expériences menées à ce jour n'ont pas été suffisamment longues pour permettre de discerner une adaptation ou une évolution des espèces existantes. Toutefois, toute réduction de la biomasse totale due à une diminution du taux de photosynthèse ou bien à une plus grande demande énergétique pour l'obtention de nutriments essentiels aura des impacts importants sur les réseaux trophiques marins au niveau mondial. Le réseau trophique des régions polaires, comme la mer de Beaufort, est un exemple de la complexité des interconnexions menacées par l'acidification des océans (Figure 15).

309 Pane, E. F., Barry, J. P. (2007). Extracellular acid-base regulation during short term hypercapnia is effective in a shallow-water crab, but ineffective in a deep sea crab. *Mar Ecol Prog Ser*, 334:1–9.

310 Guinotte, J. M., Fabry, V. J. (2008). Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1134: 320.

311 Palacios, S., Zimmerman, R. C. (2007). Response of eelgrass *Zostera marina* to  $\text{CO}_2$  enrichment: possible impacts of climate change and potential for remediation of coastal habitats. *Mar Ecol Prog Ser*, 344:1–13.

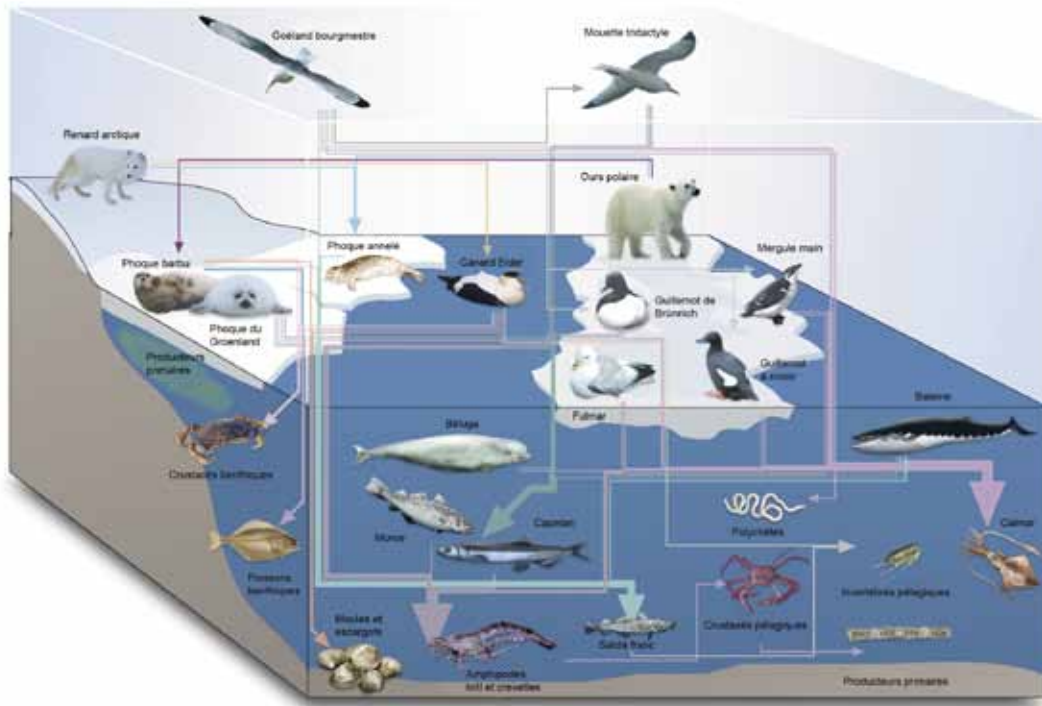
312 Cooley, S. R., Doney, S. C. (2009). Ocean Acidification's impact on Fisheries and Societies: A U.S. Perspective. *Journal of Marine Education*, 25(1):15–19.

313 OSPAR Commission (2006). Effects of the marine environment of ocean acidification resulting from elevated levels of  $\text{CO}_2$  in the atmosphere.

314 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

315 Wolf-Gladrow, D. A., Riebesell, U., Burkhardt, S., Bjima, J. (1999). Direct effects of  $\text{CO}_2$  concentration on growth and isotopic composition of marine plankton. *Tellus* 51B:461–476.

316 Balch, W. M., Fabry, V. J. (2008) Ocean acidification: documenting its impact on calcifying phytoplankton at basin scales. *Mar Ecol Prog Ser* 373: 239–247.



**FIGURE 15:** Liens trophiques dans la mer de Beaufort. Source: *Arctic Climate Impacts Assessment (ACIA) Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, 2007.*

La profondeur n'offre pas de protection contre l'acidification des océans. Les importantes communautés de coraux d'eaux froides seront d'ailleurs probablement les premières victimes d'une augmentation de l'acidité océanique. Tandis que les récifs coralliens des tropiques se rétracteront vers l'équateur, les communautés coralliennes d'eaux froides perdront de leur dimension verticale; ce sont en effet les communautés au plus profond de chaque océan qui seront les premières à passer de conditions saturées à des conditions non-saturées<sup>317</sup>. La baisse du niveau de saturation du carbonate prévue aura un impact important sur les coraux d'eaux froides et le maintien de services comme la protection et l'alimentation de certaines d'espèces qui y sont associées, y compris les poissons de pêche commerciale et les crustacés. De nombreuses espèces exploitées commercialement dépendent d'une migration entre eaux profondes et peu profondes à différents stades de leur cycle de vie. D'autre part les organismes d'eaux profondes sont responsables de la presque totalité de la régénération des nutriments dans l'océan — la production primaire de la zone photique de l'océan s'effondrerait en l'absence de ces processus<sup>318</sup>.

Les macroalgues calcifiées (par exemple *Udotea*, *Amphiroa*, *Halimeda*) se retrouvent dans tous les habitats marins, des pôles aux tropiques et des zones intertidales jusqu'aux plus profond de la zone euphotique. Ces algues ont une fonction écologique essentielle, étant l'élément clé pour une série de processus de recrutement des invertébrés, équipant l'écosystème de structures d'habitat tridimensionnelles, et conférant, en partie, aux écosystèmes des récifs coralliens leur force structurelle<sup>319</sup>. Les macroalgues calcifiées contribuent de façon importante à la déposition des carbonates dans les environnements côtiers. Les macroalgues calcifiantes produisent du  $\text{CaCO}_3$  biogénique sous

317 Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., Kleypas, J. A. (2009). Ocean Acidification: The Other  $\text{CO}_2$  problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1:169–192.

318 UNEP. (2007). Deep-Sea Biodiversity and Ecosystems: A scoping report on their socio-economy, management and governance.

319 Nelson, W. A., 2009. Calcified macroalgae – critical to coastal ecosystems and vulnerable to change: a review. *Marine and Freshwater Research* 60(8): 787–801

trois formes: calcite magnésienne, aragonite et calcite, toutes sensibles aux effets négatifs d'une diminution de l'état de saturation du carbonate. La disparition de ce groupe entraînerait la perte d'habitats importants pour les poissons adultes et les invertébrés<sup>320</sup>.

