



[www.ocean-climate.org](http://www.ocean-climate.org)

# FICHES SCIENTIFIQUES



**PARIS2015**  
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE  
COP21·CMP11



# Pourquoi une Plateforme « Océan et Climat » ?

Bien qu'il soit un élément-clé de la machine climatique planétaire, l'océan a jusqu'ici été relativement absent des discussions sur le changement climatique. Intégrer l'océan parmi les enjeux et les défis discutés dans le cadre des négociations climatiques apparaît aujourd'hui, pour l'ensemble des acteurs réunis au sein de la Plateforme Océan et Climat, comme une réelle nécessité.

Couvrant 71 % de la surface du globe, l'océan mondial est un écosystème complexe qui fournit des services essentiels au maintien de la vie sur la Terre. Plus de 25 % du CO<sub>2</sub> émis chaque année par l'Homme dans l'atmosphère est absorbé par l'océan et il est également le premier fournisseur net d'oxygène de la planète, jouant un rôle tout aussi important que les forêts. L'océan constitue donc le principal poumon de la planète et se trouve au cœur de la machine climatique planétaire.

Si l'océan continue à limiter le réchauffement climatique global, depuis plusieurs décennies, la pression anthropique, principalement les émissions de CO<sub>2</sub>, la surexploitation des ressources et les pollutions, ont dégradé les écosystèmes marins. L'océan risque donc de voir son rôle de régulateur du climat perturbé.

Il est donc urgent de maintenir la qualité fonctionnelle des écosystèmes marins et de restaurer ceux qui se dégradent.

La Plateforme Océan et Climat est née d'une alliance entre des organisations non gouvernementales et des instituts de recherche, avec l'appui de la Commission Océanographique Intergouvernementale de l'UNESCO.

Elle regroupe aujourd'hui des organismes scientifiques, des universités, des institutions de recherche, des associations à but non lucratif, des fondations, des centres de science, d'établissements publics et des associations d'entreprises, tous impliqués pour une meilleure prise en compte de l'océan dans les négociations climatiques.



# Nos objectifs

En décembre 2015, aura lieu à Paris la 21<sup>e</sup> Conférence Climatique des Nations unies. Cette conférence définira pour les prochaines années la feuille de route qui permettra à la communauté internationale de répondre aux défis du changement climatique. La plateforme « Océan et Climat » a pour objectifs de :

## INTÉGRER L'OCÉAN DANS LE CHAMP DES NÉGOCIATIONS CLIMATIQUES ET CONTRIBUER AU SUCCÈS DE LA NÉGOCIATION POUR UN ACCORD AMBITIEUX À LA COP21

L'Accord de Paris doit prendre en compte l'océan et son rôle dans la machine climatique en vue de répondre au mieux aux enjeux climatiques majeurs des prochaines années.

## SENSIBILISER LE PUBLIC À L'IMPORTANCE DE L'OCÉAN DANS LA MACHINE CLIMATIQUE PLANÉTAIRE

L'amélioration des connaissances du grand public, sur les relations entre le climat et les milieux océanique et littoral, doit contribuer à une meilleure compréhension et prise en compte des impacts du changement climatique sur le milieu marin.

## DÉVELOPPER LES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES SUR LES LIENS ENTRE OCÉAN ET CLIMAT

Si les liens entre océan et climat sont progressivement mieux cernés, les besoins de connaissance et de recherche sont encore très importants. Disposer d'une batterie d'indicateurs permettra de mieux suivre l'évolution de l'océan dans la machine climatique.

## FORMER ET SENSIBILISER LES DÉCIDEURS, PUBLICS ET PRIVÉS, AUX ENJEUX OCÉAN ET CLIMAT

Les décideurs, qu'ils soient Chefs d'États, représentants d'organisations internationales et d'administrations nationales, acteurs privés, disposent aujourd'hui de trop peu de connaissances sur le rôle de l'océan dans le climat. Les enjeux liés aux conséquences directes et indirectes des changements climatiques sur les écosystèmes marins et terrestres de la frange littorale (où près de 80 % de la population mondiale se concentrera en 2050) doivent impérativement être mieux identifiés.

---

## POUR PLUS D'INFORMATIONS, CONTACTER :

Coordinatrice du Comité Scientifique

**Françoise Gaill**

[francoise.gaill@cnsr-dir.fr](mailto:francoise.gaill@cnsr-dir.fr)

Avec le concours de **Christine Causse**

Traduction : **Joséphine Ras**

Maquette graphique : **Elsa Godet**

## CITATION

PLATEFORME OCÉAN ET CLIMAT – *Fiches scientifiques*. [www.ocean-climate.org](http://www.ocean-climate.org), 69 pages, 2015.

Mars 2015

Cette publication a bénéficié du soutien de





# Table des matières

## Avant-propos

Françoise Gaill.....05

## L'océan, réservoir de chaleur

Sabrina Speich, Gilles Reverdin, Herlé Mercier et Catherine Jeandel.....07

## L'océan, pompe à carbone

Laurent Bopp, Chris Bowler, Lionel Guidi, Éric Karsenti et Colombar de Vargas.....13

## La hausse de la mer au xx<sup>e</sup> siècle : observation et causes

Benoit Meyssignac et Gilles Reverdin.....19

## L'acidification des océans

Jean-Pierre Gattuso.....23

## Les grands fonds océaniques, quels enjeux climatiques

Nadine Le Bris.....26

## L'océan, biodiversité et climat

Gilles Boeuf .....32

## Les coraux et le changement climatique

Denis Allemand.....37

## Biodiversité marine exploitée et changement climatique

Philippe Cury .....44

## Aquaculture et changements globaux

Marc Metian.....48

## Les petites îles, l'océan et le climat

Virginie Duvat, Alexandre Magnan et Jean-Pierre Gattuso.....54



# Avant-propos

Françoise Gaill  
(CNRS)

Pendant longtemps, les discussions sur le changement climatique n'ont pas pris l'océan en compte. Ces textes montrent que les choses changent et que cet environnement planétaire trouve enfin sa place légitime dans les enjeux climatiques. Quel rôle l'océan joue-t-il dans le climat et quels sont les impacts du changement climatique sur l'océan sont les questions abordées ici.

Le climat de notre planète dépend en grande partie de l'océan, mais qui le sait aujourd'hui ?

L'océan est le régulateur du climat mondial grâce à ses échanges continuels avec l'atmosphère qu'ils soient radiatifs, mécaniques et gazeux. Il absorbe, stocke et transporte dans son mouvement la chaleur du soleil en affectant la température et la circulation de l'atmosphère. Sa capacité à stocker la chaleur est bien plus efficace que celle des continents ou de l'atmosphère, mais on ne sait pas encore jusqu'à quand cette capacité de stockage pourra s'exercer.

Les eaux marines se réchauffent, ce qui a des conséquences sur les propriétés et la dynamique de l'océan, sur ses échanges avec l'atmosphère et sur les écosystèmes marins et leurs habitats. Les récifs coralliens par exemple recouvrent une faible surface des océans, mais abritent près d'un tiers des espèces marines connues. Une élévation de moins de un degré, au-delà d'une valeur seuil, suffit à provoquer le blanchissement et la disparition potentielle du récif. Les conséquences sont importantes car ces bioconstructions assurent de nombreux services dont la subsistance directe à plus de 500 millions de personnes dans le monde.

On ne sait pas assez que chaque jour, les océans absorbent un quart du CO<sub>2</sub> produit par l'homme. Il s'ensuit une modification chimique de l'eau

de mer qui se traduit par une acidification des océans. L'acidité des océans a augmenté de 30 % en deux siècles et demi et ce phénomène continue à s'amplifier, menaçant directement des espèces marines.

Oui, l'océan concentre 50 fois plus de carbone que l'atmosphère ; c'est un puits de carbone. Des mécanismes physiques et biologiques contribuent à l'absorption et au stockage du carbone océanique dont l'écosystème planctonique est un acteur majeur. Si la pompe à carbone biologique est identifiée, l'ampleur de son action reste à préciser. Il faut savoir que la diversité marine spécifique ne représente que 13 % des espèces vivantes décrites, ce qui est peu au regard de l'immensité du volume océanique. Est-ce lié à un manque de connaissances ? L'avenir le dira, mais l'espace encore inconnu des grands fonds marins pourra peut-être apporter une réponse s'il est exploré, car plus de 98 % du volume de l'océan est profond. L'image d'un milieu stable et homogène sur de vastes espaces désertiques, biologiquement peu actif, ne reflète en fait ni la diversité des écosystèmes profonds, ni leur sensibilité aux changements climatiques. Surface et fond de l'océan sont liés, au moins le constate-t-on déjà pour la biodiversité.

Lorsque la température de l'eau augmente, l'océan se dilate et la mer monte, et ce d'autant plus vite que la fonte des glaces s'accroît. Les modèles envisagent une hausse de plus d'un quart de mètre dès la fin de notre siècle avec un maximum de plus de 80 cm. Quelles sont les causes et les variabilités de ce phénomène sont des questions abordées dans ce livret qui présente aussi des exemples de conséquences socio-économiques comme celles qui concernent les petites îles, ou encore l'aquaculture et les ressources vivantes exploitées.



Tout n'a pas pu être traité ici, et de nouveaux textes viendront compléter le paysage des thèmes que nous pensons pertinents, comme les questions liées à l'anoxie des eaux marines, à l'Arctique et au pôle, celles liées au littoral et au côtier qui ne sont abordées ici qu'à travers les îles, et plus généralement celles des vulnérabilités liées aux phénomènes océaniques. Et c'est à partir de ces synthèses sur des domaines précis que l'on pourra avancer sur la question des solutions possibles, des stratégies et des propositions concrètes.

Que savons-nous de ces processus à l'échelle de l'espace-temps « humain », annuel ou décennal, régional ou local? Peu de choses en vérité, car nous n'avons pas ces données à notre disposition à ce jour. Nous sommes la plupart du temps sur des temps longs, géologiques, et sur des espaces immenses au regard de l'humain. Et compte tenu des diversités de lieux, nous ne pouvons pas encore déchiffrer les mécanismes à l'œuvre à petite échelle. Cela est vrai des variations thermiques, des mécanismes d'absorption du carbone, du changement du niveau des mers, des conséquences de l'acidification sur les écosystèmes marins, mais aussi des interactions de ces facteurs entre eux. Quelles capacités d'adaptation le vivant a-t-il aujourd'hui,

qu'il s'agisse des espèces naturelles ou de celles exploitées par la pêche ou produites par l'aquaculture, et quelles seront celles des communautés de demain? Il nous faut obtenir des données sur ces phénomènes pour pouvoir en appréhender le fonctionnement d'ensemble et en inférer les conséquences pour nos sociétés, tant du point de vue des services écosystémiques que des conséquences socio-économiques.

Peut-on raisonnablement moyenniser les caractéristiques de l'océan planétaire? Pour savoir quelle sera la dynamique de réponse de l'écosystème océan aux effets conjugués des instabilités naturelles, climatiques et anthropiques dans les différentes zones de l'océan, il nous faudra décrire les couplages entre fluctuations climatiques et stabilité des fonctions écologiques; voilà quelques propositions de recherches pour les scientifiques dans l'avenir.

Ces textes sont destinés à attirer l'attention du public sur certaines questions ouvertes à partir de ce qui est certain, pour montrer ce qui reste encore incertain. Car l'Océan est encore notre manteau pour l'hiver et une « assurance tous risques » pour l'avenir de la planète.



# L'océan, réservoir de chaleur

Sabrina Speich,  
(LMD, Paris)

Gilles Reverdin,  
(LOCEAN, Paris)

Herlé Mercier,  
(LPO, Brest)

Catherine Jeandel  
(LEGOS, Toulouse)

Le climat de notre planète est régi en grande partie par l'océan qui est le principal régulateur du climat mondial grâce à ses échanges radiatif, mécaniques et gazeux continuels avec l'atmosphère. En particulier, l'océan absorbe, stocke et transporte dans son mouvement la chaleur du soleil en affectant la température et la circulation de l'atmosphère. En outre, les océans sont la source principale des précipitations. La capacité de l'océan à stocker la chaleur est bien plus efficace (absorption de 93 % de l'excédent d'énergie résultant de l'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz de serre due aux activités humaines) que les continents (3 %) et l'atmosphère (1 %). Il a ainsi un effet modérateur sur le climat et ses changements. Toutefois, comme conséquence de l'absorption par l'océan de l'excès de chaleur induit par l'augmentation du contenu atmosphérique des gaz de serre, les eaux marines se réchauffent, ce qui a des conséquences sur les propriétés et la dynamique de l'océan, sur ses échanges avec l'atmosphère et sur les habitats des écosystèmes marins. Pendant longtemps, les discussions sur le changement climatique n'ont pas pris les océans en compte. Ceci tout simplement parce que très peu été connu à leur sujet. Cependant, notre capacité de comprendre et d'anticiper l'évolution du climat terrestre, dépend de notre connaissance fine des océans et leur effet sur le climat.

## OCÉAN : RÉSERVOIR DE CHALEUR ET SOURCE D'EAU

La Terre est la seule planète connue où l'eau est présente sous ses trois formes (liquide, gazeuse, solide) et notamment sous forme liquide dans l'océan. Du fait de la forte capacité calorifique de l'eau, de ses propriétés radiatives (sous forme gazeuse), et des changements de phases, cette présence est en bonne part responsable de la douceur du climat de notre planète ainsi que des apports d'eau sur les continents nécessaires au développement et au maintien de la vie terrestre.

Les océans couvrent 71 % de la surface de la Terre. L'océan est si vaste que nous oublions son rôle crucial dans les équilibres terrestres. L'océan

est un régulateur primordial du climat global par des échanges radiatifs, mécaniques et gazeux continuels avec l'atmosphère. Ces échanges et leurs conséquences sont au cœur du système climatique.

