

# L'acidification de l'océan.

*Vous avez entendu parler de l'acidification des océans dans les médias et du lien éventuel avec le réchauffement climatique mais savez-vous ce que cela représente, comment cela marche et quelles peuvent en être les conséquences ?*

*Le texte qui suit cherche à vous donner des éclairages utiles.*

## Qu'est-ce que c'est et quel en est le mécanisme ?

Il s'agit tout d'abord d'un champs de recherche très récent (une dizaine d'années au plus) qui se base sur plusieurs certitudes mais aussi plusieurs hypothèses et laisse actuellement, en fait, beaucoup de questions sans véritables réponses.

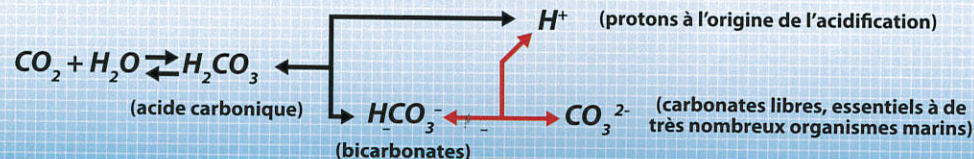
Nous avons là un domaine de recherche multidisciplinaire par excellence qui lie chimie, paléontologie, biologie, écologie, biogéochimie, modélisation, innovations technologiques et sciences sociales.

Depuis l'ère industrielle, l'homme n'a cessé de rejeter de grandes quantités de carbone dans

l'atmosphère. Or, on estime qu'environ un tiers du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) émis est capté dans le puits que représente l'océan. Cette masse de  $\text{CO}_2$  absorbée par l'océan atteindrait 12 milliards de tonnes par an.

Le  $\text{CO}_2$  gazeux de l'atmosphère se dissout dans les eaux de l'océan de surface. Cette dissolution et la vitesse de transfert du  $\text{CO}_2$  vers l'océan dépendent d'un certain nombre de facteurs : différence de pression partielle de  $\text{CO}_2$  entre l'air et la mer, solubilité du  $\text{CO}_2$  dans l'eau (qui dépend principalement de la température), vitesse du vent, état de la mer...

La formulation ci dessous explicite ce qu'il se passe :



Nous débuterons par les éléments de combinaison symbolisés par les flèches noires ci-dessus en partie gauche de la formule :

Une partie de l'excès de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) produit se combine à l'eau de mer ( $\text{H}_2\text{O}$ ) pour produire de l'acide carbonique ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) qui, lui-même, va libérer des protons ( $\text{H}^+$ ) et produire des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ). On a dans ce premier stade une explication de l'acidification puisque la libération de protons  $\text{H}^+$  dans l'eau est source d'abaissement du pH, dont on a appris qu'il caractérise, par des valeurs faibles, la qualité acide d'une solution (en dessous de 7).

Mais il faut aussi considérer la partie centrale de la formule, représentée par les flèches rouges. En effet cette libération de protons  $\text{H}^+$  voit une recombinaison de ceux-ci avec les carbonates libres ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) présents dans l'eau de mer pour produire également des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ).

On a donc d'une part un excès de protons abaissant le pH et d'autre part une diminution des carbonates libres qui sont fondamentaux à de très nombreux organismes marins.

Par ailleurs des prédictions basées sur des modèles numériques suggèrent que les niveaux de baisse du pH qui pourraient être atteints à l'avenir verraient non seulement les eaux s'appauvrir en carbonates libres mais celles-ci devenir corrosives, notamment pour une forme de carbonate de calcium nommée « aragonite » qui serait alors susceptible de se dissoudre alors qu'elle est un élément constitutif majeur de la coquille et du squelette de nombre d'espèces marines.

En fait, le dilemme est : « moins de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère et donc moins de gaz à effet de serre et de réchauffement » ou « plus de  $\text{CO}_2$  dans l'océan et un pH plus acide » !