Les ptéropodes calcifiants sont la nourriture principale du zooplancton carnivore et des poissons. Un abaissement de la densité des ptéropodes, prévu dans un avenir proche dans les régions de haute latitude, aura un impact sur les relations prédateur-proie d'un grand nombre d'espèces (par exemple la morue, la goberge, l'églefin, le maquereau) et pourrait augmenter la pression de prédation sur les jeunes poissons comme le saumon<sup>321</sup>. Par contre les espèces comme les gymnosomes (ptéropodes sans coquille), qui se nourrissent exclusivement de ptéropodes à coquille, modifieraient sans doute leur distribution géographique de concert avec leur proie, en admettant qu'ils puissent tous deux surmonter leurs limites de tolérance thermique<sup>322</sup>.

Il n'existe que peu de mécanismes permettant de contrecarrer l'acidification des tissus de l'organisme, et ceux-ci sont normalement identiques pour tous les phyla. Les espèces adaptées à des environnements ayant des gradients de CO<sub>2</sub> élevés, comme les cheminées hydrothermales, et les espèces pouvant produire métaboliquement du CO<sub>2</sub> ont développé de meilleures capacités de tamponnage dans l'échange d'ions et le transport du CO<sub>2</sub><sup>323</sup>. Toutefois on ne sait pas encore si ces capacités se manifestent par une plus grande tolérance à une acidification des océans chronique. La disparition de prédateurs clés ou d'espèces broûteuses des écosystèmes pourrait entraîner des changements de phase dans l'environnement (par exemple le passage de récifs dominés par les coraux à des récifs dominés par les algues), ou favoriser la prolifération d'organismes non-comestibles: une relation négative entre l'abondance de méduses et le pH océanique a été notée dans la mer du Nord centre-ouest, permettant aux méduses de profiter de niches libres du fait des effets néfastes de l'acidification sur le plancton calcifiant, mais il manque de preuves<sup>324</sup>. Dans certains systèmes, les méduses sont en compétition avec les poissons et en sont également les prédateurs; elles peuvent remplacer les poissons et dominer le niveau trophique supérieur, préjudicant de la sorte le recrutement des poissons de commerce<sup>325</sup>.

Les observations faites à un site acidifié naturellement confirment que la diversité des communautés biologiques est réduite sous des conditions d'eau de mer acidifiée. Aux alentours des cheminées de CO<sub>2</sub> d'Ischia, les herbiers et les algues, y compris les espèces envahissantes, dominent la communauté marine, tandis que les espèces ayant besoin de CaCO<sub>3</sub> pour construire leurs coquilles sont totalement absentes. Ces observations donnent un aperçu des impacts probables au niveau de l'écosystème liés à l'acidification des océans<sup>326</sup>.

Les espèces non-calcifiantes sont aussi impliquées, par le contrôle du réseau trophique et par les processus métaboliques liés au pH. Les réponses observées chez deux cyanobactéries marines photosynthétiques clés soumises à des conditions plus chaudes et plus riches en CO<sub>2</sub> ont montré une réponse physiologique variable, avec très peu d'effets sur *Prochlorococcus*, mais avec des taux de photosynthèse très élevés chez *Synechococcus*<sup>327</sup>. Les cyanobactéries fixant l'azote *Trichodesmium*, qui pourvoient une bonne part de la productivité primaire dans les zones océaniques pauvres en nutriments, ont des taux de fixation du carbone et de l'azote élevés à des pCO<sub>2</sub> élevées<sup>328</sup>. Ces résultats suggèrent qu'avant la fin du siècle, un CO<sub>2</sub> élevé pourrait augmenter considérablement la fixation globale

320 Beck, M. W. *et al.* (2003). The role of nearshore ecosystems as fish and shellfish nurseries. *Issues Ecol.*, 11:1–12.

321 Fabry, V. J., Seibel, B. A., Feely, R. A., Orr, J. C. (2008). Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. *ICES Journal of Marine Science*, 65:414–432.

322 Ibid.

323 Ibid.

324 Richardson, A. J., Gibbons, M. J. (2008). Are jellyfish increasing in response to ocean acidification? *Limnol Oceanogr.* 53(5):2040–2045.

325 Purcell, J. E., Uye, S., Lo, W.-T. (2007). Anthropogenic causes of jellyfish blooms and their direct consequences for humans. *A Review. Mar Ecol Prog Ser*, 350:153–174.

326 Hall-Spencer, J. M., Rauer, E. (2009) Assessing the ecological impacts of ocean acidification - from field observations to in situ experimentation. *Journal of Marine Education*, 25 (1): 11–12.

327 Fu, F. X., Warner, M. E., Zhang, Y., Feng, Y., Hutchins, D. A. (2007). Effects of increased temperature and CO<sub>2</sub> on photosynthesis, growth and elemental ratios of marine *Synechococcus* and *Prochlorococcus* (cyanobacteria). *J. Phycol.* 43:485–496.

328 Hutchins, D. A., Fu, F.-X., Zhang, Y., Warner, M. E., Feng, Y., *et al.* (2007). CO<sub>2</sub> control of *Trichodesmium* N<sub>2</sub> fixation, photosynthesis, growth rates and elemental ratios: implications for past, present and future ocean biogeochemistry. *Limnol. Oceanogr.* 52(4):1293–1304.

de N<sub>2</sub> et de CO<sub>2</sub> par *Trichodesmium*, modifiant de façon fondamentale les cycles actuels de l'azote et du carbone, et pouvant pousser certains régimes océaniques vers une limitation de phosphate. On sait aussi que les algues molles (*Halosaccion glandi-forme*), les algues éphémères, les algues rouges filamenteuses et les algues rouges feuillues peuvent augmenter en abondance lorsque le pH baisse<sup>329</sup>, ce qui implique que l'on peut s'attendre à des changements importants dans la composition des communautés dans les océans acidifiés futurs, avec des effets sur le reste de la chaîne trophique marine.

Pour pouvoir prédire les conséquences de l'acidification des océans sur la biodiversité marine et les écosystèmes avec exactitude, il faut traiter des effets écologiques en relation avec les autres effets des changements climatiques mondiaux sur l'environnement et avec l'interaction entre des feedbacks biologiques et chimiques complexes<sup>330</sup>. La température des eaux de surface augmente déjà et continuera à le faire, selon les prédictions, et les changements de pluviosité et de ruissellement auront un impact sur la salinité et l'apport de nutriments dans les mers côtières. La combinaison des effets dus à des hausses de température, de salinité et du flux de nutriments pourraient aggraver le risque d'hypoxie ou d'anoxie dans les mers peu profondes<sup>331</sup>. Les effets du réchauffement, de l'accumulation de CO<sub>2</sub> dans les couches de surface et d'une diminution du taux d'oxygène agissent de concert sur la faune marine, diminuant la capacité aérobique des organismes et entraînant une tolérance thermique plus limitée, qui amènera à une distribution biogéographique des organismes par rapport au gradient climatique plus restreinte<sup>332</sup>. Les effets néfastes liés à l'interaction entre les extrêmes de température et le CO<sub>2</sub> sont particulièrement marqués sur les récifs coralliens. Même si la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère se stabilise à 550ppm, ces habitats d'une importance écologique et économique majeures seront déjà marginalisés.