L'océan reçoit de la chaleur du rayonnement électromagnétique solaire, donc principalement dans les régions tropicales, mais échange aussi fortement en surface avec l'atmosphère, à toutes les latitudes où il n'est pas englacé. L'océan n'est pas immobile et les courants océaniques redistribuent l'excès de chaleur reçu aux tropiques vers les plus hautes latitudes. À ces latitudes, des transferts d'eau surface-profondeur ont lieu car lorsque les eaux de surface se refroidissent dans ces régions, elles deviennent plus denses et plongent alors vers les abysses. Le mécanisme de plongée des eaux en raison de leur densité



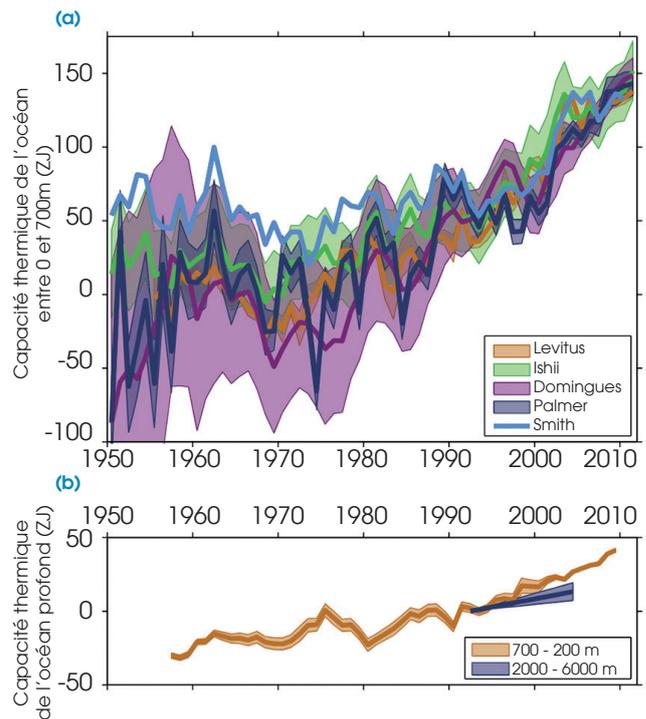
(et donc de la conjonction entre leur température froide et leur charge en sel) est le point de départ d'une circulation océanique à l'échelle globale que l'on appelle « circulation thermohaline » (du Grec *thermos*: température, *halin*: sel). L'océan réagit aussi dynamiquement à des changements des conditions climatiques (vents, ensoleillement...). Le temps de ces transferts et de ces redistributions est très variable, couvrant de la saison ou année dans les régions tropicales à la décennie dans les couches de surface, et à plusieurs centaines d'années, voir milliers d'années dans les couches profondes.

Atmosphère et océan n'échangent pas uniquement de la chaleur, mais aussi de l'eau, sous forme d'évaporation et de précipitations (pluie, neige). Les océans contiennent 97,5 % de l'eau terrestre, les continents en contiennent 2,4 % et l'atmosphère moins de 0,001 %. L'eau s'évapore de manière continue essentiellement depuis l'océan. La pluie et le déversement des fleuves compensent l'évaporation, mais cette compensation ne se fait pas forcément dans les mêmes régions. L'océan est aussi salé, ce qui transforme les propriétés physiques de l'eau de mer, en particulier sa densité. Les échanges d'eau avec l'atmosphère, les apports des rivières, de la fonte de la glace de mer ou des calottes de glace contribuent donc aux variations de densité de l'eau de mer, et à la circulation océanique et aux transferts verticaux dans l'océan.

D'une manière générale, les gaz sont plus solubles dans les eaux froides que chaudes. Par conséquent, les eaux de surfaces des hautes latitudes sont plus riches en gaz que celles des basses latitudes. Le renouvellement des eaux de surface par la circulation océanique et en particulier les échanges avec l'océan profond jouent par conséquent un rôle très important dans le cycle du gaz carbonique et du carbone, en entraînant les eaux enrichies des hautes latitudes vers l'océan profond.

## L'OCÉAN SE RÉCHAUFFE

Le réchauffement récent causé par l'émission des gaz à effet de serre par les activités humaines

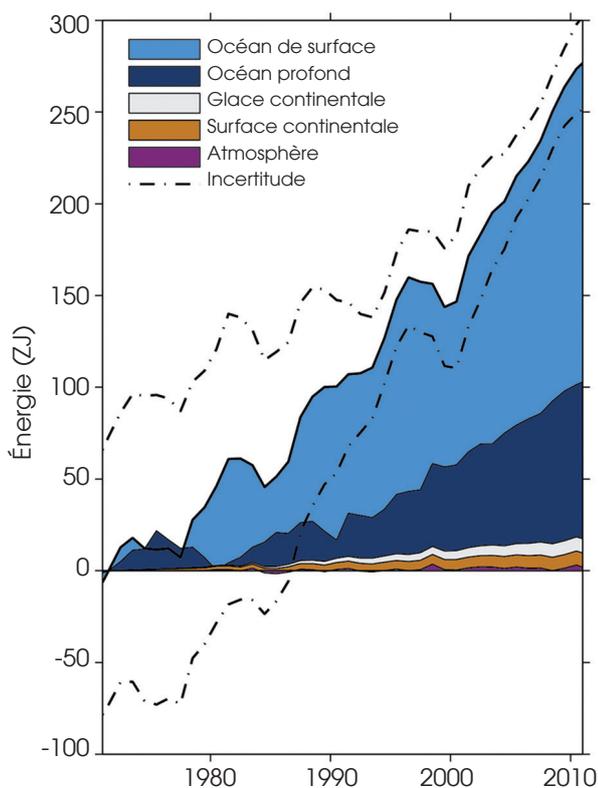


**Fig. 1** — (a) Évaluations de la moyenne annuelle du contenu de chaleur en ZétaJ ( $1 \text{ ZétaJ (ZJ)} = 10^{21}$  Joules) pour la couche supérieure de l'océan (de 0 à 700 m de profondeur) calculées à partir d'observations. Ces estimations sont la mise à jour des évaluations des travaux de Levitus *et al.* (2012), Ishii and Kimoto (2009), Domingues *et al.* (2008), Palmer *et al.* (2007) and Smith and Murphy (2007). Les incertitudes apparaissent en grisé telles que publiées dans les différents travaux. (b) Estimations de la moyenne glissante sur 5 ans du contenu de chaleur in ZJ pour la couche 700-2000 m (Levitus 2012) et pour l'océan profond (de 2000 à 6000 m) de 1992 à 2005 (Purkey and Johnson, 2010). Figure adaptée de Rhein *et al.*, 2013.

n'affecte pas que les basses couches de l'atmosphère et la surface des continents. Grâce à des mesures de température de la mer collectées au cours des 5-6 dernières décennies sur les 1000-2000 premiers mètres de l'océan, à partir de navires, de bouées océanographiques et de mouillages et plus récemment par des flotteurs permettant de faire des profils verticaux automatiques (le projet international Argo) des premiers 2000 m de la colonne d'eau, les océanographes ont observé que l'océan s'est réchauffé de façon importante sur cette période. Le réchauffement récent de l'océan affecte principalement les couches superficielles (les 300 à 500 premiers mètres) mais, dans les régions situées aux hautes latitudes, ce

réchauffement atteint les couches profondes (Figure 1; Rhein *et al.*, 2013; Levitus *et al.*, 2012; Ishii and Kimoto, 2009; Domingues *et al.* 2008; Palmer *et al.*, 2007; and Smith and Murphy, 2007).

La température de la couche 0-300 m a augmenté d'environ 0,3 °C depuis 1950. C'est environ deux fois moins que le changement de température de surface de l'océan. De même, la température de l'océan a moins augmenté en moyenne que celle de l'atmosphère. Cependant, en raison de sa masse et de la valeur élevée de la cha-



**Fig.2** — Courbe d'accumulation de l'énergie in ZJ faisant référence à 1971 et calculée entre 1971 et 2010 pour des différentes composantes du système climatique terrestre. Le réchauffement océanique (exprimé ici en tant que changement du contenu de chaleur) domine. L'océan des couches de surface (couleur bleu clair, couche de 0 à 700 m de profondeur) contribue de manière prépondérante. L'océan profond (couleur bleu foncé; couche d'eau en dessous de 700 m) contribue lui aussi de manière très importante. La fonte de la glace continentale (en gris clair), les surfaces continentales (en orange) et l'atmosphère (violet) contribuent de manière bien moins importante. L'incertitude des estimations est représentée en contour discontinu. Figure adaptée de Rhein *et al.* 2014.

leur spécifique de l'eau, cette augmentation de température de l'eau de mer fait de l'océan le plus grand puits et réservoir du surplus de chaleur injectée dans le système climatique par l'homme. En fait, plus de 90 % de la chaleur excédentaire accumulée dans le système climatique depuis 50 ans à cause du réchauffement anthropique est stockée dans l'océan (de 15 à 20 fois plus que dans la basse atmosphère et sur les terres émergées; Figure 2). Ceci représente un stockage énergétique excédentaire de l'océan qui est de plus de 200 zeta-joules ( $2 \cdot 10^{23}$  J; 1 ZJ =  $10^{21}$  Joules) depuis les années 70.

En outre, des résultats récents montrent, que l'océan profond a accumulé beaucoup plus de chaleur qu'estimé jusqu'à présent, ce qui pourrait expliquer, conjointement à l'impact de la présence de variabilité naturelle du climat telle que ENSO, le ralentissement du réchauffement atmosphérique observé ces dernières années (Durack *et al.*, 2014). Ce surplus de chaleur de l'océan provient du chauffage direct par l'énergie solaire (par exemple dans les régions arctiques à cause de la diminution accrue de la surface de la banquise en été) et des échanges de chaleur avec l'augmentation du rayonnement infrarouge dû à l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre l'atmosphère. L'accumulation du surplus d'énergie dans les couches profondes de l'océan s'est avérée ininterrompue et elle continue à induire une augmentation du contenu de chaleur des océans et cela en dépit d'une tendance quasi-nulle des températures de surface de l'océan observée pendant la dernière décennie (Balmaseda *et al.* 2013). De plus, ce hiatus climatique a été dernièrement expliqué par une augmentation de cette absorption de chaleur par les eaux profondes (Drijfhout *et al.*, 2014). La variabilité aléatoire du climat d'une année à l'autre est un fait d'expérience courante et n'a rien de surprenant en raison de la complexité et de la non-linéarité du système climatique. Des stagnations temporaires du réchauffement climatique sont ainsi liées essentiellement à la dynamique des océans.

Le réchauffement océanique induit des effets secondaires qui pourraient être très importants voire catastrophiques et que l'on connaît encore mal.



Parmi ceux-ci, il y a évidemment la contribution de ce réchauffement à l'élévation de son niveau moyen qui est actuellement de 1 mm/an. (e.g., Cazenave *et al.* 2014)

Les océans et mers ont aussi un autre effet direct sur le changement climatique: il est probable qu'à cause de l'augmentation des températures le cycle hydrologique planétaire ait changé, en s'intensifiant (Held and Soden, 2006; Allan *et al.*, 2010; Smith *et al.* 2010; Cubash *et al.*, 2013; Rhein *et al.*, 2013).

La vapeur d'eau étant un gaz à effet de serre, elle contribue à accélérer le réchauffement du climat, et donc l'évaporation de d'eau. Le changement du cycle hydrologique a comme signature dans l'océan la variation de salinité. La compilation des données récentes montre que les salinités de surface ont changé au cours des cinq dernières décennies, avec notamment une augmentation du contraste entre l'Atlantique nord et le Pacifique nord (Durack et Wijffels, 2010; Hosoda *et al.*, 2009; Rhein *et al.*, 2013). L'analyse des salinités en fonction de la profondeur révèle aussi des changements (Durack et Wijffels, 2010; Rhein *et al.*, 2013). L'observation la plus remarquable est une augmentation systématique du contraste de salinité entre les gyres subtropicales, plus salées, et les régions des plus hautes latitudes, en particulier celles de l'hémisphère sud. À l'échelle de l'océan mondial, les contrastes indiquent un transfert net d'eau douce des tropiques vers les hautes latitudes, constituant la signature d'une intensification du cycle hydrologique. Pour l'Atlantique nord, le bilan quantitatif du stockage de la chaleur et du flux d'eau douce au cours des 50 dernières années est cohérent avec un réchauffement qui augmente la teneur en eau de l'atmosphère, conduisant à une intensification du cycle hydrologique (Durack *et al.* 2012).

Le réchauffement de l'océan modifie aussi sa dynamique et les transports de chaleur et de sel en son sein perturbant ainsi localement les échanges énergétiques avec l'atmosphère à sa surface. La circulation thermohaline peut être aussi perturbée et affecter le climat à une échelle globale en diminuant significativement

les transports de chaleur vers les hautes latitudes et vers l'océan profond. Le GIEC estime très probable un ralentissement de cette circulation au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, insuffisant cependant pour induire un refroidissement dans les régions de l'Atlantique nord.

Le réchauffement des eaux océaniques a aussi un impact direct sur la fonte de la base des plateformes des glaciers continentaux entourant le Groenland et l'Antarctique, les deux principaux réservoirs d'eau stockée sur les continents (Jackson *et al.*, 2014; Schmidko *et al.*, 2014; Rignot *et al.*, 2014). Ainsi, si on savait déjà que le réchauffement climatique augmentait la fonte des glaciers, il est aujourd'hui prouvé que c'est le réchauffement des océans qui contribue de manière majoritaire à la fonte des plateformes glaciaires qui prolongent la calotte antarctique sur l'océan. Par exemple, si on considère que l'Antarctique représente environ 60 % des réserves d'eau douce de la planète, les études révèlent que la fonte de la base de ses calottes glaciaires a compté pour 55 % de la perte totale de leur masse de 2003 à 2008, ce qui représente un volume très important (Rignot *et al.*, 2014).

Aussi, le réchauffement des océans affecte les bilans biogéochimiques de l'océan et sa biosphère<sup>1</sup>. Si la majeure partie de ces points est rappelée dans les fiches scientifiques qui accompagnent celle-ci, on peut mentionner que le réchauffement aurait également une incidence sur l'oxygénation des océans: la solubilité de l'oxygène diminue avec l'augmentation de la température de l'eau: plus l'eau est chaude, moins il y a d'oxygène. Les conséquences sont à terme l'asphyxie de la biodiversité marine et la limitation de son habitat (e.g., Keeling *et al.* 2010).

Comparé à l'atmosphère, l'océan présente deux caractéristiques qui lui confèrent un rôle essentiel dans le climat :

1. Sa capacité thermique qui est plus de 1 000 fois celle de l'atmosphère et qui lui permet

---

<sup>1</sup> Se référer aux textes sur la Pompe de carbone et celui sur l'acidification et la deoxygenation des océans



de stocker l'essentiel du flux radiatif solaire et du surplus d'énergie générée par les activités humaines.

2. Il est affecté d'une dynamique beaucoup plus lente que l'atmosphère et d'une inertie thermique très grande ; il est donc susceptible de mémoriser plus longtemps, à des échelles de temps compatibles avec la variabilité climatique, les perturbations (ou anomalies) qui l'affectent.

Mais cet océan est encore mal connu du fait de sa vaste étendue et de la difficulté technique intrinsèque de l'observation océanique (mesures de très grande précision à des pressions dépassant les 500 atmosphères, nécessité de se rendre sur

place, dans le monde entier, avec des navires dont le coût est très important, chaque mesure demande un certain temps de réalisation quand l'océan est si vaste...).