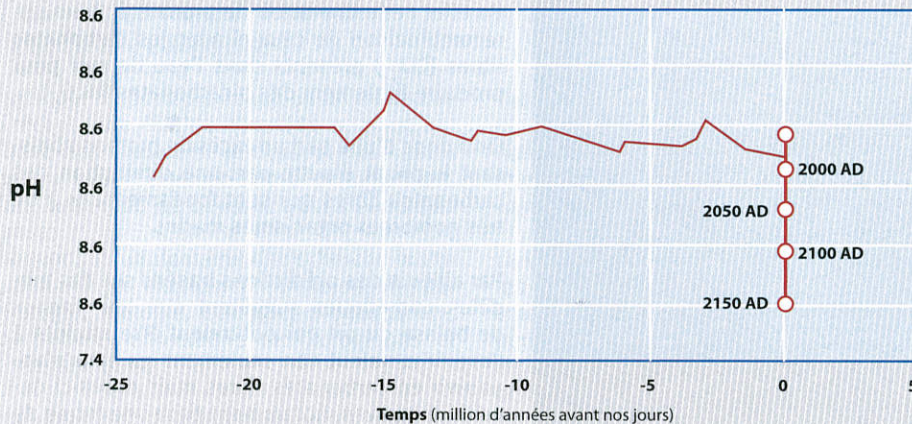


## Que sait-on de la vitesse du phénomène ?

Depuis 20 millions d'années, le pH de l'eau de mer est resté stable au niveau environ de 8,2 (soit légèrement alcalin). L'océan n'est pas acide et ne le sera jamais, mais il s'acidifie.

En effet, l'acidité des océans aurait progressé de 30 % depuis le début de la révolution industrielle (vers 1800), soit une baisse de 0,1 du pH, pour atteindre 8,08 actuellement.

Sur la base des prévisions du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ou IPCC en anglais), l'augmentation actuelle du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère devrait encore diminuer le pH des eaux du globe pour atteindre 7,8 d'ici la fin du siècle.



Variation du pH océanique au cours des 25 derniers millions d'années (d'après Turley et al, in Avoiding Dangerous Climate Change, 2006).

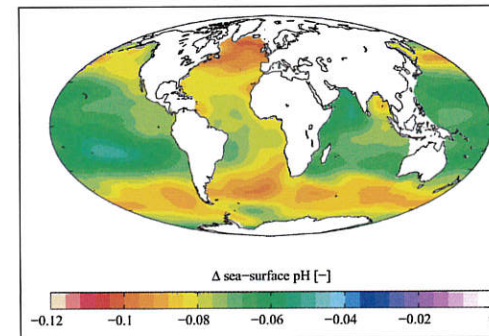
Certains rapports scientifiques estiment que cette diminution du pH de 0,3 d'ici 2100 pourrait être dépassée si aucune mesure n'est prise. Il s'agirait du pH le plus bas jamais enregistré depuis des centaines de millions d'années. Or il est estimé que la fabrication de calcaire par les organismes marins diminue de 20 à 50 % dans des conditions identiques à celles qui sont attendues en 2100.

L'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> atmosphérique suit une courbe exponentielle. En corollaire, l'augmentation est 100 fois plus aiguë que tous les changements intervenus en matière de pH dans les océans depuis 20 millions d'années ! Durant la cinquième grande crise d'extinction massive, il y a 65,5 millions d'années, le pH des océans s'était abaissé et ceci avait entraîné, avec de multiples autres

facteurs, la disparition d'importants groupes marins. Des coraux, certains organismes planctoniques et de multiples bio-calificateurs marins s'étaient éteints. Mais avec le temps, la résilience du système avait joué et la reconquête de la vie avait pu s'effectuer. Il est mesuré actuellement 392 ppm de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère soit 38 % de plus que la valeur de l'ère préindustrielle (280 ppm). Et la moitié de cette valeur s'est construite durant les 30 dernières années ! L'acidité croissante des océans est un résultat direct des émissions de CO<sub>2</sub>, non du changement climatique.