D'importants systèmes de feedback seront sans doute aussi affectés. Les floraisons de coccolithophores ont un effet d'albédo, reflétant des quantités importantes de lumière solaire vers l'espace qui sont alors retranchées du réchauffement global. La disparition de ces floraisons pourrait abaisser l'effet de l'albédo global de 0,13%<sup>333</sup>. De plus, les coccolithophores sont les principaux producteurs de diméthylsulfide (DMS), qui s'oxyde en SO<sub>4</sub> lors de son émission dans l'atmosphère, ce produit étant une composante importante des aérosols semblant influencer la longévité et les propriétés optiques des nuages. Le DMS est supersaturé dans les eaux de surface, et il a été suggéré que les émissions de DMS du phytoplancton marin vers l'atmosphère pourraient diminuer le flux radiatif vers la surface de la terre<sup>334</sup>. La logistique complexe requise pour le suivi du cycle de DMS en a empêché la caractérisation<sup>335</sup>; il est cependant clair que des changements dans la composition de la communauté du phytoplancton auraient un effet sur l'ampleur de ce feedback sur le climat mondial<sup>336</sup>. Une expérience d'incubation à bord fut menée afin de déterminer les effets d'une hausse de température et de pCO<sub>2</sub> sur la structure de la communauté algale de la floraison printanière de l'Atlantique Nord, l'une des plus grandes floraisons océaniques annuelles de phytoplancton, et de leur impact ultérieur sur les concentrations de DMSP particulaire (DMSPp) et dissous (DMSPd). À une pCO<sub>2</sub> élevée (690 ppm) et une température élevée (température ambiante + 4°C), le nombre de coccolithophoridés et de pélagophytes était significativement plus élevé que sous les conditions de contrôle (390 ppm CO<sub>2</sub> et température ambiante). Ce changement de structure de la communauté du phytoplancton entraîna aussi une augmentation de la concentration de DMSPp<sup>337</sup>.

329 Wootton, T. J., Pfister, C. A., Forester, D. (2008). Dynamic patterns and ecological impacts of declining ocean pH in a high-resolution multi-year dataset. PNAS, Vol. 105(48): 18848–18853.

330 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

331 OSPAR Commission (2006). Effects of the marine environment of ocean acidification resulting from elevated levels of CO<sub>2</sub> in the atmosphere.

332 Kite-Powell, H. L. (2009). A Global Perspective on the Economics of Ocean Acidification. The Journal of Marine Education, Vol 25 (1):25 – 29.

333 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

334 Levasseur, M., Scarratt, M. G., Michaud, S., et al. (2006). DMSP and DMS dynamics during a mesoscale iron fertilization experiment in the Northeast Pacific – Part 1: Temporal and vertical distributions. Deep-Sea Research II 53, 2353–2369.

335 Fuhrman, J. A. (1991). Possible biogeochemical consequences of ocean fertilization. Limnol. Oceanogr., 36(8), 1951–1959.

336 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

337 Lee, P. A., Rudisill, J. R., Neeley, A. R., Maucher, J. M., Hutchins, D. A., Feng, Y., Hare, C. E., Leblanc, K., Rose, J. M., Wilhelm, S. W., Rowe, J. M., DiTullio, G. R., 2009. Effects of increased pCO<sub>2</sub> and temperature on the North Atlantic spring bloom. III. Dimethylsulfoniopropionate. *Marine Ecology Progress Series*, 388: 41–49

## F. IMPACTS SUR LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES ET LES MOYENS DE SUBSISTANCE

Les océans fournissent de nombreux services écosystémiques dont bénéficie l'humanité. Ces services, par exemple la pêche, contribuent d'une manière importante à l'emploi mondial et à l'activité économique. Les autres services fournis par les océans, comme la provision d'un site pour la décharge de déchets et de polluants, sont bien moins identifiés par les mesures économiques habituelles. Des tentatives de quantification de quelques uns de ces services les ont évalués à plusieurs milliards de dollars<sup>338</sup>. Par rapport à la biosphère terrestre, les écosystèmes marins ont évolué dans un environnement relativement homogène sous des conditions stables et à l'échelle de temps de l'évolution. Il est donc possible que même des changements subtils dans les conditions de l'environnement puissent avoir des effets profonds sur le fonctionnement des écosystèmes, avec des conséquences encore imprévisibles sur la pérennité des services clés. D'autre part, les écosystèmes marins risquent de devenir moins robustes à cause des changements prévus dans la chimie océanique, et plus vulnérables à d'autres impacts environnementaux tels que la pêche à grande échelle et la hausse de la température de la surface de la mer.

Les récifs coralliens tropicaux procurent des services écosystémiques vitaux pour les populations et les industries, comme les matériaux de construction et le tourisme lié aux récifs (valeur directe); habitats et nourriceries servant aux pêches commerciales et à la pêche de loisir, et protection côtière (valeur indirecte); bien-être associé à l'existence d'une diversité d'écosystèmes naturels (valeur de préservation)<sup>339</sup>. Les récifs coralliens produisent 10–12% du poisson pêché dans les tropiques et 20–25% du poisson pêché par les pays en voie de développement<sup>340</sup>. De nombreux pays en voie de développement dépendent du tourisme comme source principale de revenu et seront en position précaire si les récifs coralliens se dégradent. Par exemple, le tourisme lié aux récifs est une source importante de devises étrangères dans le bassin des Caraïbes, avec un revenu de plusieurs milliards de US\$ venant de touristes appréciant de plus en plus la qualité de leur environnement naturel<sup>341</sup>.

Les prévisions annoncent que les récifs situés dans des eaux acidifiées vont se dégrader suivant cette séquence: (a) perte des algues corallines, entraînant une consolidation plus faible des récifs; (b) cessation de la production de carbonate par les coraux entraînant une perte d'habitat; (c) perte de biodiversité et disparition d'espèces. L'incapacité des communautés coralliennes d'entrer en compétition avec les communautés algaires ne subissant pas les effets de l'acidification des océans entraînera un changement de phase écologique vers un nouvel état stable de l'écosystème, dominé par des espèces de moindre valeur économique<sup>342</sup>. On estime que le dégât économique annuel dû à la dégradation des récifs coralliens liée à l'acidification des océans augmentera rapidement avec le temps, compte tenu de la croissance économique, atteignant 870 milliards US\$ d'ici 2100, d'après le scénario d'émissions globales A1 SRES<sup>343</sup>.

L'impact d'ensemble sur les services écosystémiques sera dû à la synergie des effets de plusieurs pressions agissant de concert, par exemple l'exploitation de l'océan et la pollution<sup>344</sup>. On s'attend à ce que les effets conjoints de la diminution des taux d'accrétion des récifs, de l'augmentation des taux de bioérosion, de la remontée du niveau de la mer et de l'intensité croissante des tempêtes liés aux changements climatiques futurs compromettent la fonction de

338 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

339 Moberg, Fredrik and Folke, Carl (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics* 29, 215–233.

340 Garcia, S. M., Moreno, D. (2001). Global overview of marine fisheries. Report of the conference on Responsible Fisheries in the Marine Ecosystem. (<ftp://ftp.fao.org/fi/DOCUMENT/reykjavik/Default.htm>), Reykjavik, Iceland, 1–4 October 2001.