De plus, les écoulements océaniques sont loin d'être des fleuves tranquilles : sa dynamique est très turbulente et ses interactions avec l'atmosphère et le climat sont très complexes. Réduire ces inconnues et ces incertitudes est indispensable pour prévoir avec plus fiabilité cette évolution future du climat. Observations et mesures sont les sources irremplaçables de nos connaissances. Il faut donc améliorer la nature et la quantité des observations océaniques et mettre en place un système pérenne d'observation de grande ampleur, coordonné internationalement.

## RÉFÉRENCES

- ALLAN R. P., SODEN B. J., JOHN V. O., INGRAM W. and GOOD P., 2010 – *Current Changes in Tropical Precipitation*. Environ. Res. Lett., 5, 025205.
- BALMASEDA M. A., TRENBERTH K. E. and KÄLLÉN E., 2013 – *Distinctive Climate Signals in Reanalysis of Global Ocean Heat Content*. Geophys. Res. Lett. 40, 1754-1759.
- CAZENAVE A., DIENG H., MEYSSIGNAC B., VON SCHUCKMANN K., DECHARME B. and BERTHIER E., 2014 – *The Rate of Sea Level Rise*. Nature Climate Change, vol. 4.
- CUBASH U. et al., 2013 – *Observations: Atmosphere and Surface*, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- DOMINGUES C. M., CHURCH J. A., WHITE N. J., GLECKLER P. J., WIJFFELS S. E., BARKER P. M. and DUNN J. R., 2008 – *Improved Estimates of Upper-Ocean Warming and Multidecadal Sea-Level Rise*. Nature, 453, 1090 – 1093.
- DRIJFHOUT S. S., BLAKER A. T., JOSEY S. A., NURSER A. J. G., SINHA B. and BALMASEDA M. A., 2014 – *Surface Warming Hiatus Caused by Increased Heat Uptake Across Multiple Ocean Basins*. Geophysical Research Letters, 41, (22), 7868-7874.
- DURACK P. J., GLECKLER P. J., LANDERER F. W. and TAYLOR K. E., 2014 – *Quantifying Underestimates of Long-Term Upper-Ocean Warming*. Nature Climate Change.
- DURACK P. J. and WIJFFELS S. E., 2010 – *Fifty-Year Trends in Global Ocean Salinities and their Relationship to Broad-Scale Warming*. J. Clim., 23, 4342 – 4362.
- DURACK P. J., WIJFFELS S. E. and MATEAR R. J., 2012 – *Ocean Salinities Reveal Strong Global Water Cycle Intensification during 1950 to 2000*. Science, 336, 455 – 458.
- HELD I. M. and SODEN B. J., 2006 – *Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming*. J. Climate, 19, 5686 – 5699.
- IPCC 5<sup>TH</sup> ASSESSMENT REPORT, 2013 – *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- ISHII M. and KIMOTO M., 2009 – *Reevaluation of Historical Ocean Heat Content Variations with Time-Varying Xbt and Mbt Depth Bias Corrections*. J. Oceanogr., 65, 287 – 299.



- JACKSON R., STRANEO F. and SUTHERLAND D., 2014 – *Externally Forced Fluctuations in Ocean Temperature at Greenland Glaciers in Non-Summer Months*. *Nature Geoscience*, 7, 503-508.
- KEELING R. F., KORTZINGER A. and GRUBER N., 2010 – *Ocean Deoxygenation in a Warming World*. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 2, 199 – 229.
- LEVITUS S., ANTONOV J. I., BOYER T. P., LOCARNINI R. A., GARCIA H. E. and MISHONOV A. V., 2009 – *Global Ocean Heat Content 1955 – 2008 in Light of Recently Revealed Instrumentation Problems*. *Geophys. Res. Lett.*, 36, 5.
- PALMER M. D., HAINES K., TETT S. F. B. and ANSELL T. J., 2007 – *Isolating the Signal of Ocean Global Warming*. *Geophys. Res. Lett.*, 34, 6.
- PURKEY S. G. and JOHNSON G. C., 2010 – *Warming of Global Abyssal and Deep Southern Ocean Waters between the 1990S and 2000S: Contributions to Global Heat and Sea Level Rise Budgets*. *J. Clim.*, 23, 6336 – 635.
- RHEIN M. *et al.*, 2013 – *Observations: Ocean*. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- RIGNOT E., MOUGINOT J., MORLIGHEM M., SEROUSSI H. and SCHEUCHL B., 2014 – *Widespread, Rapid Grounding Line Retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler Glaciers, West Antarctica, from 1992 To 2011*. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3502 – 3509.
- SCHMIDTKO S., HEYWOOD K. J., THOMPSON A. F. and AOKI S., 2014 – *Multidecadal Warming of Antarctic Waters*. *Science*, 1227-1231.
- SMITH T. M., ARKIN P. A., REN L. and SHEN S. S. P., 2012 – *Improved Reconstruction of Global Precipitation since 1900*. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 29, 1505 – 1517.
- SYED T. H., FAMIGLIETTI J.S. *et al.*, In Press – *Satellite-Based Global-Ocean Mass Balance Estimates of Interannual Variability and Emerging Trends in Continental Freshwater Discharge*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.



# L'océan, pompe à carbone

**Laurent Bopp\***,  
(LSCE, Gif-sur-Yvette)

**Chris Bowler\***,  
(ENS, Paris)

**Lionel Guidi**,  
(CNRS UPMC,  
Villefranche-sur-Mer)

**Éric Karsenti**,  
(EMBL)

**Colomban de Vargas**  
(CNRS UPMC, Roscoff)

\* auteurs principaux

L'océan contient 50 fois plus de carbone que l'atmosphère et il échange chaque année des quantités importantes de carbone avec cette dernière. Au cours des dernières décennies, l'océan a ralenti le rythme du changement climatique anthropique en absorbant près de 30 % des émissions anthropiques de dioxyde de carbone. Alors que cette absorption de carbone anthropique est le résultat de processus physico-chimiques, la biologie marine joue un rôle clé dans le cycle du carbone naturel en séquestrant de grandes quantités de carbone dans les eaux de l'océan profond. Des modifications de ces processus physiques, chimiques ou biologiques, pourraient conduire à des rétroactions dans le système climatique et ainsi accélérer ou ralentir le changement climatique en cours. Ces rétroactions entre climat, l'océan et ses écosystèmes ont besoin d'être mieux comprises afin de pouvoir prédire de façon plus solide l'évolution des caractéristiques de l'océan du futur, et l'évolution combinée du CO<sub>2</sub> atmosphérique et de notre climat.

## UN RÔLE MAJEUR POUR L'OCÉAN DANS L'ÉVOLUTION DU CO<sub>2</sub> ATMOSPHÉRIQUE

Le cycle du carbone implique toute une série de processus physiques, chimiques et biologiques, qui contribuent aux échanges de carbone entre plusieurs réservoirs du système Terre. Alors que le cycle global du carbone était à peu près équilibré avant les débuts de l'ère industrielle, le CO<sub>2</sub> atmosphérique a augmenté de près de 40 % au cours des derniers 200 ans, passant de moins de 0,03 % à plus de 0,04 % du réservoir atmosphérique. Cette augmentation s'explique par les émissions induites par la combustion des combustibles fossiles, par la production de ci-

ment, et par la déforestation et d'autres changements dans l'utilisation des terres. On considère aujourd'hui qu'un changement de cette rapidité est au moins dix fois plus rapide que les changements reconstruits pour les 65 derniers millions d'années au moins (Portner *et al.*, 2014; Rhein *et al.*, 2014.).

Depuis les débuts de la période industrielle, l'océan joue un rôle primordial dans l'évolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique en absorbant une part significative du CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère par les activités anthropiques. Au cours de la dernière décennie (2004-2013), l'océan mondial a absorbé 2,6 milliards de tonnes de carbone par an, ce qui représente près de 30 % des émissions anthropiques sur cette période. Depuis 1870, la quan-



tité de carbone absorbée par l'océan s'élève à 150 milliards de tonnes – également 30 % des émissions anthropiques sur cette période. En absorbant ce  $\text{CO}_2$ , l'océan contribue ainsi à ralentir le changement climatique anthropique induit par l'augmentation de ce gaz à effet de serre.

## UN CYCLE DU CARBONE OCÉANIQUE NATUREL IMPLIQUANT PHYSIQUE ET BIOLOGIE MARINE

Mais ce carbone anthropique absorbé à l'océan s'ajoute à un réservoir naturel de carbone considérable. L'océan contient près de 40 000 milliards de tonnes de carbone, principalement sous forme de carbone inorganique dissous dans l'eau de mer. Cette quantité représente 50 fois le réservoir atmosphérique. Chaque année, l'océan échange de façon naturelle près d'une centaine de milliards de tonnes de C, sous forme de  $\text{CO}_2$ , avec l'atmosphère.

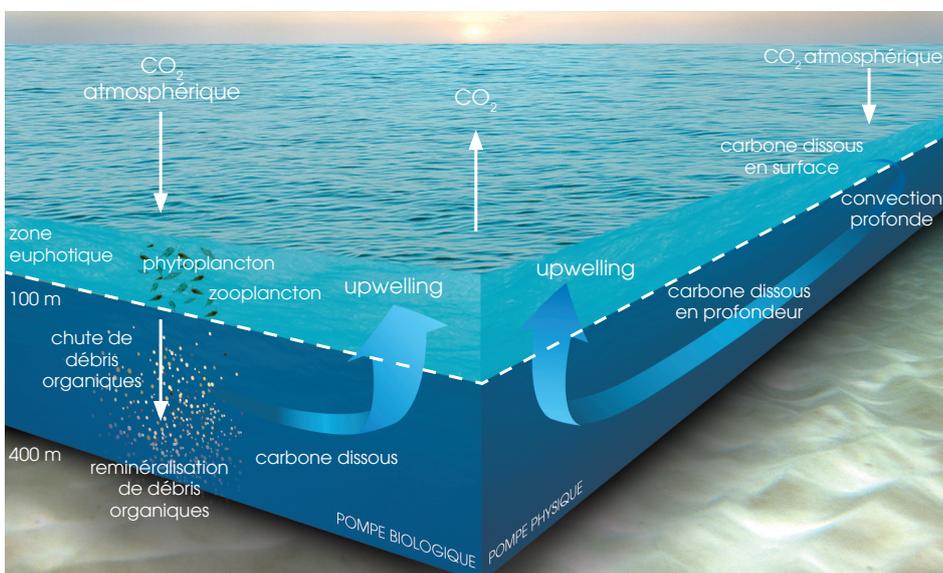
Ce carbone dans l'océan, en grande majorité sous forme d'ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), n'est pas réparti de façon homogène. Les concentrations sont plus élevées en profondeur qu'en surface et cette inégale répartition du carbone entre surface et fond exerce un contrôle sur le  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère parce que seul le carbone inorganique de la couche de surface est

au contact avec l'atmosphère et contribue aux échanges de  $\text{CO}_2$  avec l'atmosphère.

Ce gradient vertical de carbone dans l'océan s'explique à la fois par des processus physico-chimiques et des processus biologiques.

### • Processus Biologiques

Le phytoplancton océanique vit dans la couche éclairée de l'océan et utilise l'énergie du soleil pour effectuer la photosynthèse. Ces organismes utilisent les nutriments disponibles dans l'eau de mer, ainsi que carbone inorganique dissous, pour produire de la matière organique. La production de cette matière organique est appelée production primaire. Elle représente la base des chaînes trophiques dans l'océan, socle à partir duquel d'autres organismes non photosynthétiques peuvent se nourrir. Cette activité photosynthétique est donc un mécanisme efficace pour extraire le  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère et le transférer vers les organismes vivants. Étonnamment, les organismes marins qui contribuent à la production primaire ne représentent qu'une petite fraction du carbone organique (~ 3 milliards de tonnes de carbone) dans l'océan, mais ils sont capables de générer de grandes quantités de carbone organique chaque année (près de 50 milliards de tonnes par an ou 50 PgC) pour soutenir les chaînes alimentaires, car leur taux de renouvellement est très rapide, de quelques jours à plusieurs semaines.



Cycle du carbone naturel et représentation des pompes biologique et physique (Bopp *et al.* 2002).

Avant d'être séquestré en profondeur, le carbone atmosphérique fixé par les organismes photosynthétiques subit une série de transformations: le phytoplancton peut être directement consommé par le zooplancton, ou indirectement par des bactéries hétérotrophes, qui seront à leur tour mangés par les plus grands organismes. Au total, seule une fraction de la matière organique ainsi



produite quitte la couche de surface sous forme de particules (cellules mortes, détritiques, pelotes fécales...), transférant ainsi le carbone de surface vers les couches profondes de l'océan (Figure). Chaque année, près de 10 milliards de tonnes de carbone sont ainsi exportées à partir de la couche de surface et sont responsables de la plus grande partie du gradient vertical de carbone. Tous ces processus qui contribuent au rôle de la biologie marine sur le cycle du carbone dans l'océan et constituent ce que l'on appelle la pompe biologique de carbone (Figure).

Seule une toute petite fraction ( $\sim 0,2 \text{ PgCyr}^{-1}$ ) du carbone exporté par des processus biologiques atteint le fond des océans et peut être stocké dans du matériel sédimentaire pour des millénaires. (Denman *et al.*, 2007; Ciais *et al.*, 2014); ce mécanisme biologique permet de soustraire du carbone du système océan-atmosphère pour de très longues périodes de temps.

Au cours des échelles de temps géologiques, la pompe biologique de carbone a conduit à la formation de dépôts pétrolifères qui alimentent aujourd'hui notre économie. Considérant que, chaque jour, de grandes quantités de  $\text{CO}_2$ , piégées pendant des millions d'années, sont rejetées dans l'atmosphère (l'ordre de grandeur est maintenant probablement d'environ un million d'années de carbone piégé brûlé par l'humanité chaque année), il est plus aisé de comprendre la rapidité du changement climatique en cours.

- **Processus physico-chimiques**

Une deuxième série de processus, physico-chimiques cette fois, contribue aussi à cette inégale répartition du carbone sur la verticale. Le refroidissement des eaux de surface aux hautes latitudes augmente leur capacité à dissoudre du  $\text{CO}_2$  atmosphérique (principalement en augmentant la solubilité du gaz) tout en augmentant leur densité. Ces eaux plongent alors en profondeur, emportant avec elles le  $\text{CO}_2$  qui sera soustrait à tout contact avec l'atmosphère, contribuant ainsi au gradient vertical de carbone océanique. On parle dans ce cas de pompe physique ou de pompe de solubilité.