## Le phénomène est-il le même partout ?

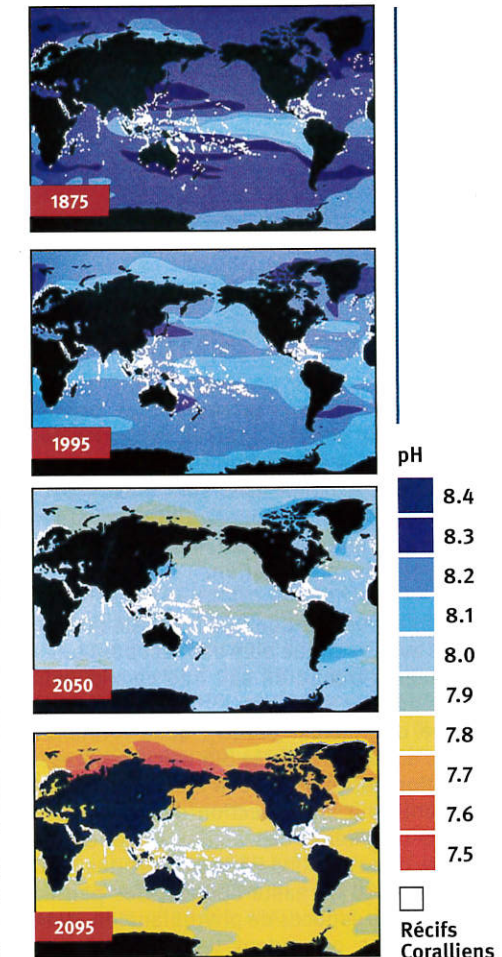
Non. En effet, l'abaissement du PH lié à la combinaison du CO<sub>2</sub> avec l'eau est dépendant de plusieurs facteurs dont plus particulièrement la température et dans une certaine mesure de la salinité. Plus la température est faible, plus la combinaison du CO<sub>2</sub> avec l'eau est forte, donc l'émission de protons H<sup>+</sup> intense et donc également l'acidification. Ceci explique que ce sont les mers froides, et souvent dessalées, des hautes latitudes des hémisphères nord et sud qui vont être les plus vite touchées. Par ailleurs le phénomène est majeur dans les eaux de surface.

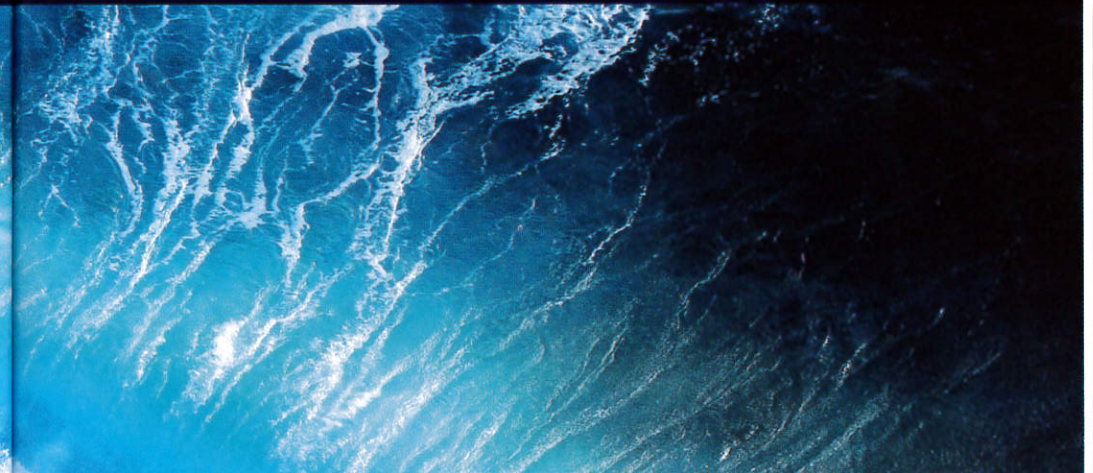
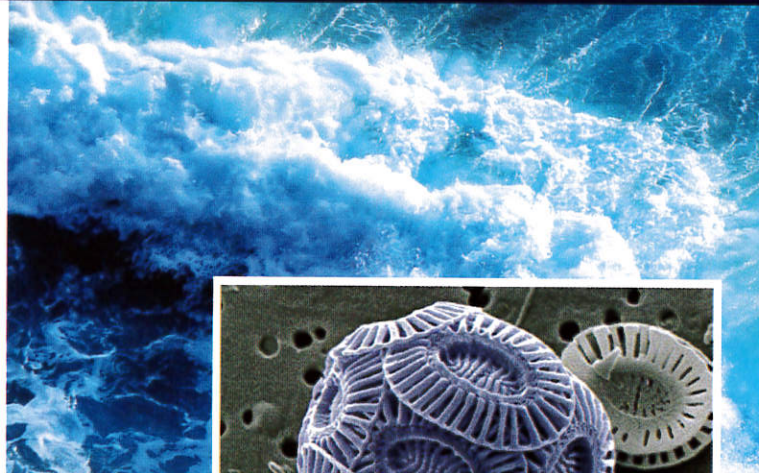