341 Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., and Hatziolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737–1742.

342 Veron, J. E. N. 2009. The future of the Great Barrier Reef: highlighting the global threat to coral reefs. Briefing notes for the Royal Society Workshop July 6 2009.

343 Brander, L. M., Rehdanz, K., Tol, R. S. J., and van Beukering, P. J. H. (2009). The Economic Impact of Ocean Acidification on Coral Reefs. *Working Paper No. 282*. ESRI: Dublin, Ireland.

344 Jackson, J. B. C. (2008). Ecological extinction and evolution in the brave new ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105, 11458–11465.

protection côtière des récifs coralliens. Les populations, les infrastructures et les écosystèmes des lagons et des estuaires, comprenant les mangroves, les herbiers et les marais salants, deviendront tous plus vulnérables à une intensification de l'impact des vagues et des tempêtes<sup>345</sup>. Ces changements pourraient modifier de façon fondamentale la nature du littoral et les ressources disponibles aux populations qui dépendent d'elles. Une meilleure connaissance des impacts spécifiques liés à l'acidification des océans est urgemment requise en vue de l'importance des services écosystémiques de l'océan, afin d'améliorer la planification et les réponses aux défis qui nous font face en toute connaissance de cause<sup>346</sup>.

L'acidification des océans aura pour effet de ralentir ou de résorber la croissance de la coquille et du squelette des plantes et des animaux marins, ce qui à son tour entraînera une diminution des revenus de la pêche, avec des impacts majeurs sur les populations qui en dépendent pour leur revenu et leur moyen de subsistance<sup>347</sup>. Les conséquences économiques dépendront d'une adaptation harmonisée des écosystèmes marins et de la gestion des ressources. En 2006, les mollusques et les crustacés représentaient 50% des prises commerciales nationales des États-Unis, évaluées à 4 milliards US\$. La transformation, la vente en gros et au détail s'élevaient à 69.5 milliards US\$, contribuant 35 milliards US\$ de valeur ajoutée au produit national brut et créant environ 70 000 emplois<sup>348</sup>. Un déclin des prises commerciales de fruits de mer et de crustacés lié à l'acidification des océans d'ici à 2060 pourrait faire baisser les revenus primaires commerciaux des États-Unis de 860 millions US\$ et les réduire à 14 milliards US\$, selon les taux d'émissions de CO<sub>2</sub>, les taux d'actualisation, les réponses biologiques et les structures de pêche. Cette estimation n'inclut pas les pertes dues à la dégradation des récifs coralliens ni à un éventuel effondrement de la pêche si l'acidification des océans pousse les écosystèmes au-delà de certains seuils écologiques<sup>349</sup>.

Les changements économiques liés à la perte de pêche au niveau local pourrait changer les activités économiques dominantes ainsi que la démographie, et accroître la proportion de la population vivant sous le seuil de la pauvreté dans des communautés déjà dépendantes n'ayant que peu de résilience économique ou peu d'autres choix<sup>350</sup>. Par exemple, les industries liées au littoral et à la mer comprennent 25% du produit national brut de l'Indonésie et emploient presque 15% de la main-d'œuvre du pays<sup>351</sup>.

La valeur totale de la production mondiale de pêche représente actuellement environ 150 milliards US\$ par an. Environ 50% du poisson comestible provient de l'aquaculture, qui dépend largement des organismes sécrétant du carbonate comme les mollusques et les crustacés pour leurs stocks de géniteurs dans les éclosiers<sup>352</sup>. La plupart des installations d'aquaculture sont situées dans les régions côtières, qui seront certainement touchées par l'acidification des océans<sup>353</sup>. Une diminution de la calcification et du succès de la reproduction chez les organismes calcifiants signifiera une perte grave d'opportunités économiques et de moyens de subsistance dans les secteurs de l'aquaculture et de la pêche commerciale, et toucheront sans doute les pays en voie de développement dépendant plus de l'aquaculture comme source de protéines et de revenu. Quoique difficiles à estimer, les premières évaluations des impacts directs de l'acidification des océans sur la production des pêches marines sont de l'ordre de 10 milliards US\$ par an<sup>354</sup>.

345 Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., and Hatziolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737–1742.

346 IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, NY, USA

347 Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L., Robbins, L. L. (2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18–20 April 2005, St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S Geological Survey, 88 pp.

348 Cooley, S. R., Doney, S. C. (2009). Ocean Acidification's impact on Fisheries and Societies: A U.S Perspective. *Journal of Marine Education*, 25(1):15–19.

349 Cooley, S. R., Doney, S. C. (2009). Economic vulnerability assessment of U.S. fishery revenues to ocean acidification. Submitted to Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0709640104](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0709640104).

350 Cooley, S. R., Doney, S. C. (2009). Ocean Acidification's impact on Fisheries and Societies: A U.S Perspective. *Journal of Marine Education*, 25(1):15–19.

351 Kite-Powell, H. L. (2009). A Global Perspective on the Economics of Ocean Acidification. *Journal of Marine Education*, Vol 25 (1):25 – 29.

352 Ibid.

353 Cooley, S. R., Doney, S. C. (2009). Ocean Acidification's impact on Fisheries and Societies: A U.S Perspective. *Journal of Marine Education*, 25(1):15–19.

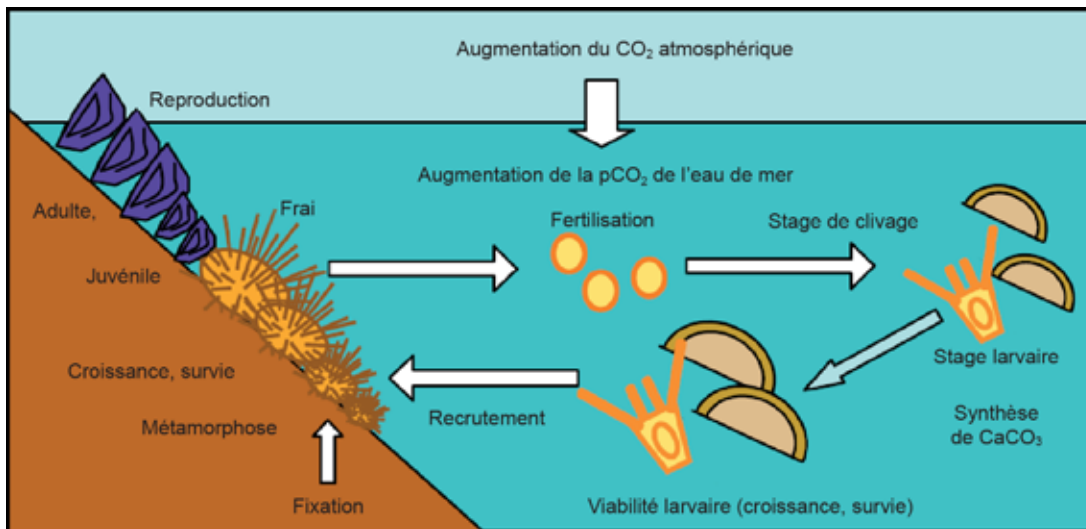
354 Kite-Powell, H. L. (2009). A Global Perspective on the Economics of Ocean Acidification. *Journal of Marine Education*, Vol 25 (1):25 – 29.



