

T

H

É

M

A

Essentiel

## commissariat général au développement durable

# Acidification des océans

SEPTEMBRE 2017

L'ACIDIFICATION DES OcéANS, UN PHÉNOMÈNE MONDIAL QUI S'AMPLIFIE

La 12<sup>e</sup> Conférence des Parties à la Convention sur la diversité biologique, qui s'est tenue en 2015 en Corée du Sud, a rappelé les conclusions du 5<sup>e</sup> rapport du GIEC de 2013 : les océans se sont acidifiés par rapport à la période pré-industrielle. Le pH a ainsi diminué à la surface des océans de 0,1 unité (Rhein et al., 2013) et l'acidité des océans devrait augmenter de 170 % d'ici 2100 entraînant de lourds impacts écologiques (récifs coralliens plus fragiles, migration des espèces...) et donc des impacts économiques et sociaux.

Depuis le début de l'ère industrielle, la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> a en effet crû de façon exponentielle. Une des conséquences les plus connues de cette augmentation est le réchauffement global causé par l'effet de serre, mais le CO<sub>2</sub> est également massivement dissous dans l'eau de mer sous forme d'acide carbonique, cet apport d'acide entraînant une baisse du pH de l'océan. Près de 30 % du dioxyde de carbone anthropique a été ainsi absorbé par les eaux marines faisant de l'océan une véritable pompe à carbone. D'autres processus pouvant impacter l'évolution du pH pourraient également être accélérés par le réchauffement climatique (Gattuso et Hanson, 2011).

Les projections d'évolution de l'acidification, basées sur des relevés réalisés depuis 1950, sont relativement fiables à l'échelle globale. Les modèles « système Terre » développés par la communauté scientifique internationale (Bopp et al. 2013) quantifient la diminution future du pH des eaux de surface d'ici 2100 entre -0.06 et -0.31 unités pH pour l'ensemble des scénarios testés. Par contre, les

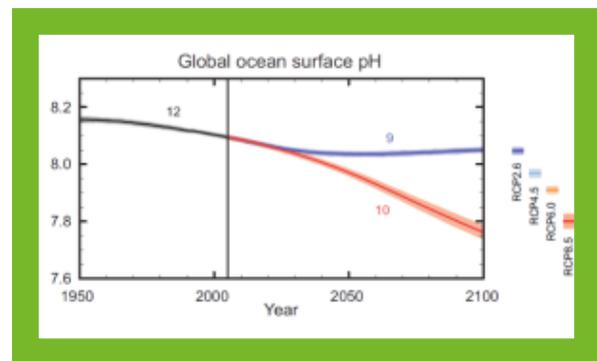


Figure 1 : [GIEC] Evolution du pH moyen en surface de l'océan entre 1950 et 2100 pour les différents scénarios publiés par le GIEC.

incertitudes augmentent aux échelles plus locales ou encore dans l'océan profond, l'acidification n'est pas homogène à l'échelle du globe.

La question est particulièrement importante pour la France qui possède la seconde zone économique maritime exclusive avec plus de 11 millions de km<sup>2</sup>. Le patrimoine naturel des territoires ultra-marins est unique, tant par sa richesse que par sa diversité. Ils représentent en particulier environ 20 % des atolls et 10 % de la totalité des récifs de la planète sur un linéaire de plus de 5 000 km.

### LES RÉPONSES DES ORGANISMES VIVANTS

Face à une pression comme l'acidification ou le réchauffement des eaux, des réponses sont mises en œuvre par les êtres vivants (Ronce et al. 2015). On distingue la migration, la plasticité phénotypique, l'évolution génétique, le réarrangement des communautés et les changements de pratiques et de savoirs. Pour autant, cette réponse peut conduire, à long terme, à des adaptations réussies ou des *mal-adaptations*. Elle nécessite par ailleurs du temps ou une richesse spécifique suffisante (diversité biologique initiale) pour pouvoir être effectivement mise en œuvre. Suivant la rapidité de l'acidification,

les espèces et leurs communautés pourront se retrouver mal adaptées à leur environnement et dès lors menacées.

### LES IMPACTS DE L'ACIDIFICATION DES OcéANS SUR LE VIVANT

Même si le phénomène physique d'acidification océanique est largement documenté, il reste très difficile de prévoir ses conséquences sur les écosystèmes marins, de les quantifier ou de prédire ses effets rétro-actifs. En effet, la complexité et la diversité des communautés biologiques ralentissent leur modélisation ou leur reproduction en conditions contrôlées en laboratoire.