La figure ci-dessus donne une estimation de l'évolution du pH de surface de la mer entre l'époque pré-industrielle (1700) et la fin des années 1990 et montre une acidification plus in-

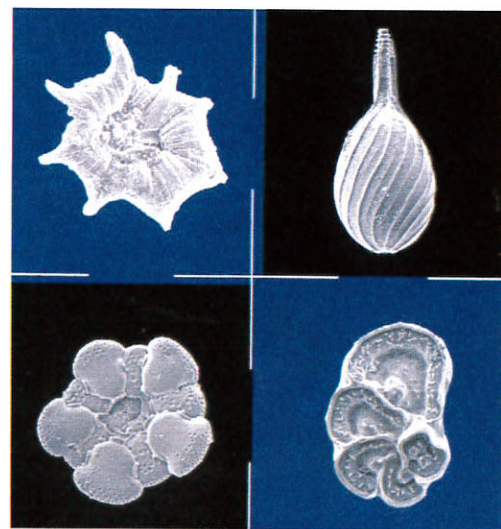
tense aux hautes latitudes. (Global Ocean Data Analysis Project, World Ocean Atlas, "CO<sub>2</sub> in Seawater: Equilibrium, Kinetics, Isotopes" (Elsevier 2001) by Zeebe and Wolf-Gladrow).

Les 4 cartes ci dessous expriment l'estimation du pH moyen des eaux de surface pour 1875, 1995, 2050 et 2095, d'après le modèle CCSM3 du Centre National pour la Recherche Atmosphérique (d'après Feely et al, Oceanography, 2009). Les récifs coralliens sont identifiés en blanc.





Coccolithophore (phytoplancton à squelette calcaire)



Foraminifères de Nouvelle-Calédonie, © IRD / J.P. Debenay

## Quel est l'impact sur les espèces vivantes ?

Si le changement dans la chimie des océans est quantifiable et prévisible, en revanche, les conséquences de l'acidification sur les organismes marins existents mais sont encore pour beaucoup très mal connues. Citons ci-après quelques éléments factuels mais aussi plusieurs de grande interrogation.

Le « captage » des carbonates libres de l'océan que nous avons évoqué plus haut est particulièrement négatif quand on sait que ceux-ci sont à la base de la calcification et la fabrication de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) sous forme de calcite ou d'aragonite. Or la bio-calcification est une fonction essentielle de la chaîne de vie en mer, autant pour la production des squelettes des récifs coralliens, des algues calcaires coralligènes, des coquilles de la plupart des mollusques bivalves ou gastéropodes, des parties construites des espèces de phytoplancton, dont de nombreuses possèdent un squelette calcaire, ou encore de foraminifères.

Les travaux récents précisent que pour le milieu du XXI<sup>ème</sup> siècle la calcification des coraux pourrait être diminuée d'un tiers et la superficie totale des récifs bloquée sans croissance. Il est considéré que le dépassement d'une teneur de 500 ppm de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère, qui est la

limite que l'homme semble vouloir admettre ne pas dépasser, entraînerait des concentrations dans l'eau de mer telles que le phénomène d'acidification et ses impacts sur les récifs coralliens deviendraient irréversibles. Il est aussi admis que la fonction photosynthétique des zooxanthelles (algues unicellulaires qui vivent en symbiose avec le corail), serait diminuée.

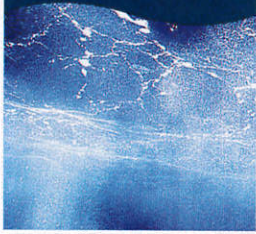
Il faut savoir en plus, que plus le pH baisse et donc l'eau de mer s'acidifie, plus l'énergie nécessaire à la bio-calcification augmente.

On résumera tout ceci par l'image suivante : le corail de nos lagons, la « toutoute » ou la belle porcelaine qui y vivent vont avoir de plus en plus de difficultés à construire de façon solide leur squelette et leur coquille car la disponibilité des carbonates qui leur sont utiles s'affaiblira et devront en outre dépenser une énergie encore plus forte (métabolisme, respiration, recherche de nourriture et autres fonctions vitales...) pour y parvenir, puisque l'acidification du milieu sera forte.