## IV. INCERTITUDES ET AUTRES CONSIDÉRATIONS

### *Comment la calcification est-elle affectée chez les organismes à différents stades de leur cycle de vie?*

Les organismes marins se servent des ions dans l'eau de mer pour former toute une variété de coquilles, d'exosquelettes et de structures internes à base de minéraux de carbonate. Les structures peuvent contenir plusieurs minéraux, des couches non-minérales, ou bien les deux, et les minéraux utilisés peuvent varier selon le stade de développement de l'organisme. Les différents stades du cycle de vie des organismes calcifiants benthiques ont des morphologies et des modes de calcification qui diffèrent, ce qui peut avoir une influence sur la réponse de l'organisme aux changements de concentration de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{pH}^{355}$ . Les stades larvaires et juvéniles sont peut-être particulièrement sensibles, du fait qu'ils forment leurs squelettes à partir de calcite amorphe, plus soluble que les autres formes de carbonate<sup>356</sup>. Un pH bas peut réduire l'assimilation de  $\text{CaCO}_3$  par le squelette, en même temps que diminuer la longueur des larves pluteus nageuses du phytoplancton et du corail. Une diminution de la synthèse des protéines a été observée chez l'oursin *Hemicentrotus pulcherrimus*, après sa fertilisation, entraînant une baisse du taux de croissance et du taux de clivage<sup>357</sup>. Tout retard du développement augmente le taux de mortalité embryonnaire liée à la prédation durant la phase planctonique. Une étude de la morphologie des larves pluteus élevées à un pH de 6,8 révèle des anomalies extrêmes, y compris des bras manquants, qui sont importants pour la nage et l'alimentation, et donc pour le taux de survie. Les taux de fertilisation et de reproduction, les larves planctoniques, la fixation, la métamorphose, les stades juvéniles et adultes du benthos, sont tous potentiellement touchés de manière différente par l'acidification des océans (Figure 16).



**FIGURE 16:** Effets de l'acidification des océans liée au  $\text{CO}_2$  sur les stades précoces du développement des invertébrés. Source: Kurihara, H. (2008)<sup>358</sup>.

355 Rost, B., Zondervan, I., Wolf-Gladrow, D. (200\*) Sensitivity of phytoplankton to future changes in ocean carbonate chemistry: current knowledge, contradictions and research directions. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol. 373:227–237.

356 Vezina, A. F., Hoegh-Guldberg, O. (2008). Introduction to: Effects of ocean acidification on marine ecosystems. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol 373:199–201.

357 Kurihara, H., Shirayama, Y. (2004). Effects of increased atmospheric  $\text{CO}_2$  on sea urchin early development. *Mar Ecol Prog Ser*. 274:161–169.

358 Kurihara, H. (2008). Effects of  $\text{CO}_2$  driven ocean acidification on the early developmental stages of invertebrates. *Mar Ecol Prog Ser*. 373:275–284.

### ***Pourquoi certains organismes calcifiants semblent-ils moins touchés que d'autres?***

Contrairement aux attentes, certaines études ont découvert une meilleure calcification de la structure chez certaines espèces de coccolithophores, certains invertébrés comme les mollusques céphalopodes juvéniles<sup>359</sup>, et certains poissons juvéniles<sup>360</sup>, liée à des taux élevés de pCO<sub>2</sub>. Ceci fait suite à des suggestions récentes que les réponses biologiques à l'acidification des océans, dans la biote calcifiante en particulier, seront spécifiques aux espèces et par conséquent beaucoup plus variées et complexes qui ne l'avait été reporté auparavant<sup>361</sup>.

Pour atténuer le risque de limitation de carbone, il semble que de nombreuses espèces de phytoplancton marin aient développé des mécanismes physiologiques leur permettant de concentrer activement le CO<sub>2</sub> dans leurs cellules, évitant ainsi tous ou presque tous les effets directs des changements de pH et de CO<sub>2</sub> de l'eau de mer sur leur taux de croissance ou leur composition élémentaire. Des différences de sensibilité au CO<sub>2</sub> spécifiques aux taxons ont été observées en culture de laboratoire, mais on ne sait pas encore si les exigences énergétiques de ce mécanisme de compensation aura un effet sur la diversité des espèces de phytoplancton, ou sur la contribution des divers groupes fonctionnels dans l'environnement naturel<sup>362</sup>. En général, les espèces absorbant le CO<sub>2</sub> par diffusion, ou celles possédant un mécanisme de concentration (*carbone concentration mechanism* ou CCM) inefficace du CO<sub>2</sub>, sont extrêmement sensibles au CO<sub>2</sub> durant la photosynthèse et pourraient profiter d'une augmentation de CO<sub>2</sub> dans les océans futurs. Aux concentrations actuelles de CO<sub>2</sub>, les espèces dont le CCM est très efficace fonctionnent à leurs seuils de saturation. Toutefois, une régulation négative du CCM sous des conditions de CO<sub>2</sub> élevé pourrait permettre à ces espèces de répartir leur énergie et leurs ressources de façon optimale<sup>363</sup>. Il semble que les CCM soient moins répandus chez les organismes benthiques photosynthétiques<sup>364</sup>.

Certaines études ont enregistré des hausses<sup>365</sup> ainsi que des baisses<sup>366</sup> du taux de calcification chez les coccolithophores sous des conditions de CO<sub>2</sub> élevé, même au sein de la même espèce. Ces résultats contradictoires peuvent être attribués aux différences génétiques des souches utilisées, ou à des différences de procédures de laboratoire ou de procédures expérimentales, soulignant de ce fait le besoin de standardiser les méthodes et les protocoles, et d'interpréter les données disponibles de façon précise<sup>367</sup>.

### ***Comment l'adaptation et la survie sont-elles influencées par les différents mécanismes de calcification ou par d'autres facteurs physiologiques?***

L'augmentation rapide de la concentration de CO<sub>2</sub> signifie que les organismes sont exposés à des changements plus rapides que ceux qu'ils ont subis durant leur histoire évolutive récente<sup>368</sup>. On ne connaît pas la capacité des

359 Gutowska M., A., Pörtner H.-O., Melzner F. (2008). Growth and calcification in the cephalopod *Sepia officinalis* under elevated seawater pCO<sub>2</sub>. *Marine Ecology Progress Series* 373:303–309.

360 Checkley Jr., D. M., Dickson, A. G., Takahashi, M., Radich, J. A., Eisenkolb, N., Asch, R. (2009). Elevated CO<sub>2</sub> enhances otolith growth in young fish. *Science* 324: 1683.

361 Miller, A. W., Reynolds, A. C., Sobrino, C., Reidel, G. F. (2009). Shellfish Face Uncertain Future in High CO<sub>2</sub> World: Influence of Acidification on Oyster Larvae Calcification and Growth in Estuaries. *PLOSOne*, 4(5) e5561.

362 OSPAR Commission (2006). Effects of the marine environment of ocean acidification resulting from elevated levels of CO<sub>2</sub> in the atmosphere.