Le premier effet suivi et étudié concerne les processus de calcification. Ceux-ci permettent la fabrication des exosquelettes (coccolithophores, coraux) ou des coquilles (mollusques). Or, la baisse de pH provoque une diminution de la disponibilité des minéraux essentiels à la fabrication de la coquille (calcite et aragonite), qui deviennent plus solubles et leur cristallisation entraîne une demande énergétique supplémentaire pour l'organisme. Cette demande peut alors pénaliser d'autres fonctions vitales (reproduction, croissance...) conduisant à des modifications des populations concernées et de l'écosystème entier. Au-delà de l'effet sur la calcification, les chercheurs ont également démontré que l'acidification avait des effets sur l'ensemble des écosystèmes marins.

#### Le phytoplancton

Environ la moitié de la calcite (un carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ ) des océans est produite par les coccolithophores, des algues unicellulaires présentes dans tous les bassins océaniques sous la forme des minuscules plaques de calcite de leur exosquelette. Ce sont les premiers maillons de la chaîne trophique des océans et les conséquences de l'acidification sur eux auront des répercussions en cascade sur d'autres espèces. Ces organismes ont par ailleurs un rôle essentiel dans la régulation du climat en piégeant le carbone dissous par précipitation formant une « pompe à carbone », dont le fonctionnement dépend des communautés et du milieu.

Les équipes du Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (CEREGE) ont montré que la masse des coccolithes d'*Emiliana huxleyi* a diminué de 30% en 13 ans en Méditerranée (de 5 à 3,5 pg) (Meier et al., 2014). Par ailleurs, les paramètres du milieu comme l'élévation de la pression de  $\text{CO}_2$  et la température agissent également en synergie ou en antagonisme en fonction des souches.

Bien qu'essentielle pour comprendre les effets globaux de l'acidification et les rétro-actions sur le cycle du carbone, la compréhension de l'effet du pH sur ces micro-organismes n'est

encore que partielle alors que nous savons que leurs réponses sont très variables : certaines souches de coccolithophores sont affectées par l'acidification alors que d'autres ne le sont pas ou en bénéficient (Beaufort et al., 2011; Langer et al., 2006; Langer et al., 2009).

#### Les récifs coralliens

L'acidification des océans, en fragilisant le squelette calcaire des coraux bioconstructeurs, pourrait affaiblir les structures coralliennes édifiées autour des îles tropicales et avoir des répercussions sur la biodiversité de ces écosystèmes et leurs services associés. Or, bien que les récifs coralliens soient un point chaud de biodiversité, peu de données sont actuellement disponibles sur les réponses des récifs coralliens à l'acidification de l'océan.

Comme pour le phytoplancton, les organismes des communautés coralliennes présentent des sensibilités différentes à l'acidification (Chan et al., 2013) et pourraient entraîner des modifications importantes de la structure des communautés et ainsi réduire considérablement la complexité de l'habitat des récifs coralliens dans le futur (Fabricius et al., 2011, 2013).



Figure 2 : Mazéas Franck, "Paysage sous-marin-Antilles 2," Documentation Ifreco, <http://ifreco-doc.fr/items/show/584>

#### Les algues

Parmi les organismes les plus sensibles à l'acidification, il y a les algues calcaires corallinacées des bancs de maërl (Kroeker et al. 2013, Martin et al. 2009). Ces bancs forment un habitat remarquable avec de grandes fonctions écologiques pour d'autres espèces en leur servant de réserve de nourriture. Ces algues produisent de la calcite magnésienne, ce qui les rend sensibles à l'acidification. Or, les bancs de maërl sont formés par un ensemble de ces algues calcaires mais aussi de macroalgues non calcaires. Ces derniers risquent de profiter des difficultés des premiers et bouleverser l'écosystème formé avec des répercussions sur les espèces herbivores mais aussi avec les

communautés bactériennes essentielles à leur biologie (Egan et al. 2013, Dittami et al. 2014). Les effets de l'acidification sur ces microorganismes associés au maërl sont encore méconnus bien qu'ils jouent un rôle prépondérant lors du recrutement des invertébrés sur les algues corallinacées (Johnson et al. 1991). Par ailleurs, les microorganismes perforants (cyanobactéries, algues et champignons) présents dans le maërl sont à l'origine de taux élevés de dissolution susceptibles d'être augmentés par l'acidification des océans (Tribollet et al. 2009).