Pour ce qui concerne les impacts sur les espèces planctoniques, qui sont à la base de l'alimentation de nombreux êtres vivants, nous prendrons le cas des coccolithophores cité plus haut. Recouverts de petites plaques de carbonate de calcium, ils représentent des espèces parmi les plus abondantes des océans. Ils ont construit, par leur squelette fossile, l'essentiel des falaises de « calcaire », comme celles

célèbres de la Manche ! Dans l'hypothèse où la diminution du pH aurait un impact nocif sur ces espèces, c'est tout un équilibre de la production primaire marine et sa biodiversité qui pourrait en subir les conséquences.

Dans les zones froides de l'Océan Austral vivent de petits escargots planctoniques présents en très grand nombre dans les eaux polaires de la planète qui sont des ptéropodes. Ils sont à la base de l'alimentation de nombreuses espèces comme le zooplancton, la baleine, mais aussi des poissons commerciaux comme le saumon. Leur coquille est principalement constituée d'aragonite et si les prévisions d'atteinte d'un niveau de pH rendant les eaux corrosives à cette forme calcaire se réalisent, les ptéropodes pourraient disparaître ou avoir à migrer vers des eaux plus chaudes auxquelles ils ne sont pas adaptés.



Ptéropodé (© AWI)

et donc sur la qualité des perles fait l'objet de programmes de recherche menés dans le cadre d'un projet (POLYPERL) financé par l'Agence Nationale de la Recherche.

Aux USA, bien que quelques expériences ciblées sur des espèces précises (huîtres par exemple) aient apporté des informations intéressantes sur une « adaptabilité » potentielle, il apparaît que l'acidification des océans perturbe déjà, selon la NOAA, des élevages d'huîtres sur la côte nord-ouest des États-Unis (croissance de la coquille ralentie, par exemple). Près de 3.000 emplois seraient ainsi menacés, principalement à proximité des embouchures déversant des nutriments en excès (voir ci-dessous facteurs aggravants).

Mais il n'y a pas que l'action du pH lui-même ou du déficit en carbonates sur la bio-calcification. En effet, pour les animaux marins, notamment les invertébrés et certains poissons, l'accumulation de  $\text{CO}_2$  dans le corps peut également entraîner des perturbations de processus physiologiques et engendrer des modifications morphologiques comme des réductions de taille, de l'état métabolique, de l'activité physique et de la reproduction.

Si comme on l'a vu, certains groupes de phytoplancton, comme les coccolithophores peuvent pâtir de l'acidification de l'océan, d'autres, y compris les cyanobactéries qui fixent l'azote, peuvent au contraire profiter des teneurs éle-

vées en  $\text{CO}_2$  et devenir alors des espèces opportunistes qui se développeront alors plus. Il en va ainsi également des méduses.

Les larves et juvéniles étant particulièrement sensibles, la sécurité alimentaire de millions d'humains pourrait être touchée : si l'acidification rend impossible la vie pour les coraux, biodiversité, tourisme, pêcheries, aquaculture et protection du trait de côte seront affectés durablement. On sait par ailleurs que le blanchissement du corail est très dépendant de la synergie hausse thermique / baisse du pH. Des

inter-réactions sont aussi possibles dans la stabilisation du  $\text{CO}_2$  atmosphérique si l'océan en contient plus et ne peut plus tout stocker ! La pompe carbone va être fortement perturbée si les organismes marins calcifient anormalement. Aujourd'hui les Etats veulent maintenir le niveau atmosphérique à moins de 500 ppm de  $\text{CO}_2$  mais rien n'est moins sûr que nous y parvenions.

Beaucoup reste donc encore à découvrir, 62 % des publications sur l'acidification des océans ont été produites depuis 2004.

Les dernières recherches montrent également que l'acidification des océans entraîne très vraisemblablement une diminution de la profondeur de la zone de saturation du calcaire dite lysocline. La quantification de cette remontée de la lysocline n'est actuellement pas mesurée mais simulée. Cependant si cette remontée existe, elle aurait de graves répercussions sur la survie des espèces calcaires des eaux profondes et notamment des coraux dits « froids », découverts très récemment, dont on ne connaît encore que très peu la physiologie et qui représentent des écosystèmes très originaux constituant une gigantesque trame de vie pour les environnements profonds sur toute la planète.