Mais même si les processus biologiques sont responsables de la majorité du gradient vertical du carbone naturel dans l'océan, ce sont des processus physico-chimiques qui expliquent le puits de carbone anthropique aujourd'hui. En effet, l'excès de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère va conduire à un flux net de carbone vers l'océan à cause du déséquilibre induit entre concentration atmosphérique et concentration océanique. Puis ce  $\text{CO}_2$  anthropique, une fois dans les eaux de surface, va être transporté par les courants marins et mélangé avec les eaux de sub-surface.

## UNE SATURATION DU PUIITS DE CARBONE OCÉANIQUE ?

Jusqu'à ce jour, et ce depuis les débuts de la période industrielle, l'océan a continué à absorber chaque une part à peu près constante du  $\text{CO}_2$  anthropique émis par l'Homme. Mais de nombreuses études, basées sur des considérations théoriques, conduites à partir d'observations *in situ*, d'expériences contrôlées en laboratoire, ou à partir de l'utilisation de modèles, suggèrent que plusieurs processus pourraient amoindrir ou ralentir ce puits de carbone naturel.

La première série de processus est liée à la chimie des carbonates (les échanges entre  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{2-}$ ) et conduit à terme à une saturation du puits océanique de carbone. En effet, la dissolution du gaz carbonique anthropique diminue le contenu océanique en ions carbonates et donc le pouvoir tampon de l'océan, ce qui augmente la proportion de  $\text{CO}_2$  vis à vis des autres espèces de carbone inorganique dissous et diminue l'efficacité du puits. Ce même phénomène conduit en parallèle à ce que l'on appelle l'acidification de l'océan et pourrait avoir des conséquences potentielles sur les écosystèmes océaniques.

La deuxième série de processus est liée à la rétroaction climat — cycle du carbone. Il s'agit de la rétroaction du changement climatique anthropique sur les différents phénomènes d'absorption du carbone. Le changement climatique se traduit par des modifications de la température de l'eau, des courants marins, de la production biologique océanique. Si ces



modifications augmentent le puits de carbone, elles freineront le changement climatique et induiront une rétroaction négative. Au contraire, dans l'hypothèse d'une diminution du puits, ces changements vont conduire à une rétroaction positive qui accélérera le phénomène.

Là encore, plusieurs processus sont en jeu. Le réchauffement des eaux par exemple réduit le puits de carbone océanique : une augmentation de 2 ou 3 °C de la température des eaux de surface diminue la solubilité du CO<sub>2</sub> de quelques pourcents, et donc la capacité de l'océan à absorber le gaz carbonique. Un autre effet pourrait encore accentuer la saturation du puits. En réponse à l'augmentation des températures, les modèles climatiques prédisent un accroissement de la stratification verticale de l'océan : autrement dit, le mélange vertical qui tend à homogénéiser les eaux profondes et superficielles diminuerait. Cette stratification limitera la pénétration du CO<sub>2</sub> anthropique vers les profondeurs...

Quant à la pompe biologique, son devenir est difficile à prédire. Une estimation de l'effet des modifications des écosystèmes marins sur le puits océanique de carbone, même qualitative, reste encore hautement spéculative. Parce que l'activité de la pompe biologique est fortement liée à la production primaire, il est important de tenir compte des effets du changement climatique sur l'activité photosynthétique. Sur les continents, comme la concentration en CO<sub>2</sub> est généralement un facteur limitant de la photosynthèse, l'augmentation du CO<sub>2</sub> anthropique tend à stimuler la croissance des plantes (effet connu comme un effet de fertilisation du dioxyde de carbone). Cela ne semble pas être le cas dans les systèmes marins en raison des concentrations élevées de carbone inorganique dissous (DIC). La photosynthèse est cependant fortement affectée par des modifications de la température de l'eau qui a considérablement augmenté au cours des 150 dernières années. En plus de la température, la lumière et la limitation par les nutriments (González-Taboada et Anadón, 2012; Portner *et al.*, 2014) sont susceptibles d'affecter l'activité photosynthétique, comme le sont l'oxygène, le pH et la salinité.

Les approches de modélisation prédisent une réduction globale de la production primaire de l'océan en réponse au changement climatique, mais avec des variations importantes en fonction de la latitude. L'un des facteurs conduisant à cette réduction est lié à l'expansion prévue des gyres oligotrophes et à la diminution des concentrations de nutriments en surface de l'océan à cause d'une intensification de la stratification océanique. Les projections climatiques indiquent par contre une augmentation de la production primaire aux hautes latitudes en raison de la fonte de la banquise.

Enfin, il faut aussi estimer quels types d'espèces planctoniques vont dominer l'écosystème en réponse à ces modifications. Car la composition du plancton peut influencer considérablement sur l'absorption du CO<sub>2</sub>. Le cas de certaines algues phytoplanctoniques, les diatomées, est particulièrement significatif. Du fait de leur taille relativement importante par rapport aux cellules du phytoplancton (de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres), ces cellules peuvent couler assez facilement et sont donc responsables d'une part importante du carbone exporté vers l'océan profond. Or, les diatomées sont particulièrement sensibles à une diminution des concentrations en sels minéraux. D'autres cellules phytoplanctoniques, abondantes dans l'océan, mais de très petit diamètre (< 10 µm), sont moins gourmandes et pourraient les remplacer. Leur taille fait qu'elles sont majoritairement recyclées dans la couche de surface, et ne participent donc que peu au stockage du carbone dans les profondeurs. Un déséquilibre du rapport diatomées/petites cellules pourrait singulièrement perturber l'intensité de la pompe biologique.

Malgré ces multiples niveaux d'incertitude, dont le plus important est la réponse du vivant au changement climatique, les différentes projections réalisées avec des modèles numériques couplant système climatique et cycle du carbone, mettent tous en évidence un amoindrissement du puits océanique sous l'effet du réchauffement actuellement en cours. Sans aller jusqu'à transformer ce puits océanique en source, cette diminution affectera l'évolution



du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et, à terme, le changement climatique lui-même. Les rétroactions climat/cycle du carbone (incluant également la réponse de la biosphère terrestre au changement climatique) pourraient être responsables d'une augmentation « supplémentaire » du CO<sub>2</sub> atmosphérique de plusieurs dizaines de ppm à l'horizon 2100!

L'évolution du puits de carbone océanique, tel que prédit par les modèles couplant climat et cycle du carbone à l'échelle globale, reste largement incertaine. Le dernier rapport du GIEC pointe un certain nombre de processus, très mal contraints, et qui explique la forte gamme d'incertitude associée à ces projections: on peut citer en premier lieu la réponse du vivant au changement climatique et les modifications de la pompe biologique, mais d'autres séries de processus liées à la représentation des petites échelles spatiales (tourbillons), à la prise en compte des zones côtières particulièrement complexes sont également mentionnées.

## UN RÔLE DANS D'AUTRES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES

Enfin, il faut souligner qu'au-delà son rôle dans le cycle du carbone et dans l'évolution du CO<sub>2</sub> atmosphérique, l'océan joue également un rôle clé dans d'autres grands cycles biogéochimiques, pouvant influencer le climat de notre planète.

Au milieu des années 1980, plusieurs scientifiques dont le Britannique James Lovelock, proposent que les écosystèmes océaniques, et en particulier le phytoplancton, soient capables de réguler le climat de notre planète en libérant un gaz soufré, le sulfure de diméthyle ou DMS. Une fois dans l'atmosphère, ce gaz s'oxyde et conduit à la formation de toutes petites particules sulfatées, qui jouent le rôle de noyau de condensation pour les nuages et contribuent donc à augmenter la couverture nuageuse. L'hypothèse proposée, que l'on appelle encore hypothèse CLAW (d'après la première lettre du nom de chacun des auteurs), stipule que l'écosystème océanique réagit à une augmentation de tem-

pérature en augmentant sa productivité, ce qui conduit à une augmentation des émissions de DMS, et donc à un refroidissement grâce à l'augmentation de couverture nuageuse. C'est une boucle de rétroaction négative, auto-régulatrice. C'est un des exemples de régulation qui ont permis à Lovelock de construire la théorie de Gaïa selon laquelle plusieurs processus auto-régulateurs, dont celui impliquant le cycle du soufre, permettent de considérer la Terre comme un organisme vivant.

Plus de 20 ans plus tard, les recherches menées ont révélé la complexité du cycle du soufre dans l'océan, mais elles n'ont pas permis de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. Nous ne savons toujours pourquoi le phytoplancton libère certains composés soufrés, précurseurs du DMS. Nous ne savons pas non plus si le changement climatique anthropique conduira à une diminution ou à une augmentation des émissions de DMS par l'océan...

## UNE MANIPULATION DE LA POMPE À CARBONE POUR COMPENSER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les activités humaines ont perturbé l'équilibre du cycle du carbone et ont brutalement contribué à la modification de la composition de l'atmosphère de la Terre, comme les bactéries, protistes et la biosphère en général ont joué un rôle dans la formation de l'atmosphère de la Terre dans le passé.

Comme d'autres événements qui ont marqué l'histoire de notre planète dans le passé, ces changements provoqués par les activités humaines affectent de manière significative le système terrestre. Notre devoir en tant qu'habitants de la planète Terre est maintenant de formuler des prévisions les plus fiables possibles des changements à venir, et de réagir de la meilleure façon possible pour limiter ces modifications et s'adapter aux modifications inévitables.

Des études ont suggéré que l'augmentation artificielle de la pompe à carbone océanique



pourrait améliorer la séquestration du carbone dans l'océan, contrebalançant ainsi le changement climatique induit par le CO<sub>2</sub>. Par exemple, la productivité primaire du phytoplancton pourrait être stimulée par l'ajout de nutriments tels que le fer dans les eaux où ce nutriment limite la productivité du phytoplancton. Il n'existe actuellement pas de consensus sur l'efficacité de ces méthodes, qui se sont limitées pour l'instant à quelques expériences de terrain. En outre, les approches de géo-ingénierie alternatives axées sur la gestion du rayonnement solaire ne sont

pas capables de résoudre le problème de l'acidification des océans.

Pour conclure, il reste essentiel de protéger la pompe à carbone océanique qui contribue à plus de la moitié du CO<sub>2</sub> séquestré chaque jour. Cela ne peut se faire en préservant les océans, leur vie marine et leurs écosystèmes planctoniques. Le bilan carbone des différentes parties du cycle du carbone doit également être mieux caractérisé par la réalisation de nouvelles recherches fondamentales dans ce domaine.

## RÉFÉRENCES

- BOPP L., LEGENDRE L. et MONFRAY P., 2002 – *La pompe à carbone va-t-elle se gripper*. *La Recherche*, 355, 48-50.
- CHARLSON R. J., LOVELOCK J. E., ANDREAEE M. O. and WARREN S. G., 1987 – *Oceanic Phytoplankton, Atmospheric Sulphur, Cloud Albedo and Climate*. *Nature*, 326, 655-661.
- CIAIS P., SABINE C., BALA G., BOPP L., BROVKIN V., CANADELL J., CHHABRA A., DEFRIES R., GALLOWAY J., HEIMANN M., JONES C., LE QUÉRÉ C., MYNENI R. B., PIAO S. and THORNTON P., 2013 – *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- DENMAN K. L., BRASSEUR G., CHIDTHAISONG A., CIAIS P., COX P. M., DICKINSON R. E., HAUGLUSTAIN D., HEINZE C., HOLLAND E., JACOB D., LOHMANN U., RAMACHANDRAN S., DA SILVA DIAS P. L., WOFSY S. C. and ZHANG X., 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, Cambridge University Press.
- GONZÁLEZ-TABOADA F. and ANADÓN R., 2012 – *Patterns of Change in Sea Surface Temperature in the North Atlantic During the Last Three Decades: Beyond Mean Trends*. *Climatic Change*, 115, 419-431.
- LE QUÉRÉ C. *et al.*, 2014 – *Global Carbon Budget*. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, 7, 521-610.
- PÖRTNER H.-O., D. KARL M., BOYD P. W., CHEUNG W. W. L., LLUCH-COTA S. E., NOJIRI Y., SCHMIDT D. N. and ZAVIALOV P.O., 2014 – *Ocean Systems*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- RHEIN M., RINTOUL S. R., AOKI S., CAMPOS E., CHAMBERS D., FEELY R. A., GULEV S., JOHNSON G. C., JOSEY S. A., KOSTIANOV A., MAURITZEN C., ROEMMICH D., TALLEY L. D. and WANG F., 2013 – *Observations: Ocean*. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.



# La hausse de la mer au xx<sup>e</sup> siècle : observation et causes

**Benoit Meyssignac,**  
(LEGOS, Toulouse)

**Gilles Reverdin**  
(LOCEAN, Paris)

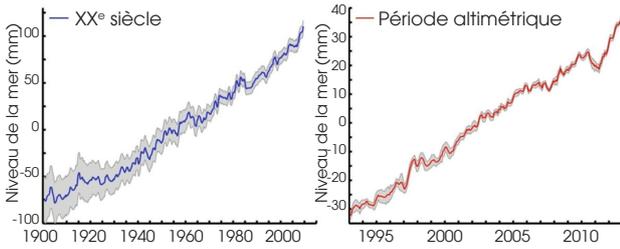
Les mesures des marégraphes, puis des satellites ont démontré que la mer est montée globalement à une vitesse moyenne de l'ordre de 1,7 mm par an depuis le début du xx<sup>e</sup> siècle, une conséquence directe du réchauffement climatique d'origine anthropique, bien que l'on constate une forte variabilité régionale. Cette hausse est principalement liée à deux phénomènes : l'augmentation de la température des océans d'où une dilatation de l'eau de mer et la fonte des glaces continentales, glaciers et calottes polaires avec un apport d'eau douce à l'océan. Dans le futur, malgré les incertitudes, les scénarios indiquent une poursuite du niveau de la mer à un rythme plus rapide qu'au xx<sup>e</sup> siècle pour atteindre entre plus 25 cm (cas le plus favorable) et plus 82 cm (cas le moins favorable) en 2100.

## LES MESURES MARÉGRAPHIQUES DU xx<sup>e</sup> SIÈCLE

L'observation directe des variations du niveau de la mer a débuté avec l'ère industrielle et l'installation systématique de marégraphes dans quelques ports de l'Europe du nord, puis progressivement dans d'autres régions du globe. Ces instruments, développés à l'origine pour mesurer les marées, nous fournissent des observations d'une valeur inestimable sur l'évolution du niveau de la mer au cours du xx<sup>e</sup> siècle. Bien que peu nombreux et mal répartis sur la planète, les séries marégraphiques historiques nous indiquent que depuis le début du xx<sup>e</sup> siècle, la mer est montée globalement à une vitesse moyenne de l'ordre de 1,7 mm par an (Figure 1, à gauche).