### Les mollusques

Comme pour le plancton ou les algues calcifiées, la coquille des mollusques est principalement constituée de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  sous deux formes : amorphe aux stades juvéniles puis aragonite aux stades suivants. Cette particularité les rend particulièrement sensibles à l'acidification et constitue un indicateur pertinent pour évaluer leurs réponses adaptatives au stress que constitue l'acidification. Plus généralement, leur répartition dans toutes les mers du globe et à toutes les profondeurs en fait un bon modèle pour les études des impacts de l'acidification sur l'écosystème océan.

Par exemple chez l'ormeau, l'acidification du milieu, combinée ou non à une augmentation de la température, a, selon les espèces, un impact négatif sur la mortalité larvaire, la formation de la coquille et la croissance (Crim et al. 2011, Byrn et al. 2011).

Bien que les mollusques soient, pour la plupart, des espèces d'intérêt économique, il existe très peu d'études sur les effets synergiques ou antagonistes des différentes pressions, dont l'acidification, à tous les stades de vie des animaux. Leurs réponses, comme pour le phytoplancton, est variable et dépend des espèces.

### Les poissons

Les poissons ont une bonne capacité d'homéostasie, c'est-à-dire qu'ils sont capables de maintenir leurs constantes physiologiques internes quelles que soient les variations physico-chimiques de leur environnement. Ils ont donc longtemps été considérés comme insensibles à l'acidification du milieu (Deigweier et al., 2010, Melzner et al., 2009). Néanmoins, même si peu d'études sont consacrées aux effets du pH sur l'écophysiologie des poissons, certains travaux démontrent une plus forte vulnérabilité des stades juvéniles à la baisse du pH (Moiseenko et Sharova, 2006). Par ailleurs, il est démontré que les conditions environnementales précoces (disponibilité en nourriture, température ou teneur en oxygène) ont une influence sur la plasticité phénotypique, c'est-à-dire la capacité à exprimer, pour un individu, de façon différente son patrimoine génétique en fonction de l'environnement, ainsi que sur la croissance

et ce, tout au long de la vie des poissons (Vagner et al., 2007). Le pH a également un impact démontré sur les activités sensorielles des poissons (audition, olfaction).

## IMPACTS SOCIO-ÉCONOMIQUES DE L'ACIDIFICATION DES OCÉANS

L'acidification des océans ayant un impact sur une large gamme d'organismes marins et sur l'ensemble des écosystèmes, elle est susceptible d'avoir de sérieux effets sur les services que l'Homme retire des océans et donc sur l'économie des communautés côtières qui dépendent des ressources marines (pêche, aquaculture, tourisme). Du fait de l'hétérogénéité des villes côtières (allant de mégapoles continentales à de petits villages insulaires), leur dépendance aux ressources marines, et donc leur capacité de résilience, est très différente. Aborder la gestion des écosystèmes marins, le tourisme, la gouvernance et l'économie des ressources naturelles permet d'évaluer la vulnérabilité des sociétés humaines à l'acidification des océans et définir des pistes d'utilisation durable des océans pour favoriser leur adaptation. C'est l'un des objectifs du partenariat franco-monégasque établi en 2011 qui organise tous les deux ans, un atelier regroupant experts et décideurs (2010, 2012, 2015, 2017).

### Le tourisme

Le tourisme marin représente une importante activité économique dans de nombreux pays côtiers. La disparition des coraux et des espèces inféodées aux récifs est à ce titre très problématique, affectant de très nombreuses activités comme la pêche de loisir, la plongée sous-marine, l'éco-tourisme.

### La protection contre les risques

Les récifs coralliens protègent les côtes de l'érosion en limitant l'effet des vagues : leur affaiblissement, voire, leur disparition aura des impacts importants sur les infrastructures littorales.

### La conchyliculture et la pêche

En raison de l'impact de l'acidification sur les coquillages, la conchyliculture est reconnue, y compris par les professionnels du secteur, pour être la principale activité impactée par l'acidification des océans.

Dans le domaine de la pêche, les impacts de l'acidification sont encore mal appréhendés et beaucoup plus indirects. Le secteur de la pêche reste un témoin des effets du changement climatique sur les stocks de poissons et les échanges avec les chercheurs participent à l'amélioration des connaissances sur ce phénomène. Un des effets observés est le déplacement

des stocks de poissons en raison des modifications importantes de la chaîne alimentaire : l'augmentation du CO<sub>2</sub> dissout dans la couche de surface et la diminution du pH associé induisent des changements de la biodiversité qui se propagent tout au long des différents échelons de la chaîne trophique.