Pour des espèces de bivalves exploités, l'impact sur la fabrication de la nacre en Polynésie



Colonies de coraux branchus en cours de blanchissement. Des algues ont déjà conquis certaines colonies mortes (partie supérieure en centre gauche de l'image). Côte Est de la Nouvelle-Calédonie. © L. Loubersac 2012



## Y a-t-il des facteurs aggravants ?

Une cause environnementale sous-estimée entrerait également en jeu qui est celle de l'enrichissement en sels nutritifs des eaux côtières que l'on nomme l'eutrophisation.

En effet d'importantes quantités de nutriments, en majorité résultant des activités humaines, principalement des phosphates et des nitrates, arrivent en continu dans les mers et océans du globe et peuvent, le cas échéant, provoquer des efflorescences algales dite « blooms ».

Or un excès de matière organique sous forme de phytoplancton ou de macroalgues, non dispersés par des courants, ou non consommés par d'autres organismes et finissant par mourir et couler au fond voit œuvrer un phénomène de décomposition par des bactéries qui consomment de l'oxygène, phénomène certes localisé mais réel en zone de forte productivité. Cette décomposition de la matière organique produit du sulfure d'hydrogène (SH<sub>2</sub>), du méthane (CH<sub>4</sub>), de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) et surtout du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)...

## En résumé quelles sont les grandes questions ?

On les résumera comme suit, bien qu'il y en ait beaucoup d'autres :

- Quelle est la limite d'absorption de CO<sub>2</sub> de l'océan ?
- Que se passera-t-il si l'océan cesse d'absorber l'excédent de CO<sub>2</sub> ?
- Quels sont les seuils d'alerte et comment réagiront les écosystèmes avec tous les collatéraux sur l'économie mondiale ?
- Comment vont réagir les espèces non encore étudiées à l'acidification de leur milieu ?
- Quels sont les gènes majeurs impliqués dans la bio-calcification et la régulation de la balance acido-basique ?
- Quels degrés d'adaptabilité aux inévitables changements en cours ? Sachant que la mesure de la « plasticité » d'expression des écosystèmes est déterminante pour calculer cette capacité d'adaptation.
- Quelle sera l'interaction avec d'autres facteurs, par exemple l'augmentation de la température des océans ?
- Quels peuvent être les impacts de ces dérèglements sur les équilibres entre espèces, sur le développement d'opportunistes, sur les réseaux trophiques et sur les exploitations que l'homme peut en faire sous forme de pêche ou d'aquaculture ?
- Quels effets peut entraîner un excès de bicarbonates en mer ?

Autant d'inconnues auxquelles les scientifiques tentent de répondre via plusieurs programmes dont nous citerons les principaux ; l'un aux Etats-Unis (OCB [www.us-ocb.org](http://www.us-ocb.org), *Ocean Carbon and Biogeochemistry*), le second en Europe (EPOCA, [www.epoca.eu](http://www.epoca.eu)), mais d'autres aussi, plus régionaux tels le **Programme de surveillance et d'évaluation de l'Arctique (PSEA)**, qui se préoccupe de cette question primordiale.

Au plan scientifique la recherche s'active, certes, mais pas encore suffisamment et nombre de questions cruciales demeurent en suspens. Il nous est très difficile actuellement de préciser les impacts avec assez de pertinence.

## Quelles solutions ?

Un Policy Brief<sup>1</sup> récent de l'Institut du Développement Durable et des Relations Internationales (IDDRI) identifie les mesures suivantes :

- 1/ empêcher l'acidification de se produire en :
  - A) limitant la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, dont malheureusement il semble que les négociations internationales sur le climat n'aient pas abouti,
  - B) réduisant les flux de polluants côtiers qui aggravent localement l'acidification dans des zones productives, ce qui est possible via des politiques publiques adaptées, la Directive Cadre sur l'Eau de l'Europe en étant une,
  - C) limitation des émissions de gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub>, avec là aussi l'écueil actuel des négociations internationales.

- 2/ Renforcer la résilience des écosystèmes, par exemple via la mise en place d'un réseau d'Aires Marines Protégées correctement connectées entre elles puisque l'on sait que plus les écosystèmes sont riches en biodiversité plus ils ont de chance de résister aux stress environnementaux. Une telle politique de mise en place d'AMP existe et peut, de façon réaliste, être renforcée.