## L'OBSERVATION DES VARIATIONS DU NIVEAU DE LA MER DEPUIS L'ESPACE

Depuis le début des années 1990, on mesure en routine la hausse de la mer depuis l'espace, grâce aux satellites altimétriques de haute précision, tels Topex/Poseidon, Jason-1/2, ERS-1/2, Envisat, et depuis peu SARAL/AltiKa et Cryosat (Ablain *et al.*, 2014). L'observation par satellite a un avantage majeur par rapport à la marégraphie : c'est une observation quasi globale de l'ensemble du domaine océanique, avec un temps de revisite de quelques jours seulement. La Figure 1 (à droite) montre l'évolution du niveau de la mer mesuré par les satellites altimétriques entre 1993 et 2013. Sur cette période, la hausse du niveau de la mer est quasi linéaire et se fait à une vitesse de 3,2 ± 0,4 mm/an (Cazenave *et al.*, 2014). Cette hausse est deux



**Fig.1** — Évolution du niveau moyen global de la mer, estimée à partir de la reconstruction de Church and White (2011) sur le xx<sup>e</sup> siècle (à gauche) et à partir de l’altimétrie spatiale sur la période 1993-2012 (source: AVISO). Le grisé représente l’incertitude associée à chacune des courbes. Les cycles annuels et semi annuels ont été enlevés. À noter, la différence d’échelle verticale entre les deux courbes. D’après Cazenave & Le Cozannet (2014).

fois supérieure à celle enregistrée par les marégraphes au cours du xx<sup>e</sup> siècle, suggérant une accélération du niveau de la mer depuis le début des années 1990. Grâce à leur couverture complète du domaine océanique, les satellites altimétriques ont aussi révélé que la hausse du niveau de la mer n’est pas uniforme. Elle présente une forte variabilité régionale (voir Fig.2) avec des régions comme l’Ouest de l’océan Pacifique Tropical où le niveau de la mer augmente 3 fois plus vite que la moyenne globale et d’autres régions, comme le long de la côte Ouest Américaine, où il diminue à la vitesse de 1 à 2 mm/an.

## LES CAUSES DE LA HAUSSE ACTUELLE DE LA MER EN MOYENNE GLOBALE

En moyenne globale, la hausse actuelle du niveau de la mer est une conséquence directe du réchauffement climatique d’origine anthropique (Church *et al.* 2013). Elle résulte de deux causes principales:

1. L’augmentation de la température des océans et l’expansion thermique associée (lorsque la température augmente, l’eau de mer se dilate et le niveau de l’océan s’élève).
2. La fonte des glaces continentales, glaciers et calottes polaires (les apports d’eau douce vers la mer causés par la fonte des glaces

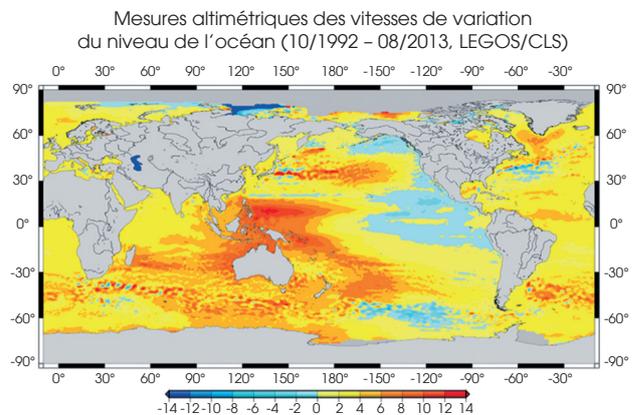
continentales font monter son niveau). En plus de ces processus, on trouve aussi une petite contribution qui provient des échanges d’eau liquide avec les terres émergées (0,38 mm/an sur la période altimétrique de 1993 à 2010).

### • Expansion thermique

Grâce à des mesures de température de la mer collectées à partir de sondes jetées à l’arrière des navires marchands au cours des 5 dernières décennies, et depuis 10 ans à partir des flotteurs automatiques du système international Argo, les océanographes ont observé que l’océan se réchauffe. En se réchauffant l’eau de mer se dilate et le niveau de la mer augmente. On estime que sur la période altimétrique (*i.e.* depuis 1993 et le début des observations satellites), cette contribution explique 30 % de la hausse du niveau de la mer global (1.1 +/- 0,3 mm/an entre 1993 et 2010; Church *et al.*, 2013).

### • Fonte des glaciers

Les glaciers correspondent à l’ensemble des masses de glaces continentales, exception faite des deux vastes calottes polaires antarctique et groenlandaise. Ils sont plus de 200 000 et couvrent environ 730 000 km<sup>2</sup> des terres émergées. Depuis la fin du petit âge de glace vers 1850, on observe (par mesures *in situ* du bilan de masse glaciaire et altimétrie ou gravimétrie spatiale pour les années récentes) un recul des glaciers dans



**Fig.2** — Carte globale de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2013) d’après les mesures altimétriques de Topex/Poseidon, Jason-1/2, ERS-1/2, et Envisat (source: LEGOS).

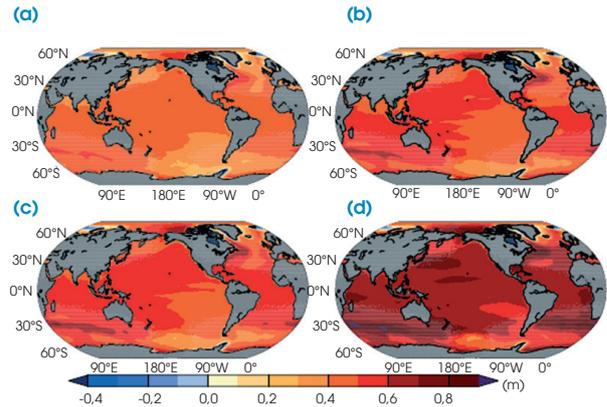
presque toutes les chaînes de montagnes. Ce phénomène s'explique en partie par leur réponse retardée au réchauffement naturel de la planète après le petit âge glaciaire. En revanche, l'accélération des pertes de masse des glaciers observée depuis le milieu des années 1980 est attribuée au réchauffement récent d'origine anthropique (Marzeion *et al.*, 2014). Sur la période altimétrique, de 1993 à 2010, on estime que les glaciers ont contribué pour 0,9 mm/an à la hausse de la mer (Church *et al.*, 2013).

- **Perte de masse des calottes polaires**

La perte de masse des calottes polaires est observée et estimée essentiellement par 3 techniques : l'altimétrie Radar ou Laser (qui mesurent l'évolution de l'altitude des calottes depuis 1991), La gravimétrie spatiale (qui fournit directement les variations de masse de la calotte au cours du temps) et la méthode des flux (qui consiste à calculer la différence entre l'accumulation de neige en surface estimée le plus souvent avec des modèles de climat et les flux de glace « sortant » vers l'océan au niveau de la ligne d'échouage des calottes) (Rignot *et al.*, 2014). La synthèse de ces observations pour les 20 dernières années (Shepherd *et al.*, 2012) indique une perte de masse très marquée dans les régions côtières du Groenland et en Antarctique de l'Ouest. Cumulées, ces pertes représentent une hausse du niveau de la mer de 0,6 mm/an sur la période 1993-2010 (Church *et al.*, 2013).

## LES CAUSES DE LA VARIABILITÉ RÉGIONALE DU NIVEAU DE LA MER

En régional, c'est le stockage de la chaleur dans l'océan et l'expansion thermique associée qui génère l'essentiel de la variabilité régionale du niveau de la mer. La chaleur de l'océan est redistribuée de manière inhomogène par la circulation océanique (Stammer *et al.*, 2013) en réponse aux forçages (en moment cinétique, chaleur et en eau douce) de l'atmosphère. Selon les régions, divers processus sont à l'œuvre. Par exemple dans le Pacifique tropical ouest, l'intensification des alizés observée depuis une vingtaine d'années provoque un approfondissement de la thermocline dans la partie ouest



**Fig.3** — Moyenne d'ensemble (21 modèles CMIP5) du changement du niveau des mers relatif pour les scénarios RCP2.6 (a), 4.5 (b), 6.0 (c) et 8.5 (d). L'impact de l'expansion thermique des océans, de la masse des glaces continentales, des stocks continentaux d'eau liquide, et du rebond post-glaciaire sont pris en compte (adapté de Church *et al.*, 2013).

du bassin, induisant une couche d'eau chaude superficielle plus épaisse et donc une hausse de la mer plus marquée (Timmermann *et al.*, 2010; Stammer *et al.* 2013).

## ÉLÉVATION DE LA MER DANS LE FUTUR

En réponse aux émissions passées et futures de gaz à effet de serre le réchauffement climatique va continuer dans le futur. En conséquence, La hausse du niveau marin va elle aussi se poursuivre, principalement en raison de la fonte des glaces continentales et de l'expansion thermique des océans. Tout l'enjeu est d'estimer l'amplitude de cette hausse, les disparités régionales, et les incertitudes associées. Les incertitudes proviennent de 2 sources majeurs : d'une part de la mauvaise connaissance de certains processus climatiques qui affectent les variations du niveau de la mer (e.g. c'est le cas pour le processus d'écoulement de la glace des calottes polaires vers l'océan) et d'autre part de l'incertitude sur les scénarios futurs d'émission de gaz à effet de serre d'origine anthropique. En effet différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (exprimés en terme de forçage radiatif : RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5, IPCC 2013) et de réponse du système climatique (exprimés en terme d'augmentation de la tempé-



rature globale de la Terre) sont possibles pour les décennies à venir (IPCC 2013). Chacun de ces scénarios indique une augmentation du niveau de la mer entre 1986-2000 et 2080-2100, car ils indiquent tous une augmentation du réchauffement de l'océan et de la fonte des glaces continentales. L'augmentation s'élèverait entre 25 cm (cas le plus favorable des scénarios RCP2.6) et 82 cm (cas le moins favorable des scénarios RCP8.5). Dans tous les cas, la montée du niveau de la mer simulée d'ici à 2100 serait donc plus rapide qu'au cours du xx<sup>e</sup> siècle. À l'horizon 2100, le rythme de montée du niveau de la mer atteindrait 8 à 16 mm/an pour le RCP 8.5, autant que durant la dernière déglaciation.

De plus de la même manière que les variations actuelles du niveau de la mer actuel ne sont pas uniformes, on s'attend à ce que les variations du niveau de la mer pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle présentent d'importantes disparités régionales (Figure 3, Yin *et al.* 2010). Par exemple, en considérant le scénario RCP8.5, il apparaît que le niveau de la mer pourrait baisser légèrement dans certaines régions de l'Arctique, tandis qu'il pourrait augmenter de plus de 70 cm le long de la côte est des États-Unis. Il est essentiel de prendre en compte ces disparités et de les modéliser correctement si l'on veut anticiper la hausse future du niveau de la mer à la côte. C'est un sujet de recherche très actif actuellement.

## RÉFÉRENCES

- ABLAIN M. *et al.*, 2014 – *Improved Sea Level Record over the Satellite Altimetry Era (1993-2010). From The Climate Change Initiative Project.* In revision, Ocean Sciences.
- CAZENAVE A. and LE COZANNET G., 2014 – *Sea Level Rise and Coastal Impacts.* Earth's Future, vol. 2, issue 2.
- CAZENAVE A., DIENG H., MEYSSIGNAC B., VON SCHUCKMANN K., DECHARME B. and BERTHIER E., 2014 – *The Rate of Sea Level Rise.* Nature Climate Change, vol. 4.
- CHURCH J. A. and WHITE N. J., 2011 – *Sea-Level Rise from the Late 19<sup>th</sup> to the Early 21<sup>st</sup> Century.* Surveys in Geophysics, 32 (4-5), 585-602.
- CHURCH J. A., CLARK P. U., CAZENAVE A., GREGORY J. M., JEVREJEVA S., LEVERMANN A., M. MERRIFIELD A., MILNE G. A., NEREM R. S., NUNN P. D., PAYNE A. J., PFEFFER W. T., STAMMER D. and UNNIKRISHNAN A. S., 2013 – *Sea Level Change.* In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- IPCC 5<sup>th</sup> Assessment Report, 2013 – *Climate Change 2013: the Physical Science Basis.* Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- MARZEION B., COGLEY J. G., RICHTER K. and PARKES D., 2014 – *Attribution of Global Glacier Mass Loss to Anthropogenic and Natural Causes.* Science, 345 (6199), 919 – 921.
- MEYSSIGNAC B., SALAS Y MELIA D., BECKER M., LLOVEL W. and CAZENAVE A., 2012 – *Tropical Pacific Spatial Trend Patterns in Observed Sea Level: Internal Variability and/or Anthropogenic Signature ?* Climate of the Past, 8 (2), 787-802.
- RIGNOT E., MOUGINOT J., MORLIGHEM M., SEROUSSI H. and SCHEUCHL B., 2014 – *Widespread, Rapid Grounding Line Retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler Glaciers, West Antarctica, from 1992 To 2011.* Geophys. Res. Lett., 41 (10), 3502 – 3509.
- SHEPHERD A. *et al.*, 2012 – *À Reconciled Estimate of Ice-Sheet Mass Balance.* Science, 338 (6111), 1183 – 1189.
- STAMMER D., CAZENAVE A., PONTE R. M. and TAMISIEA M. E., 2013 – *Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes.* Annual Review of Marine Science, vol. 5.
- TIMMERMANN A., MCGREGOR S. and JIN F.-F., 2010 – *Wind Effects on Past and Future Regional Sea Level Trends in the Southern Indo-Pacific.* Journal of Climate, 23 (16).
- YIN J., GRIFFIES S. M. and STOUFFER R. J., 2010 – *Spatial Variability of Sea Level Rise in Twenty-First Century Projections.* Journal of Climate, 23 (17), 4585-4607.



# Acidification des océans

Jean-Pierre Gattuso  
(CNRS UPMC,  
Villefranche-sur-Mer)

Chaque jour, les océans absorbent un quart du  $\text{CO}_2$  produit par l'homme d'où une modification chimique de l'eau de mer qui se traduit par une acidification des océans. La dissolution du  $\text{CO}_2$  dans l'eau de mer entraîne une diminution du pH (plus le pH est faible, plus l'acidité est importante) et de la quantité d'ions carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) qui sont l'une des briques nécessaires aux plantes et animaux marins pour fabriquer leurs squelette, coquilles et autres structures calcaires. L'acidité des océans a augmenté de 30 % en 250 ans et ce phénomène continu à s'amplifier. Ses effets et son interaction avec d'autres modifications environnementales restent mal connus. Elle menace directement des espèces comme les huîtres et les moules consommés par l'homme et aura aussi un impact sur les chaînes alimentaires marines.