## LES QUESTIONS POSÉES À LA RECHERCHE

La recherche sur l'acidification des océans s'est largement intensifiée et les réponses biologiques à l'acidification des océans sont de mieux en mieux comprises avec une mobilisation scientifique et internationale sur cette question depuis les années 2000 autour de la Convention sur la diversité biologique. Une « Synthèse actualisée sur les impacts de l'acidification des océans sur la biodiversité marine », a été mise à jour en 2014. L'acidification des océans a des implications multiples et les études pluri- ou trans-disciplinaires doivent être renforcées. Enfin, les résultats des différentes recherches conduites sont encore bien souvent d'une portée écologique trop limitée pour permettre de conclure sur la capacité d'un stock ou d'une espèce à répondre à l'acidification des océans par adaptation génétique, acclimatation, etc. Plusieurs domaines restent ainsi encore à renforcer.

### Prise en compte des interactions entre les éléments d'un écosystème ou entre les différents écosystèmes

Les écosystèmes sont le lieu d'interactions complexes qui modulent les réponses individuelles, parfois sur le long terme. Par exemple, les interactions entre deux niveaux de la chaîne trophique peuvent être étudiées sur les aspects chimiques, comportementaux ou physiologiques. Travailler au niveau de l'écosystème implique de sortir des laboratoires, or réaliser des études en conditions réelles reste une difficulté majeure, limitant le nombre d'études.

### Effets multi-stress tout au long de la vie des organismes

Bien que l'acidification des océans représente une des principales menaces pour la biodiversité en milieu marin, elle n'est qu'un des éléments des multiples pressions qui impactent les écosystèmes océaniques. Le réchauffement et la stratification plus marquée des masses d'eau, la sévérité des

épisodes hypoxiques ainsi que les pressions anthropiques doivent également être pris en compte pour une compréhension globale des mécanismes qui concourent à la perte de la biodiversité marine. Les effets synergiques ou antagonistes d'autres pressions comme le réchauffement, la pression de CO<sub>2</sub> ou les pathogènes sont encore trop peu pris en compte dans les études sur l'acidification des océans. Par ailleurs, la majorité des études sur l'acidification des océans se focalisent sur les réponses individuelles ou spécifiques à un stade de développement donné et sur des durées en général courtes (inférieures à trois mois).

### Vulnérabilité et adaptation des sociétés humaines

L'adaptation des sociétés qui dépendent directement ou indirectement des services rendus par l'océan aux effets de l'acidification représente un champ de recherche émergent. Des travaux scientifiques sont nécessaires pour comprendre les chaînes d'impacts liant l'acidification aux diverses dimensions des modes de développement ainsi qu'aux solutions pour faire face à ces problèmes, par exemple la relocalisation d'activités aquacoles, la préservation renforcée des zones de récifs coralliens, le déploiement de nouvelles activités économiques, la modification des modes de consommation pour réduire la dépendance aux ressources menacées, etc.

### Conclusion

Même si le phénomène physique d'acidification des océans est largement documenté, il reste un important travail de recherche sur ses impacts sur les écosystèmes marins, y compris la prédiction de ses effets rétro-actifs, et ses conséquences économiques et sociales.

Avec le concours de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité, le ministère chargé de l'environnement a lancé un appel à propositions de recherche en septembre 2015 qui a permis d'identifier des projets pertinents susceptibles d'être menés sur le sujet. Huit projets ont été sélectionnés par le comité scientifique présidé par Jean-Pierre Gattuso (CNRS), dotés d'un co-financement dans le cadre de l'enveloppe spéciale Transition énergétique, qui soutient également l'animation scientifique du programme confiée à la FRB.

**Directrice de la publication** : Laurence Monnoyer-Smith,  
Commissaire générale au développement durable

**Auteurs** : Hélène Soubelet, FRB ; Philippe Veyre, MTES, CGDD/  
DRI, chargé de mission milieux littoraux et marins  
**ISSN** : 2555-7564

**Dépôt légal** : septembre 2017

**Impression** : SG/SPSSI/ATL2 utilisant du papier issu  
de forêts durablement gérées.

# commissariat général au développement durable

Direction de la recherche et de l'innovation  
Service de la recherche  
Mission observation de la Terre, environnement et climat  
Tour Séquoia - 92055 La Défense cedex

[www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)