363 Rost, B., Zondervan, I., Wolf-Gladrow, D. (200\*) Sensitivity of phytoplankton to future changes in ocean carbonate chemistry: current knowledge, contradictions and research directions. *Mar Ecol Prog Ser*, Vol. 373:227–237.

364 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

365 Iglesias-Rodríguez, M. D., Halloran, P. R., Rickaby, R. E. M., Hall, I. R., Colmenero-Hidalgo, E., Gittins, J. R., Green, D. R. H., Tyrell, T., Gibbs, S. J., von Dassow, P., Rehm, E., Armbrust, E. V., Boessenkool, K. P. (2008). Phytoplankton Calcification in a High-CO<sub>2</sub> World. *Science*, 320:336–340.

366 Wolf-Gladrow, D. A., Riebesell, U., Burkhardt, S., Bjima, J. (1999). Direct effects of CO<sub>2</sub> concentration on growth and isotopic composition of marine plankton. *Tellus* 51B:461–476.

367 Reibesell, U., Bellerby, R. G. J., Engel, A., Fabry, A., Hutchins, D. A., Reusch, T. B. H., Schulz, K. G., Morel, F. M. M. (2008) Comment on "Phytoplankton Calcification in a High-CO<sub>2</sub> World". *Science*, 322 (5907):1466.

368 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

organismes marins calcifiants de s'adapter à des océans de plus en plus acides, mais elle dépend peut-être du temps de génération de l'espèce; ceci impliquerait qu'une espèce à grande longévité, comme les coraux d'eaux chaudes et froides, aurait une capacité moindre de réponse. Des temps de génération plus courts donneraient peut-être plus d'options d'adaptation au niveau micro-évolutionnaire<sup>369</sup>.

Les mollusques à valeur commerciale, comme les bivalves et les gastéropodes, exercent un contrôle biologique faible sur le processus de la calcification et dépendent de la chimie spécifique de l'eau de mer ambiante, qui favorise la déposition du CaCO<sub>3</sub>. Les oursins et les crustacés, y compris les homards et les crevettes, possèdent une forme de contrôle biologique plus rehaussée, qui leur permet d'accumuler graduellement des réserves intracellulaires d'ions; entre mues, on croit que les crustacés renforcent leurs exosquelettes à base de chitine et de protéines en déposant des minéraux de calcite de façon continue. Même si la chimie et la minéralisation de la coquille des crustacés donnent à penser qu'ils pourront réussir à mieux résister que les mollusques à l'acidification des océans et aux diminutions de l'état de saturation, la réponse des organismes sera sans doute une fonction de leur histoire individuelle et de leur variabilité génétique<sup>370</sup>.

Leurs coquilles à base d'aragonite étant hautement solubles, et leurs populations étant très denses dans les eaux polaires et subpolaires, qui seront vraisemblablement les premières régions océaniques à subir une sous-saturation vis-à-vis de l'aragonite, les ptéropodes sont probablement particulièrement sensibles à l'acidification des océans. En vue de la vitesse du changement, il est fort probable que les ptéropodes ne pourront pas s'adapter suffisamment rapidement pour vivre dans les conditions de sous-saturation qui régneront dans la plupart des océans de surface de haute latitude au cours du 21<sup>e</sup> siècle. Leur étendue de répartition dans la colonne d'eau se verra diminuée, entraînant une perturbation de la migration verticale, de même que leur répartition en latitude, forçant un décalage vers des latitudes plus basses où les eaux de surface maintiendront leur sursaturation en aragonite<sup>371</sup>. Le nombre d'expériences menées sur des échelles de temps suffisamment longues est insuffisant pour savoir si les organismes seront capables de s'adapter génétiquement à ces changements.

### ***Quels sont les effets d'autres facteurs environnementaux comme la concentration de carbonate, le niveau de lumière, la température et les nutriments sur les processus de calcification?***

Les organismes océaniques ont besoin d'autres substances importantes en dehors des composantes du système de carbone, comme les macro- et les micronutriments. L'acidification des océans produira sans doute des changements dans la chimie océanique qui pourraient avoir un impact sur la disponibilité des nutriments, et sur la toxicité et la spéciation des éléments traces par rapport aux organismes marins; l'ampleur des changements liés au pH est toutefois difficile à établir. La variation de la disponibilité des nutriments pourrait avoir un effet indirect sur l'acquisition cellulaire, la croissance des organismes polysynthétiques, ou la valeur nutritionnelle des microorganismes par rapport aux niveaux élevés de la chaîne trophique<sup>372</sup>. De plus, les microorganismes non photosynthétiques comme les bactéries, les fungi et les protistes pourraient bénéficier d'une augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> et de changements dans la spéciation.

Le pH des océans varie en fonction de la lumière disponible, de l'abondance du phytoplancton, de l'upwelling, de l'alcalinité et de la température de l'eau, démontrant l'influence des processus biologiques sur le pH océanique. L'ionisation des nutriments sous forme de solutés, essentiels à la nutrition du phytoplancton, varie effectivement selon la valeur du pH<sup>373</sup>. Il est donc important que les modèles et les expériences futures sur le pH océanique tiennent compte de l'influence de ces autres variables sur le processus de la calcification, ce que les études antérieures n'ont pas toujours fait<sup>374</sup>.

369 Ibid.

370 Cooley, S. R., Doney, S. C. (2009?). Economic vulnerability assessment of U.S. fishery revenues to ocean acidification. Submitted to Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0709640104](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0709640104).

371 Orr, J. C., Fabry, V. J., Aumont, O., Bopp, L., Doney, S. C., *et al.* (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437:681–686.

372 The Royal Society (2005). Ocean Acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy Document 12/05. <http://royalsociety.org/document.asp?id=3249>

373 Ibid.

374 Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L., Robbins, L. L. (2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18–20 April 2005, St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S Geological Survey, 88 pp.

***Comment les communautés comprenant un mélange d'organismes calcifiants et non-calcifiants vont-elles répondre à une diminution des taux de calcification, et quel impact cela aura-t-il sur la chaîne trophique marine?***

La complexité et la non-linéarité de l'acidification des océans, ainsi que le manque de données disponibles sur le changement de l'abondance relative des espèces par rapport à l'augmentation du taux de CO<sub>2</sub> dans les océans, posent des difficultés pour la prédiction exacte des réponses au niveau des communautés. Des observations obtenues dans des environnements marins acidifiés naturellement, comme Ischia en Italie, montrent qu'un pH bas provoque des changements, et fournissent d'importants renseignements sur les impacts de l'acidification des océans au niveau de l'écosystème<sup>375</sup>.

Le nombre d'espèces dénombrées dans les eaux à pH moyen de 7,8 d'Ischia est inférieur de 30% à celui de sites ayant un pH normal. Les organismes à structures calcaires (par exemple les vers épiphytiques qui se trouvent fréquemment sur les feuilles d'herbiers marins), ou à coquilles (escargots, moules, oursins, balanes) sont absents ou bien en nombres très peu élevés dans les zones à pH bas. D'autre part, l'abondance des oursins, les grands invertébrés les plus courants des rochers sub-littoraux en dehors des cheminées, est réduite de façon significative lorsque le pH atteint des minima de 7,4-7,5 unités. À la place, les zones avoisinant les cheminées de CO<sub>2</sub> sont recouvertes de prairies d'herbiers marins et de communautés algaires luxuriantes, capables d'utiliser le CO<sub>2</sub> dissous directement, qui prospèrent ou du moins sont résilientes à des concentrations de CO<sub>2</sub> élevées<sup>376</sup>.