## ACIDIFICATION DES OCÉANS

Chaque jour, nos océans absorbent un quart du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) produit par l'homme. Le résultat ? Une *acidification des océans* – qui n'est pas sans conséquences pour certaines plantes, animaux et écosystèmes marins.

## QU'EST-CE QUE L'ACIDIFICATION DES OCÉANS ?

La plupart d'entre nous ont entendu parler du changement climatique et du réchauffement de la planète, dus à l'effet de serre. On sait aussi que ce sont les activités de l'homme, et notamment nos rejets de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) provenant par exemple de nos voitures et industries, qui sont en cause. Mais l'*acidification des océans* reste méconnue. Ce n'est pas très surprenant car cela ne fait que quelques années que son ampleur et ses conséquences ont été découvertes. Pourtant, là aussi, c'est le  $\text{CO}_2$  le responsable. En fait, l'acidification des océans est parfois appelée « l'autre problème du  $\text{CO}_2$  ».

## LA CHIMIE

La totalité du  $\text{CO}_2$  que nous produisons tous les jours ne reste pas dans l'atmosphère. Environ un quart du  $\text{CO}_2$  émis est absorbé par nos océans. Sans les océans, la quantité de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère, et donc le réchauffement, seraient encore plus importants. Nous avons donc la chance d'avoir des mers et des océans ! Les chercheurs ont longtemps pensé que cette absorption du  $\text{CO}_2$  serait sans conséquence importante pour les océans et pour les organismes qui y vivent. Mais ils se sont rendu compte, il y a une quinzaine d'années, que la dissolution du  $\text{CO}_2$  dans l'eau de mer entraîne des changements chimiques : une diminution du pH (mesure de l'acidité d'un liquide) et de la quantité d'ions carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) qui sont l'une des briques nécessaires aux plantes et animaux marins pour fabriquer leurs squelette, coquilles et autres structures calcaires.

## L'ACIDITÉ ET L'ÉCHELLE DE pH

Vous connaissez certainement déjà des aliments acides, par exemple le citron ou le vinaigre. Il se trouve que le  $\text{CO}_2$  est un gaz acide.



Il est présent dans les boissons gazeuses: les petites bulles dans le soda sont des bulles de  $\text{CO}_2$ . Lorsque le  $\text{CO}_2$  est absorbé dans l'eau de mer, il se dissout et provoque une acidification. Attention, cela ne va pas dire que les océans deviendront acides, mais la chimie des océans change progressivement vers une acidité plus élevée. L'acidité d'un liquide est déterminée par sa concentration en ions  $\text{H}^+$  (protons). Il n'est pas très pratique de parler de la concentration en protons car les valeurs sont très faibles. Pour simplifier, on utilise l'échelle de pH, qui va de 0 à 14. Plus le pH est faible, plus l'acidité du liquide est importante. On dit qu'un liquide à pH 7 est *neutre*, celui avec un pH inférieur à 7 *acide*, et celui avec un pH supérieur *basique*. Cette échelle de mesure est un peu particulière, comme l'échelle de Richter utilisée pour mesurer les tremblements de terre: un liquide de pH 6 a une acidité 10 fois plus élevée qu'un liquide de pH 7, 100 fois plus élevée qu'un liquide de pH 8 et 1 000 fois plus élevée qu'un liquide de pH 9.

## LE NOM

Pourquoi ce phénomène s'appelle-t-il « acidification des océans » puisque les océans ne deviendront jamais acides ( $\text{pH} < 7$ ) ? L'acidification fait référence à un processus: la diminution du pH (augmentation des ions  $\text{H}^+$  et de l'acidité). Le mot « acidification » fait référence à l'abaissement du pH de n'importe quel point de départ vers tout point final sur l'échelle de pH. On peut comparer cette terminologie avec celle que l'on utilise pour la température: si la température de l'air passe de  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  à  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ , il fait toujours froid, mais nous parlons de « réchauffement ».

## UN PEU D'HISTOIRE

L'acidité des océans a augmenté de 30 % en 250 ans, soit depuis le début du développement industriel (baisse de pH de 8,2 à 8,1). Des simulations ont montré que, au rythme des émissions actuelles, l'acidité des eaux de surface de l'océan pourrait tripler d'ici la fin du siècle. Cette absorption du  $\text{CO}_2$  se produit à une vitesse 100 fois plus rapide que ce qui s'est produit naturellement au cours des 300 derniers millions d'années.

## IMPACTS SUR LES ORGANISMES MARINS

L'absorption de  $\text{CO}_2$  par l'eau de mer, cela entraîne donc une augmentation de protons (ions  $\text{H}^+$ ) mais aussi la diminution de certaines molécules, les ions carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), nécessaires à de nombreux organismes marins pour fabriquer leur squelette ou coquille calcaire (coraux, moules, huîtres...). La plupart des ces plantes et animaux calcaires auront donc de plus en plus mal à fabriquer ces structures calcaires. Leurs squelettes et coquilles sont aussi menacés de dissolution. En effet, au-dessus d'un certain seuil d'acidité, l'eau de mer devient corrosive vis-à-vis du calcaire, la matière dont les squelettes et coquilles sont fabriqués.

Les chercheurs ont étudié, en laboratoire, la fabrication de ces structures calcaires chez certains organismes. Les organismes ont été soumis à des conditions d'acidification prévues pour le futur. Des effets néfastes ont été constatés chez certaines espèces, par exemple chez les ptéropodes et les algues calcaires. D'autres organismes peuvent bénéficier de l'acidification. Par exemple, certaines plantes ont une photosynthèse plus élevée lorsque le  $\text{CO}_2$  est plus abondant.

## QUEL POURRAIT ÊTRE L'IMPACT DE L'ACIDIFICATION DES OCÉANS SUR L'HOMME ?

L'acidification des océans peut avoir des effets directs sur les organismes que nous consommons, par exemple les moules et les huîtres, qui fabriquent des coquilles calcaires. Des effets négatifs sur le zooplancton, comme ceux observés sur les ptéropodes, pourraient avoir des conséquences pour l'homme. Dans l'océan, tout est connecté. Beaucoup d'organismes dépendent, par exemple, du plancton ou des coraux comme source de nourriture ou d'habitat. Ainsi, l'acidification pourrait avoir des conséquences sur les réseaux alimentaires et la biodiversité de certains écosystèmes. Par exemple, le petit ptéropode est mangé par le saumon dans



le Pacifique nord et l'océan Arctique. Or, le saumon du Pacifique représente une ressource très importante et qui emploie un nombre très significatif de personnes.

## QUE PEUT-ON FAIRE POUR LIMITER L'ACIDIFICATION DES OCÉANS ?

La chimie de l'eau de mer restera altérée pendant des centaines d'années, même si l'on arrête d'émettre du CO<sub>2</sub>. Il est cependant parfaitement possible de limiter la progression de l'acidification des océans et donc de limiter ses impacts. Des techniques de géo-ingénierie plus ou moins réalistes ou désirables ont été proposées pour limiter l'acidification (par exemple

l'ajout de composés basiques dans les océans pour contrer l'acidification et augmenter le pH). Cependant la seule solution éprouvée, efficace et sans aucun risque est de s'attaquer à la racine du problème, c'est-à-dire à l'augmentation du CO<sub>2</sub>. La réduction de son rejet peut se faire à plusieurs niveaux, notamment au travers de discussions entre politiciens aux échelles nationale et internationale, visant à utiliser des énergies renouvelables plutôt que les combustibles fossiles. Mais chacun d'entre nous peut contribuer. Nous pouvons penser à limiter nos émissions, par exemple en prenant le train plutôt que la voiture et en économisant de l'électricité, et on peut parler de ce problème autour de nous et ainsi apprendre ce qu'il faut faire à nos proches et nos amis.

## POUR EN SAVOIR PLUS

- Laboratoire virtuel – [http://i2i.stanford.edu/AcidOcean/AcidOcean\\_Fr.htm](http://i2i.stanford.edu/AcidOcean/AcidOcean_Fr.htm)
- Animation sur l'acidification en français – [www.youtube.com/watch?v=KqtxGZKItS8](http://www.youtube.com/watch?v=KqtxGZKItS8)
- Animation projet BNP Paribas eFOCE – [www.youtube.com/watch?v=QhgQ4unMVUM](http://www.youtube.com/watch?v=QhgQ4unMVUM)
- Animation « Hermie the hermit crab » – [www.youtube.com/watch?v=RnqJMIh5yM](http://www.youtube.com/watch?v=RnqJMIh5yM) Great Barrier Reef Marine Park Authority
- Brochures en français – [www.iaea.org/ocean-acidification/page.php?page=2198](http://www.iaea.org/ocean-acidification/page.php?page=2198)
- Résumé à l'attention des décideurs – [www.igbp.net/publications/summariesforpolicymakers/summariesforpolicymakers/oceanacidificationsummaryforpolicymakers2013.5.30566fc6142425d6c9111f4.html](http://www.igbp.net/publications/summariesforpolicymakers/summariesforpolicymakers/oceanacidificationsummaryforpolicymakers2013.5.30566fc6142425d6c9111f4.html)



# Les grands fonds océaniques : quels enjeux climatiques ?

Nadine Le Bris  
(LECOB,  
Banyuls-sur-Mer)

L'océan profond (200 m sous la surface jusqu'à 11 000 m) représente plus de 98 % des eaux marines en volume. L'image d'un environnement stable et homogène sur de vastes espaces, biologiquement peu actif, ne reflète en fait ni la diversité des écosystèmes profonds ni leur sensibilité aux changements climatiques. Même sur les plaines abyssales, des variations d'abondance de certaines espèces ont été attribuées aux modifications de la productivité photosynthétique à la surface de l'océan. De plus, de nombreux « hot spots », de biodiversité et de productivité, ainsi que leurs espèces fondatrices comme les coraux profonds pourraient se révéler particulièrement vulnérables aux changements déjà observables dans les grands fonds, comme le réchauffement local ou régional des eaux profondes, leur acidification et leur désoxygénation ainsi qu'aux modifications de la circulation des masses d'eau. Cette vulnérabilité questionne notre capacité à anticiper les conséquences des changements climatiques sur des écosystèmes mal connus et les services qu'ils assurent.

## DES ÉCOSYSTÈMES DYNAMIQUES DANS UN ENVIRONNEMENT CONTRASTÉ

Lorsqu'il s'agit de climat, l'océan profond est d'abord perçu comme un vaste réservoir d'eau salée qui permet la distribution de la chaleur à l'échelle planétaire, via la circulation thermohaline. Le piégeage du CO<sub>2</sub> atmosphérique libéré par les activités humaines, et de l'excès de chaleur qu'il produit, s'opère sur des échelles séculaires au cours desquelles les eaux après avoir plongé vers les profondeurs transitent sur le fond des bassins océaniques avant de migrer à nouveau vers la surface.

On peut considérer que l'océan profond commence à environ 200 m sous la surface, là où il n'y a plus de lumière solaire ni de variations saisonnières de température, et s'étend jusqu'au plancher océanique dont la profondeur maxi-

mal atteint 11 000 m. Cet environnement représente plus de 98 % des eaux marines en volume. Il est décrit comme stable et homogène sur de vastes espaces, isolé des continents et l'atmosphère, et dont les propriétés chimiques évoluent très lentement au fur et à mesure que la matière organique est consommée par les micro-organismes (oxygène, nitrate, pH, CO<sub>2</sub>).

À cette vision à grande échelle de l'océan correspond celle de grands fonds biologiquement peu actifs, peuplés d'espèces aux métabolismes lents, adaptés à un environnement obscur, froid et pauvre en ressources nutritives ainsi qu'aux fortes pressions. Considéré comme uniforme et quasi-désertique, ces régions océaniques seraient peu affectées par les changements climatiques en cours, ou seulement à très long terme. Cependant, cette image ne s'accorde pas avec les connaissances que nous avons aujourd'hui des écosystèmes profonds. De plus en plus d'études montrent qu'elle masque, en réa-



lité, l'essentiel des interactions des écosystèmes profonds avec le système climatique. Même les plaines abyssales qui ne sont alimentés que par de faibles résidus de cellules planctoniques et autres débris organiques, connaissent des variations saisonnières. Des variations d'abondance de certaines espèces ont entre autres été observées, montrant une dynamique inattendue attribuée aux changements dans la productivité photosynthétique à la surface de l'océan selon les années.

Ces vastes espaces sédimentaires occupent 75 % des fonds océaniques, mais il n'est plus possible de négliger d'autres types d'environnements profonds largement aussi importants sur le plan écologique ou sociétal. Le fond des océans possède en effet un relief aussi accidenté que celui des continents (sur 1 100 m comparé aux 8 500 m de l'Everest) auquel s'affrontent les courants marins, et qui abrite une mosaïque d'écosystèmes, eux-mêmes formés d'habitats fragmentés (Ramires-Llodra *et al.* 2010). Les nouvelles techniques d'imagerie satellitaires permettent une vision globale de leur distribution et de leur diversité. Ce relief crée des « grands biomes » équivalents à ceux que dessinent les climats terrestres (toundra, savane, etc.) auxquels se sont adaptées les espèces. Les fonds océaniques présentent eux-aussi des « hot spots », points-chaud de biodiversité et de productivité, dont le fonctionnement et les services associés pourraient se révéler particulièrement vulnérables aux effets climatiques et à l'acidification de l'océan.

À titre exemple, les monts sous-marins qui s'élèvent de plusieurs centaines à milliers de mètres au dessus des plaines abyssales, favorisent les échanges verticaux de composés chimiques nutritifs vers la surface de l'océan, boostant l'activité photosynthétique et toute la chaîne trophique (Morato *et al.* 2010). Leurs flancs abritent une grande diversité de coraux profonds (aussi appelés « coraux d'eaux froides » car on les trouve aussi à plus faible profondeur aux hautes latitudes) et de gorgones qui peuvent former des canopées voire même de véritables récifs. Ces espèces protégées au niveau international jouent ainsi un rôle de re-

fuge et nurserie pour de nombreuses espèces de poissons, crustacés, et invertébrés (Roberts *et al.* 2006). Les 'services rendus' identifiés pour ces écosystèmes sont largement liés aux ressources des pêcheries, artisanales ou industrielles, mais il est clair que ce patrimoine recèle des richesses encore largement inconnues, dont celles de la biodiversité.