- 3/ Adapter les activités humaines par anticipation ou en réaction à l'acidification. Ceci concerne des solutions technologiques à mettre en œuvre notamment dans les domaines des pêches et de l'aquaculture, tant que les limites ne sont pas infranchissables et à voir se re-localiser certaines activités.

- 4/ Remédier l'acidification lorsqu'elle s'est déjà produite. Ceci concerne la mise en place, assez peu réaliste en fait, de techniques d'apports répétés de matériaux alcalins mais aussi celles, plus réalistes, du développement de méthodologies de restauration d'écosystèmes dégradés ou de remédiation du CO<sub>2</sub> par exemple avec des types d'aquaculture nouvelle (celle de micro-algues)<sup>2</sup> susceptibles de piéger le CO<sub>2</sub> produit par certaines industries (cas en pré-étude ici en Nouvelle-Calédonie avec des sociétés minières).

<sup>1</sup>Raphaël Billé and al. Que faire face à l'acidification des océans ? Policy Brief n°17/12 nov 2012. IDDRI Paris 8p.



Les ressources vivantes des océans sont évaluées en termes de services apportés à l'homme autour de 160 milliards de \$ par an et plus de 100 millions de personnes en vivent directement. Beaucoup de travaux se sont focalisés sur quelques espèces et nous manquons de recul. Même avec une stabilisation du CO<sub>2</sub> atmosphérique à 450 ppm, l'acidification des océans aura de profondes et durables répercussions sur nombre d'écosystèmes marins.

Il est en tout état de cause impératif d'alerter l'opinion publique, les gouvernements et de miser sur la responsabilisation de chacun.

## En guise de conclusion

Seul l'homme est en mesure de freiner si ce n'est d'enrayer le processus, par la diminution de ses émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

James Orr du CEA/CNRS de Gif sur Yvette, qui a été l'un des premiers scientifiques à alerter l'opinion publique dans une publication sortie en 2005 dans *Nature*, indiquait<sup>3</sup>: « *De nombreuses solutions partielles existent déjà pour réduire nos émissions de CO<sub>2</sub>. Ce qu'il manque,*

*c'est la volonté, de notre part aussi bien que de celle de nos décideurs politiques. Si chacun de nous pouvait commencer à réfléchir aux émissions de CO<sub>2</sub> (11 kg par jour et par personne, dont 4 kg absorbés par l'océan) et à la façon de les réduire, ça serait déjà un bon début.*

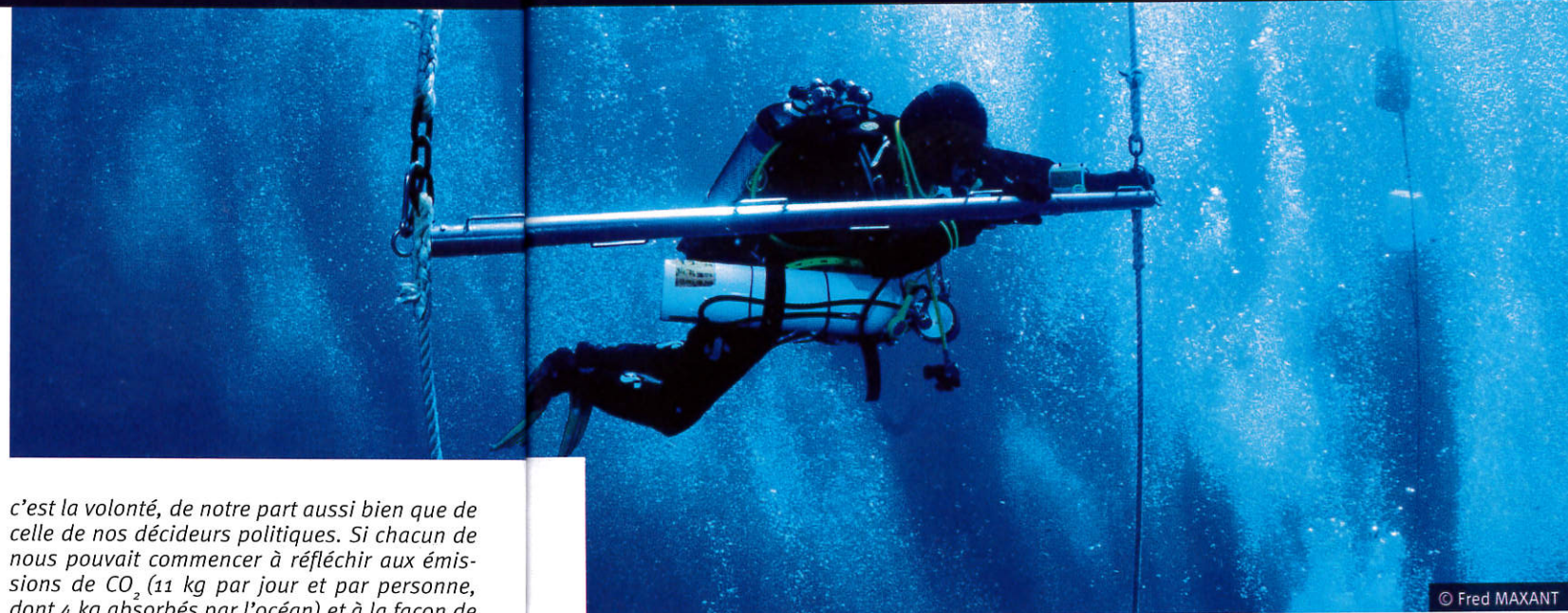
Bien entendu, tout au long de l'histoire de la Vie, les environnements ont profondément changé mais sur de longues périodes, de centaines de milliers ou de millions d'années et actuellement, tout varie sur quelques dizaines d'années et la tendance s'accélère !