L'effet net d'une augmentation de CO<sub>2</sub> sur les herbiers marins sera une augmentation de la biomasse et de la productivité des herbiers. Une plus grande surface totale d'herbiers donnera probablement un habitat et des conditions plus favorables aux espèces d'invertébrés et aux poissons qui y sont associés. Et pourtant, l'effet net de l'acidification des océans sur l'écosystème des récifs coralliens sera négatif, car un grand nombre de coraux d'eaux chaudes seront durement touchés par les effets combinés d'une augmentation des températures de la surface de la mer et une diminution de l'état de saturation du carbonate des eaux de surface dans les décennies à venir.

---

375 Hall Spencer, J., Rauer, E. (2009). Champagne Seas – Fortelling the Ocean's Future? *Current: The Journal of Marine Education*, Vol. 25(1):11–12

376 Hall-Spencer, J. M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S. M., Rowley, S. J., Tedesco, D., Buia, M. C. (2008). Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature* 454:96–99.

## V. CONCLUSIONS

La concentration globale de CO<sub>2</sub> atmosphérique est passée d'un taux préindustriel de 280 ppm à 384 ppm<sup>377</sup>, entraînant une augmentation de l'acidité des océans de 30%. La rapidité de cette augmentation marquée est 100 fois plus élevée que tout autre changement d'acidité de l'environnement marin intervenu au cours des 20 derniers millions d'années, et représente un événement géologique rare dans l'histoire de la planète<sup>378, 379</sup>.

Si les émissions d'origine anthropiques continuent à augmenter au rythme actuel, l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique au cours du 21<sup>e</sup> siècle devrait dépasser 800ppm d'ici 2100<sup>380</sup>. L'acidification des océans est une conséquence directe de l'augmentation de CO<sub>2</sub> atmosphérique actuelle, indépendamment des changements de climat. Le niveau de certitude élevé des prédictions se base sur les réactions chimiques complexes mais prévisibles du carbonate marin, et sur le cycle du CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau de mer. L'acidification des océans suivra l'accélération des émissions globales de CO<sub>2</sub>, entraînant une augmentation de 150-185% de l'acidité d'ici 2100, aux taux d'émissions actuels (soit une baisse de 0,4-0,45 unité de pH)<sup>381</sup>.

Une augmentation de l'acidification des océans réduit la disponibilité dans l'eau de mer des minéraux de carbonate (aragonite et calcite), qui sont des composantes importantes pour les plantes et les animaux marins. Les concentrations d'ions de carbonate sont plus basses qu'elles ne l'ont jamais été au cours des 800 000 dernières années<sup>382</sup>. Il a été démontré expérimentalement qu'une augmentation de pCO<sub>2</sub> (560ppm) a un effet négatif sur la calcification, entraînant une diminution des taux de calcification entre 5-60% chez les coraux, les coccolithophores et les foraminifères<sup>383, 384, 385</sup>. Au fur et à mesure que les océans du monde deviendront moins saturés en minéraux de carbonate, on prévoit que les organismes marins construiront des squelettes et des coquilles plus fragiles, et que leurs taux de croissance seront plus bas, leur avantage compétitif devenant de plus en plus difficile à maintenir.

L'horizon de saturation du CaCO<sub>3</sub> au-dessus duquel le CaCO<sub>3</sub> peut être formé, et en-deçà duquel il se dissout facilement, est remonté de façon significative dans certaines régions de l'océan, jusqu'à 150 m dans l'Atlantique, entraînant une diminution de l'habitat disponible pour certains organismes calcifiants importants<sup>386</sup>. L'eau de mer sous-saturée vis-à-vis de ces minéraux devient corrosive, et les coquilles de ces organismes calcifiants se dissolvent de plus en plus facilement. D'ici 2100, 70% des coraux d'eaux froides seront effectivement exposés à des eaux corrosives<sup>387</sup>. Les écosystèmes récifaux de coraux d'eaux froides servent d'habitat, de zone de nourriture et de nurserie à de nombreux organismes d'eaux profondes, et supportent une faune à la fois caractéristique et importante au niveau commercial, bien plus diverse que celle que l'on trouve sur les fonds marins avoisinants<sup>388</sup>.

377 Solomon, S., Quinn, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. (eds) (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.

378 Turley, C. M., Roberts, J. M., Guinotte, J. M. (2007). Corals in deepwater: will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems. *Coral Reefs* 26:445-448.

379 UNESCO, IGBP, MEL, SCOR. (2009). Ocean Acidification: A Summary for Policymakers from the Second Symposium on the Ocean in a High-CO<sub>2</sub> World. [www.ocean-acidification.net](http://www.ocean-acidification.net)

380 Feely, R. A., Sabine, C. L., Hernandez-Ayon, J. M., Lanson, D., Hales, B. (2008). Evidence for Upwelling of Corrosive "Acidified" Water onto the Continental Shelf. *Science* 320:1490-1492.

381 Steinacher, M., Joos, F., Frölicher, T. L., Plattner, G.-K., Doney, S. C. (2009). Imminent ocean acidification in the Arctic project with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model. *Biogeosciences* 6:515-533.

382 Inter-Academy Panel on International Issues (IAP) (2009). Statement on Ocean Acidification. Endorsed, June 2009. [www.interacademies.net/CMS/9075.aspx](http://www.interacademies.net/CMS/9075.aspx)

383 Feely, R. A., Sabine, C. L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V. J., Millero, F. J. (2004). Impact of anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> system in the oceans. *Science* 305:362-365.

384 Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L., Robbins, L. L. (2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18-20 April 2005, St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S Geological Survey, 88 pp.

385 Fine, M., Tchernov, D. (2007). Scleractinian Coral Species Survive and Recover from Decalcification. *Science* 315:1811.

386 Feely, R. A., Sabine, C. L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V. J., Millero, F. J. (2004). Impact of anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> system in the oceans. *Science* 305:362-365.

387 Guinotte, J. M., Orr, J., Cairns, S., Freiwald, A., Morgan, L., George, R. (2006). Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea scleractinian corals? *Front Ecol Environ* 4(3):141-146.

388 Turley, C. M., Roberts, J. M., Guinotte, J. M. (2007). Corals in deepwater: will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems. *Coral Reefs* 26:445-448.

Les récifs de coraux tropicaux fournissent des biens et services globaux évalués à plus de 30 milliards US\$, comme la protection côtière, le tourisme et la sécurité alimentaire<sup>389</sup>. On prévoit que la Grande Barrière de corail, la mer de corail et la mer des Caraïbes devanceront les autres régions tropicales dans leur baisse de niveau de saturation en aragonite liée à la hausse de pCO<sub>2</sub>, rendant des zones importantes de l'océan inhospitalières aux récifs coralliens, et affectant la pérennité des biens et services fournis par les récifs, dont bénéficient des millions de personnes parmi les plus pauvres au monde<sup>390</sup>; ceci aura sans aucun doute des impacts négatifs sur les écosystèmes marins.