Sur les marges continentales, les canyons sous-marins qui entaillent le plateau continental jouent un rôle similaire lorsqu'ils canalisent les remontées d'eaux profondes (De Leo *et al.* 2010). Ces vallées profondes peuvent aussi, à l'inverse, accélérer les transferts vers les eaux profondes de matière issue du plateau continental ou même des continents.

À cela il faut ajouter les écosystèmes qui exploitent l'énergie accumulée au cœur du plancher océanique, sous forme de chaleur magmatique ou d'hydrocarbures. Les écosystèmes des sources hydrothermales et des « sources de méthane » ont la particularité de produire localement de la matière organique à partir du CO<sub>2</sub> ou du méthane, grâce à des micro-organismes chimiosynthétiques. Limités aux zones d'échange entre lithosphère et hydrosphère, ils abritent des communautés aussi luxuriantes que les communautés marines photosynthétiques les plus productives. Leur influence dans les grands processus océaniques et en particulier le cycle du carbone restent à quantifier, notamment pour le méthane puissant gaz à effet de serre dont une fraction y est piégée sous forme de carbonates. Pas plus que leur vulnérabilité n'est bien évaluée, alors que leur valeur patrimoniale sur le plan scientifique (évolution de la vie) autant que des innovations génétiques (bio-inspiration) est déjà largement démontrée.

## PROPRIÉTÉS DES EAUX PROFONDES : QUELS IMPACTS DIRECTS SUR LES ÉCOSYSTÈMES ?

La température des masses d'eau qui alimentent certains bassins profonds a augmenté significativement dans les dernières décen-



nies. Par exemple, sur le site de l'observatoire Hausgarten à la jonction des océans Arctique et Atlantique, une augmentation moyenne de 0,1 °C a été observée entre 2000 et 2008 à 2500 m (Soltwedel *et al.*, 2005). En Méditerranée orientale une augmentation de 0,2 °C a été observée entre 1995 et 1999. La méconnaissance des fluctuations naturelles dans lesquelles s'inscrivent ces variations limite cependant l'appréciation des impacts possibles. En Méditerranée, le réchauffement observé faisait suite à une diminution de 0,4 °C dans les 4 années précédentes. Ces observations révèlent la possibilité d'un réchauffement progressif des eaux profondes qui pourrait impacter les espèces d'autant plus sensibles qu'elles sont proches de leur seuil de tolérance; notamment dans les régions polaires où les températures atteignent -1 °C à 1 000 m ou encore la Méditerranée dont la température ne descend pas en dessous de 12 °C.

L'acidification de l'océan, l'autre problème du CO<sub>2</sub>, est d'autant plus critique que le pH des eaux profondes est déjà faible du fait du CO<sub>2</sub> produit par la dégradation de la matière organique. Les conditions corrosives anticipées vis-à-vis de l'aragonite pour de larges régions océaniques profondes seront défavorables à la formation des squelettes des coraux froids, même si de récentes expériences *ex situ* montrent que leur sensibilité à l'acidification est complexe. À l'instar des coraux tropicaux, les écosystèmes dont ils sont les « ingénieurs » pourraient subir des dégradations majeures, qui resteront difficiles à anticiper car largement invisibles.

## IMPACTS INDIRECTS, COMBINÉS AU CYCLE DU CARBONE ET EFFETS DE SYNERGIE

La pompe biologique qui permet le transfert du carbone vers les grandes profondeurs est aussi la principale source nutritive des communautés abyssales. Les changements de la productivité photosynthétique de surface et de la diversité de composition du phytoplancton sont susceptibles d'affecter ce transfert. La diminution relative des diatomées qui favorisent par effet de

basalte la sédimentation pourrait notamment réduire les apports nutritifs sur les fonds. La diminution de densité de la faune de grande taille (holoturies, échinodermes...) sur le site Arctique Hausgarten, ou encore les tendances à long terme sur le site PAP dans la plaine abyssale Porcupine en Atlantique suggèrent que ces phénomènes sont déjà à l'œuvre (Glover *et al.* 2010). En Arctique et Antarctique, ce phénomène est amplifié par la fonte des glaces (banquise ou calotte glaciaire) et influencerait significativement les écosystèmes profonds (Boetius *et al.* 2012).

D'autres effets indirects peuvent résulter de la diminution de la teneur en oxygène, liée non seulement à l'augmentation de la productivité de surface mais aussi à la réduction de la ventilation des masses d'eau profondes. Par exemple, bassin Caraïbéen profond est ventilé par le passage d'eaux Atlantique froides par un seuil à 1850 m de profondeur dont le débit semble diminuer depuis les années 1970. De même les eaux au large du Groënland tendent à devenir moins oxygénées, en même temps qu'elles sont moins froides et plus salées reflétant une ventilation moins efficace (Soltwedel *et al.*; 2005). Les effets d'une réduction faible mais chronique de l'oxygène sur la diversité biologique sont insuffisamment connus. Dans certains cas, des eaux très faiblement oxygénées sont formées conduisant à une réduction majeure de l'habitat pour de nombreuses espèces de poisson pélagiques (marlin, thon) (Stramma *et al.* 2010). Certaines marges continentales ou mers semi-fermées comme la Mer Noire ont des eaux profondes qualifiées de zones mortes (dead zones) d'où sont exclus tous les organismes marins aérobies (et en particulier toute la faune).

## ÉVÉNEMENTS INTERMITTENTS SOUS INFLUENCE ATMOSPHÉRIQUE

L'influence du climat sur les écosystèmes profonds s'exerce aussi au travers de phénomènes intermittents qui affectent la circulation des masses d'eau à échelle locale et régionale. L'un des exemples les mieux documentés concerne le phénomène de « cascading ». Ces « cas-



« cades » sont formées par les eaux de surface qui lorsqu'elles se refroidissent et s'enrichissent en sel deviennent plus denses que les eaux profondes, et finissent par « couler » vers les profondeurs en entraînant une couche superficielle des sédiments. Ce phénomène se produit de manière irrégulière et dure quelques semaines. Il a été décrit surtout en Arctique où il est lié à la formation de la banquise et en Méditerranée où ces eaux froides et denses sont formées en hiver sous l'effet du vent. Ce sont les événements intenses qui peuvent affecter significativement les écosystèmes en entraînant des quantités importantes de matière organique vers les bassins profonds (Canals *et al.* 2006).

Plus que les changements à long terme de la circulation océanique, les modifications de l'intensité et de la fréquence de ces événements peuvent affecter le fonctionnement et la stabilité des écosystèmes profonds. Les cycles de perturbation-recolonisation sous l'effet de ces cascades ou d'autres événements extrêmes comme les tempêtes (Puscheddu *et al.* 2013, Sanchez-Vidal 2012) commencent juste à être décrits.

## LES SÉDIMENTS PROFONDS : RÉSERVOIRS OU SOURCE DE GES ?

Les marges continentales constituent le plus important réservoir de carbone. Les interfaces continent-océan sont parmi les plus productives et l'essentiel du carbone formé y est rapidement enfoui dans les sédiments. Les écosystèmes benthiques y jouent un rôle majeur dans ce piégeage (Levin and Sibuet 2012).

Le devenir du carbone fossile enfoui sous forme d'hydrocarbures et plus particulièrement de méthane (hydrates et gaz) reste l'une des inconnues majeures. La dissociation de ces hydrates sous l'effet du réchauffement qui pourraient aggraver considérablement la concentration des GES dans l'atmosphère lors que ce gaz est émis massivement (train de bulles). Le méthane dissous est lui totalement consommé par des micro-organismes dans l'eau et les sédiments. La dissociation des hydrates exerce également

des effets en cascade sur les écosystèmes associés, par perturbation physique du sédiment (éruption de volcans de boue), limitant l'efficacité de ce filtre biologique.

## UNE VISION GLOBALE PLUS DÉTAILLÉE MAIS PEU D'OBSERVATIONS À LONG TERME

Compte tenu de la difficulté d'accéder à un milieu aussi vaste que fragmenté et où les contraintes sont extrêmes pour les instruments comme pour les scientifiques qui les déploient à partir de navires, les données d'observations aux échelles pertinentes au regard du climat sont rares. La situation change cependant rapidement grâce aux technologies actuelles. Les séries de données multi-annuelles qui documentent les paramètres physiques des masses d'eau commencent à être disponibles grâce aux observatoires profonds. Pour autant les observations aux échelles représentatives des impacts climatiques (10-50 ans) sont inexistantes.

Par ailleurs, les satellites d'observation permettent l'inventaire de plus en plus précis et détaillé de la « points-chauds » et les flottilles de flotteurs dérivants, ont apporté une vision large échelle de la dynamique de circulation à échelle régionale et de sa variabilité. Le rôle du relief et de ses hétérogénéités dans les échanges de carbone, et le recyclage des éléments essentiels au plancton (azote, phosphore, fer notamment) commence à être identifié comme majeur sur des échelles locales, même si l'importance de ce relief dans les bilans globaux reste encore à établir.

La connaissance de la variabilité écologique en milieu profond s'appuie cependant sur des séries de données en très petit nombre, issues de campagnes d'échantillonnage. Les avancées technologiques de dernières décennies (ROV, AUV et imagerie HD) ont rendu plus accessibles ces milieux, et favorisent leur exploration. Au maximum, quelques dizaines de sites profonds ont fait l'objet de suivis multi-annuels permettant une première analyse des causes de leur variabilité (Glover *et al.* 2010).



## NÉCESSITÉ D'ÉTUDES EXPÉRIMENTALES INTÉGRÉES

Pour apprécier l'influence de ces perturbations il est indispensable de mettre en place des sites d'observation et d'expérimentation à long terme permettant d'étudier les effets synergiques entre ces différents phénomènes sur la diversité biologique et fonctionnelle des habitats profonds (Mora *et al.* 2013). Il est possible d'envisager sur cette base des modèles mécanistes mais cela nécessite de prendre en compte ces influences multiples sur les organismes et sur la réponse des communautés au changement. Ce dernier point est sans aucun doute le plus difficile à appréhender.

La sensibilité au changement climatique des écosystèmes profonds dépend en effet largement de l'adaptation (plasticité) des espèces et notamment de celles qui sont considérées comme fondatrices ou ingénieures de l'écosystème. Les coraux profonds par exemple jouent un rôle majeur en formant des structures de type récif qui forment l'habitat de nombreuses autres espèces. La sensibilité de ces espèces aux modifications de leur environnement est complexe et commence à peine à être étudiée *in situ*. Les capacités d'acclimatation et d'adaptation

peuvent être variables d'une région à l'autre (comme en Mer Rouge où des adaptations métaboliques permettent de se développer à 20 °C, alors qu'ailleurs la limite est estimée à 13 °C, Roder *et al.* 2013).

La connectivité entre hotspots profonds, isolés dans l'espace mais reliés entre eux par la circulation océanique, reste une énigme pour la plupart de leurs espèces endémiques. Là encore le changement climatique apparaît susceptible de jouer un rôle sans qu'on puisse apprécier quelles vont être les conséquences de ses effets conjugués. Les études sur les espèces hydrothermales les plus emblématiques commencent à en donner les clés. Des événements sporadiques dans la circulation des masses d'eaux profondes, induits par des phénomènes atmosphériques comme les cyclones, sont par exemple identifiés parmi les facteurs susceptibles de jouer un rôle dans la distribution des larves. Sous l'influence des oscillations El Nino et La Nina, il a été montré récemment que les épisodes cycloniques au large du Mexique génèrent des tourbillons qui s'étendent de la surface jusqu'à 2500 m de fond, favorisant le transport de larves sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres entre écosystèmes habituellement isolés (Adams *et al.* 2011).

## RÉFÉRENCES

- ADAMSD. K., MCGILLICUDDY D. J., ZAMUDIO L., THURNHERR A. M., LIANG X., ROUXEL O., GERMAN C. R. and MULLINEAUX L. S., 2011 – *Surface-Generated Mesoscale Eddies Transport Deep-Sea Products from Hydrothermal Vents*. Science 332, 580 – 583.
- BOETIUS A., ALBRECHT S., BAKKER K., BIENHOLD C., FELDEN J., FERNANDEZ-MENDEZ M., HENDRICKS S., KATLEIN C., LALANDE C., KRUMPEN T., NICOLAUS M., PEEKEN I., RABE B., ROGACHEVA A., RYBAKOVA E., SOMAVILLA R. and WENZHOFER F., 2013 – *RV Polarstern ARK27-3-Shipboard Science Party. Export of Algal Biomass from the Melting Arctic Sea Ice*. Science 339, 1430-1432.
- DE LEO F. C., SMITH C. R., ROWDEN A. A., BOWDEN D. A. and CLARK M. R., 2010 – *Submarine Canyons: Hotspots of Benthic Biomass and Productivity in the Deep Sea*. Proc. R. Soc. B Biol. Sci. 277, 2783 – 2792.
- GLOVER A. G. *et al.*, 2010 – *Temporal Change in Deep-Sea Benthic Ecosystems: a Review of the Evidence from Recent Time-Series Studies*. Advances in Marine Biology. vol. 58, pp. 1-79.
- GUINOTTE J.-M., ORR J., CAIRNS S., FREIWALD A., MORGAN L. and GEORGE R., 2006 – *Will Human-Induced Changes in Seawater Chemistry Alter the Distribution of Deep-Sea Scleractinian Corals?* Frontier in Env. and Ecol., 4 (3): 141 – 146.



- LEVIN L. A. and SIBUET M., 2012 – *Understanding Continental Margin Biodiversity: a New Imperative*. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 4, 79 – 112.
- MORA C. *et al.*, 2013 – *Biotic and Human Vulnerability to Projected Changes in Ocean Biogeochemistry over the 21<sup>st</sup> Century*. *PLoS Biol.* 11, e1001682.
- RAMIREZ-LLODRA E. *et al.*, 2010 – *Deep, diverse and definitely different: unique attributes of the world's largest ecosystem*. *Biogeosciences* 7, 2851 – 2899.
- RODER C., BERUMEN M. L., BOUWMEESTER J., PAPATHANASSIOU E., AL-SUWAILEM A. and VOOLSTRA C. R., 2013 – *First Biological Measurements of Deep-Sea Corals from The Red Sea*. *Sci. Rep.* 3.
- SOLTWEDEL T. *et al.*, 2005 – *Hausgarten: Multidisciplinary Investigation at a Deep-Sea Long-Term Observatory*. *Oceanography* 18 (3). 46-61.
- STRAMMA L., SCHMIDTKO S., LEVIN L. A. and JOHNSON G. C., 2010 – *Ocean Oxygen Minima Expansions and their Biological Impacts*. *Deep Sea Res. Part Oceanogr. Res. Pap.* 57, 587 – 595.