L'homme, qui est l'un des éléments de la biodiversité planétaire, et qui l'oublie un peu trop, n'a pas la sagesse de définir le réel partage de responsabilité sur les causes du phénomène qu'il a largement créé et sur les solutions drastiques à apporter qui sont aussi de sa responsabilité.

Il est fondamental de souligner ici que ce phénomène d'acidification représente un risque complémentaire et majeur d'érosion de la biodiversité, notamment de la biodiversité marine dont nous savons l'importance qu'elle peut revêtir puisque la vie terrestre est née en mer et que nombre de découvertes fondamentales et

<sup>2</sup>Projet AMICAL (Aquaculture de Micro-algues en Nouvelle-Calédonie) porté par l'Agence de Développement de la Nouvelle-Calédonie en partenariat scientifique et technique avec Ifremer (sujet retenu en priorité 1 dans l'Accord-Cadre 2012-2015 tissé entre l'Etat, le Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, les 3 Provinces et Ifremer).

<sup>3</sup>James C. Orr and al. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437, 681-686 (29 September 2005)



© Fred MAXANT

de prix Nobel sont issus de l'étude des adaptations de cette vie dans les océans<sup>4</sup>.

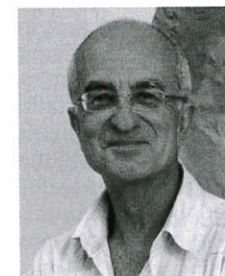
Il y aura donc inévitablement gagnants et perdants, mais l'humanité risque bien de faire partie des seconds. Alors l'acidification, une « course aux armements » ? Les nouvelles communautés qui vont apparaître pourront-elles fournir les mêmes services à l'humain que les écosystèmes actuels ? Rien n'est moins sûr, comme cette tendance actuelle généralisée des proliférations de méduses.

Sans le CO<sub>2</sub> piégé par l'océan, nous en serions aujourd'hui à 460 ppm dans l'atmosphère, cet effet de serre supplémentaire a donc pu être évité (et le réchauffement concomitant), mais au prix de l'acidification des océans, d'une érosion très probable et majeure de la biodiversité marine, de déséquilibres fonctionnels entre espèces qui pourraient être irréversibles et par la même d'un impact majeur sur l'homme, hypothèse qui reste plausible ; de Charybde en Scylla ?



**Gilles Bœuf**

Président du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris



**Lionel Loubersac**

Ancien Délégué de l'Ifremer en Nouvelle-Calédonie

<sup>4</sup>Voir la conférence de Gilles Bœuf sur « les trésors de la biodiversité marine » <http://culture.cnam.fr/agenda/octobre/les-tresors-de-la-biodiversite-marine-537867/kjsp>