La recherche sur l'acidification des océans en est encore à ses débuts, et il reste encore beaucoup de questions à répondre sur ses conséquences biologiques et biogéochimiques, ainsi que sur la détermination exacte des niveaux subcritiques, ou des seuils critiques pour les espèces marines, les écosystèmes et les services et fonctions fournis au niveau mondial. Les impacts dépendront dans une certaine mesure des mécanismes d'adaptation physiologique spécifiques à chaque espèce, et du coût énergétique de leur maintien à long terme. Les changements futurs de l'acidité de l'océan auront un impact potentiel sur la taille et la dynamique des populations, ainsi que la structure des communautés des calcificateurs, donnant l'avantage aux organismes moins dépendant du calcium<sup>391</sup>; l'effet sur les mollusques sera négatif; les poissons seront touchés; les espèces d'algues et d'invertébrés (comme les tunicates) très envahissantes et exotiques pourraient être avantagées; et le taux de calcification du corail sera réduit<sup>392</sup>. Toutefois, même si l'impact initial de l'acidification des océans est relativement clair, l'impact éventuel dépendra de l'interaction complexe de nombreuses variables. Le changement des valeurs économiques, normalement basées sur les niveaux trophiques supérieurs, est donc aussi difficile à évaluer. Ce que l'on sait, c'est que les biens et services de l'océan dont dépendent les populations humaines ne seront plus les mêmes dans les océans acidifiés futurs, car la hausse de concentration de pCO<sub>2</sub> a une influence sur la physiologie, le développement et la survie des organismes marins<sup>393</sup>. Il est urgent de faire des études de la dynamique du pH océanique, de ses mécanismes et de ses conséquences, mieux distribuées dans l'espace et plus intensives<sup>394</sup>, et de les focaliser sur les capacités adaptatives des organismes marins; ceci sera crucial pour pouvoir prédire la réponse des organismes et des écosystèmes au réchauffement et à l'acidification des océans<sup>395</sup>.

La théorie et des connaissances croissantes indiquent que beaucoup d'effets liés à l'acidification des océans ne sont peut-être pas linéaires, et qu'il existe des mécanismes de feedback positifs et négatifs dans les écosystèmes marins qui empêchent de prédire avec certitude les conséquences des changements de taux de CO<sub>2</sub><sup>396</sup>. L'océan est le plus grand réservoir naturel de carbone, absorbant ~26–29% des émissions anthropiques annuelles de carbone. Cependant, la capacité d'absorption du CO<sub>2</sub> par l'océan est réduite par l'acidification des océans, aggravant la problématique de la stabilisation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Même si le CO<sub>2</sub> atmosphérique se stabilisait à 450 ppm, l'acidification des océans aurait des conséquences considérables pour de nombreux écosystèmes marins. L'état de saturation, la température, la lumière et les nutriments agissent tous sur les taux de calcification des organismes. Les activités humaines modifient l'ensemble de ces facteurs<sup>397</sup>.

389 Kite-Powell, H. L. (2009). A Global Perspective on the Economics of Ocean Acidification. *Journal of Marine Education* 25 (1):25 – 29.

390 OSPAR Commission (2006). Effects of the marine environment of ocean acidification resulting from elevated levels of CO<sub>2</sub> in the atmosphere.

391 Guinotte, J. M., Fabry, V. J. (2008). Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1134: 320.

392 Brander, L. M., Rehdanz, K., Tol, R. S. J., and van Beukering, P. J. H. (2009). The Economic Impact of Ocean Acidification on Coral Reefs. Working Paper No. 282. ESRI: Dublin, Ireland.

393 Andersson, A. J., Mackenzie, F. T., Bates, N. R. (2008). Life of the margin: implications of ocean acidification on Mg-calcite, high latitude and cold-water marine calcifiers. *Mar Ecol Prog Ser.* 373:265–273.

394 Wootton, T. J., Pfister, C. A., Forester, D. (2008). Dynamic patterns and ecological impacts of declining ocean pH in a high-resolution multi-year dataset. *PNAS*, Vol. 105(48): 18848–18853.

395 Kurihara, H. (2008). Effects of CO<sub>2</sub> driven ocean acidification on the early developmental stages of invertebrates. *Mar Ecol Prog Ser* 373:275–284.

396 Turley, C., Blackford, J. C., Widdicombe, S., Lowe, D., Nightingale, P. D., and Rees, A. P. (2006). Reviewing the Impact of Increased Atmospheric CO<sub>2</sub> on Oceanic Ph and the Marine Ecosystem. In: *Avoiding Dangerous Climate Change*. (H. J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakicenovic, T. Wigley, and G. Yohe, Eds.) Cambridge University Press: Cambridge, UK. pp. 65–70.

397 Kleypas, J. A., Feely, R. A., Fabry, V. J., Langdon, C., Sabine, C. L., Robbins, L. L. (2006). Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18–20 April 2005, St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S Geological Survey, 88 pp.

Toute une série de pressions globales ont des impacts sur l'océan, comme l'augmentation des températures océaniques, la surpêche et la pollution d'origine terrestre, dont les effets agissent en synergie avec l'augmentation de l'acidification et finissent par compromettre la santé et le bon fonctionnement de nombreux organismes marins. Une pression excessive pourrait pousser les écosystèmes vers un seuil critique au-delà duquel ils pourraient passer à un état alternatif où leur biodiversité, leur valeur et leur fonction seraient amoindries<sup>398</sup>. L'accumulation des impacts ou l'interaction entre les effets de toute une suite de pressions auront des conséquences plus importantes pour la biote qu'aucune d'elles séparément<sup>399</sup>. Dans le contexte des changements climatiques mondiaux et du nombre grandissant d'anomalies thermiques, l'acidification et le blanchiment des récifs coralliens exacerbent des feedbacks nuisibles agissant déjà sur les écosystèmes, entraînant les écosystèmes coralliens vers une domination par les macroalgues et les communautés non-coralliennes<sup>400</sup>.

A une échelle de temps courte, l'acidification des océans est irréversible, et le seul moyen d'éviter une dégradation conséquente des écosystèmes océaniques est la réduction rapide et urgente des émissions globales de CO<sub>2</sub> d'au moins 50% d'ici 2050, et bien davantage par la suite<sup>401</sup>. L'acidification des océans est une conséquence déjà observable et prévisible de l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique, qui devra être reconnue et intégrée au débat mondial sur les changements climatiques.

398 Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., and Hatzitolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737–1742.

399 Guinotte, J. M., Fabry, V. J. (2008). Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1134: 320.

400 Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., Harvell, C. D., Sale, P. F., Edwards, A. J., Caldeira, K., Knowlton, N., Eakin, C. M., Iglesias-Prieto, R., Muthiga, N., Bradbury, R. H., Dubi, A., and Hatzitolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science* 318, 1737–1742.

401 Inter-Academy Panel on International Issues (IAP). 2009. Statement on Ocean Acidification. Endorsed, June 2009. [www.interacademies.net/CMS/9075.aspx](http://www.interacademies.net/CMS/9075.aspx)