# Océan, biodiversité et climat

Gilles Boëuf  
(MNHN, Paris)

L'environnement marin a donc joué un rôle déterminant dans l'histoire de la Vie et l'océan actuel garde son rôle primordial dans l'évolution de la vie et du climat. La diversité spécifique reconnue dans les océans ne dépasse pas 13 % de l'ensemble des espèces vivantes actuellement décrites, soit moins de 250 000. Cela peut-être dû d'une part à un manque de connaissances, surtout pour les zones profondes et pour les micro-organismes, d'autre part au fait que les écosystèmes marins et le mode de vie dans un milieu continu dispersent plus facilement les espèces et prédisposent moins à l'endémisme. Par contre, les biomasses marines peuvent être considérables. Le dérèglement climatique joue un rôle direct sur les pertes de diversité biologique, et celles-ci contribuent aussi en retour au dérèglement lui-même.

## L'OCÉAN

L'océan constitue le plus grand espace de vie de la planète et recouvre à l'heure actuelle 70,8 % de la surface de la Terre, soit 361 millions de km<sup>2</sup>. Mais il faut en fait beaucoup plus penser l'océan en volume, soit de l'ordre de 1 370 millions de km<sup>3</sup>. La profondeur moyenne est autour de 3 800 m et la principale caractéristique de ce gigantesque milieu est sa continuité. Un autre trait particulier est, par rapport au reste des eaux libres sur la planète, sa salinité. Celle-ci est extrêmement stable au large (35 psu<sup>1</sup>, 1 050 mOsm. l<sup>-1</sup>) et la composition de l'eau océanique est la même partout, et ceci depuis des dizaines de millions d'années.

La biodiversité ne saurait être assimilée à une simple liste d'espèces peuplant un écosystème particulier, elle est considérablement plus qu'un catalogue ou un inventaire. C'est en fait tout l'ensemble des relations établies entre les êtres vivants, entre eux, et avec leur environnement. Nous pouvons la définir simplement comme étant la fraction vivante de la nature. Elle est

issue d'une chimie pré-biotique, bâtie sur une géo-diversité antérieure, et elle s'est diversifiée dans l'océan ancestral vers 3,9 milliards d'années. La vie est finalement apparue assez rapidement, après le refroidissement initial et la condensation des masses d'eau.

C. De Duve, Prix Nobel en 1974, dit dans « *Poussière de vie* » en 1996, que la Terre était si idéalement positionnée par rapport au soleil que la vie ne pouvait pas ne pas y apparaître (elle devait donc le faire!) et J. Monod parlait d'hypothèse improbable! Les plus anciennes roches sédimentaires connues (île d'Akilia, au Sud du Groenland) contenant du carbone d'origine biologique sont datées à 3 850 millions d'années (Ma). Il faut imaginer la vie primitive très simple au début, à partir d'un monde ARN et de proto-cellules. Les gisements actuels de stromatolithes, ces roches précipitant le bicarbonate, avec de très beaux gisements en Australie, sont très précieux car ils contiennent dans leurs parties silicifiées les plus anciens fossiles de micro-organismes connus, des cyanobactéries. Celles-ci sont parties à la conquête généralisée de l'océan vers 3 400-3 200 Ma, alors sans aucun

<sup>1</sup> Practical salinity unit



oxygène atmosphérique. Grâce aux pigments spécifiques des cellules, et en présence d'eau, la photosynthèse produit de l'oxygène et des sucres à partir de la lumière et du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et serait apparue vers 3 500 Ma. L'oxygène a ensuite commencé à diffuser hors du milieu aquatique, la composition de l'atmosphère actuelle avec ses 21 % d'oxygène datant d'environ 100 Ma, au Crétacé.

Dans cet océan ancestral se sont produits des événements déterminants pour le vivant et la biodiversité :

1. L'apparition de la membrane nucléaire et du noyau individualisé (transition procaryote-eucaryote) vers 2 200 Ma.
2. La capture de cyanobactéries ambiantes qui deviendront des symbiotes et les organites de la cellule, la mitochondrie et le plaste, avec leur propre petit ADN, respectivement vers 2 100 et 1 400 Ma.
3. L'apparition des pluricellulaires et métazoaires vers 2 100 Ma.

Il s'y produira aussi un fait exceptionnel, dans cet océan ancestral, c'est l'apparition de la sexualité, tout d'abord chez les procaryotes, plus tard aussi chez les eucaryotes, qui se révélera si importante pour l'explosion de la biodiversité. La reproduction sexuée permet un brassage génétique créateur de nouveauté et d'une diversité sans précédent : tous les individus sont différents. Une population pourvue de sexualité évolue beaucoup plus vite. De plus, la prévalence de la sexualité permet le développement de la « course aux armements » des parasites et de leurs hôtes (co-évolution et dialogue moléculaire, le brassage génétique permettant à terme plus rapidement de « désarmer » le parasite et une sélection sexuelle, bien différente de la sélection naturelle).

Les conséquences physiques des « flux » osmotiques (eau et électrolytes) en environnement marin ont conduit le vivant à deux types de stratégies :

1. Dans l'immense majorité des cas, de la première cellule initiale aux crustacés, une régulation isosmotique intra-cellulaire, entraînant pour l'organisme vivant, séparé de l'eau

de mer par une membrane biologique, la même pression osmotique (de l'ordre de 1 000 mOsm.l<sup>-1</sup>) à l'intérieur (milieu intra-cellulaire et « intérieurs », extracellulaire) que celle de l'eau de mer

2. Plus tard, à partir des arthropodes, une régulation anisosmotique extracellulaire pour laquelle les cellules et fluides internes sont beaucoup moins concentrés (3-400 mOsm.l<sup>-1</sup>) que l'eau de mer.

Le comportement perpétuel de boisson en mer, chez un poisson osseux par exemple, associé à des mécanismes très actifs d'excrétion des électrolytes par la branchie, l'amène constamment à trouver un délicat compromis, entre une surface maximale de branchie à développer pour aller capter l'oxygène dans un milieu pauvre et très changeant et par ailleurs une surface minimale pour éviter de graves déséquilibres hydro-minéraux.

Bien plus tard, au Trias, vers 210 Ma, après la troisième grande crise d'extinction des espèces vers 251 Ma, les prémices de la thermorégulation se sont développées et ont trouvé leur efficacité optimale chez les grands dinosauriens, puis surtout chez les oiseaux et les mammifères. Aujourd'hui 12 phyla sont exclusivement marins chez les animaux et n'ont jamais quitté l'océan (Échinodermes, Brachiopodes, Chaetognathes). Par ailleurs, les biomasses peuvent être considérables en mer, les seules bactéries de la couche de sub-surface de l'océan représentant à elles seules plus de 10 % de toute la biomasse carbonée de la planète. L'environnement marin a donc joué un rôle déterminant dans l'histoire de la Vie et l'océan actuel garde son rôle primordial dans l'évolution de la vie et du climat.

## SPÉCIFICITÉS DE LA BIODIVERSITÉ MARINE

La biodiversité marine est bien particulière. La diversité spécifique reconnue dans les océans ne dépasse pas 13 % de l'ensemble des espèces vivantes actuellement décrites, soit moins de 250 000. Ceci est peu et peut être lié à deux rai-



sons. La première c'est que les connaissances, surtout pour les zones profondes et pour les micro-organismes, bactéries et protistes divers, ne sont encore que très partielles: nous sous-estimons donc considérablement la biodiversité océanique. Les nouveaux moyens, comme le couplage entre la cytométrie en flux et les sondes moléculaires permettent la découverte d'une extraordinaire diversité biologique. Les séquençages massifs actuels de la masse d'eau océanique, le « séquençage de mers » (C. Venter, séquençage de tout l'ADN dans un volume d'eau de mer filtrée) apportent des données apparaissant pour la plupart inconnues. La navigation circum-océanique Tara Océans nous fournit des informations précieuses sur l'abondance et la variété des virus, bactéries et protistes. Pour tous les procaryotes et les très petits eucaryotes, les approches moléculaires (séquençages de l'ARN ribosomal 16S ou 18S entre autres) apportent chaque jour des connaissances étonnantes. Par ailleurs, et c'est la seconde raison, il est aussi clair que les écosystèmes marins et le mode de vie dans un milieu continu (à travers la dispersion des gamètes et des stades larvaires) des espèces qui les peuplent, prédisposent moins à l'endémisme strict que dans les biotopes terrestres. Il existe beaucoup plus de barrières et d'isolats favorables à la spéciation (processus évolutif par lequel de nouvelles espèces vivantes apparaissent) sur terre qu'en mer. Ceci entraîne des différences importantes en matière de diversité spécifique, les niches écologiques marines au large n'atteignant pas la richesse des terrestres, beaucoup plus morcelées et favorisant beaucoup plus les spéciations nouvelles. La stabilité de l'océan ouvert, au moins depuis 100 millions d'années, est aussi tout à fait extraordinaire: pH, pression osmotique et salinité, températures, pressions hydrostatiques liées à la profondeur, contenus en gaz dissous... Les activités humaines sont en train de changer cela et nous y reviendrons plus loin. Cette stabilité est moins génératrice d'espèces nouvelles. Par contre, les biomasses marines peuvent être considérables et la seule performance du phytoplancton dans sa capacité à se renouveler peut dépasser les 50 % de la productivité de la planète. Si aujourd'hui, il existe de 5 à 7 fois plus de taxons terrestres reconnus, comparativement

aux océans, nous pouvons bien sûr nous interroger sur cette question, car initialement la vie fut exclusivement marine, avant les sorties massives, plusieurs fois, en différents endroits sous différentes formes, de l'océan vers 440 Ma pour les métazoaires « élaborés ». La grande crise d'extinction Permien-Trias jouera un rôle primordial avec 96 % d'extinction d'espèces, tant marines que continentales vers 252 Ma. L'explosion des espèces de plantes à fleurs, des insectes et de beaucoup d'autres groupes sur Terre vers 130-110 Ma fut déterminante après les radiations (explosions du nombre d'espèces à partir d'une seule, ancestrale) initiales dès le Dévonien puis surtout le Carbonifère. La coévolution entre plantes et pollinisateurs, l'apparition d'une infinité de nouvelles niches ont souvent été proposées pour expliquer l'accélération de la spéciation dans les environnements continentaux à cette époque. Il est également clair que les phénomènes de dispersion des produits sexuels et des larves en mer jouent un rôle considérable dans la répartition des espèces et la biogéographie actuelles. L'endémisme est nettement plus limité dans l'océan au large, la stabilité et la continuité de ce gigantesque milieu expliquant cela. Si sur terre il n'est pas rare de trouver des espèces vivant sur quelques km<sup>2</sup> nous ne connaissons pas d'exemples d'espèces aussi confinées en mer. La très grande variété des modes de reproduction en mer tire aussi parti des phénomènes de dispersions dans les masses d'eau, mâle et femelle n'étant pas toujours contraints d'être proches! Ainsi, connectivité et variations bien plus faibles des facteurs environnementaux créent-elles la grande stabilité de l'océan au large et des caractéristiques bien spécifiques de la biodiversité qu'il abrite. Les systèmes côtiers, intermédiaires avec de fortes influences terrigènes sont eux soumis à des variations bien plus grandes.

Enfin, n'oublions pas que la biodiversité est bien plus que la seule diversité spécifique, incluant à la fois les espèces et leur abondance relative. Le sens du mot « biodiversité » a été diversement explicité mais exprime globalement « l'information génétique que contient chaque unité élémentaire de diversité, qu'il s'agisse d'un individu, d'une espèce ou d'une population ». Ceci détermine son histoire, passée, présente et future.



Même, cette histoire est déterminée par des processus qui sont eux-mêmes des composantes de la biodiversité. En fait, aujourd'hui on regroupe diverses approches sous ce terme :

1. L'étude des mécanismes biologiques fondamentaux permettant d'expliquer la diversité des espèces et leurs spécificités et nous obligeant à davantage étudier les mécanismes de la spéciation et de l'évolution.
2. Les approches plus récentes et prometteuses en matière d'écologie fonctionnelle et de bio-complexité, incluant l'étude des flux de matière et d'énergie et les grands cycles biogéochimiques.
3. Les travaux sur la nature « utile » pour l'humanité dans ses capacités à fournir des aliments, des substances à haute valeur ajoutée pour des médicaments, produits cosmétiques... des sondes moléculaires ou encore à offrir des modèles ancestraux et originaux pour la recherche fondamentale et finalisée, afin de résoudre des questions agronomiques ou biomédicales.
4. La mise en place de stratégies de conservation pour préserver et maintenir un patrimoine naturel constituant un héritage naturellement attendu par/pour les générations futures.

À partir de cette biodiversité, les humains pêchent depuis des temps ancestraux, certainement des dizaines de milliers d'années. Dès qu'ils sont parvenus sur des rivages, ils se sont mis à collecter des coquillages, des algues, à piéger des poissons... Comme en agriculture et dans les milieux continentaux, l'humain s'est aussi mis à élever certaines espèces marines sur les littoraux et ceci depuis au moins 4000 ans (Égypte, Chine...). L'exploitation des ressources vivantes aquatiques renouvelables est en plein essor, mais avec de sérieuses inquiétudes sur sa durabilité. Les derniers chiffres disponibles de la FAO en 2013, pour l'année 2012, donnent des valeurs de 79,9 millions de tonnes (Mt) pour les pêches maritimes, 11,5 Mt pour les pêches continentales, 19 Mt pour les algues (dont seulement 1 pour la pêche) et 65,6 Mt pour l'aquaculture (dont 20,3 Mt pour la mer), soit un total, tout confondu pour tous les groupes et tous les milieux aquatiques, d'environ 176 Mt. L'océan, ce ne sont pas que ces ressources vivantes, ce sont aussi de l'ordre

de 25 000 molécules d'intérêt pharmacologique ou cosmétique et d'extraordinaires et forts pertinents modèles pour la recherche scientifique et les applications biomédicales ou agronomiques qui en découlent. Les molécules-clés de la cancérisation ont été découvertes grâce à des oursins et étoiles de mer, les bases moléculaires de la mémoire grâce à une limace de mer, la transmission de l'influx nerveux grâce au nerf de calmar...

## OCÉAN ET CLIMAT

L'océan et l'atmosphère sont en intime connexion et échangent de l'énergie sous forme de chaleur et d'humidité. L'océan absorbe la chaleur beaucoup plus que les surfaces de glace ou les continents et stocke l'énergie beaucoup plus efficacement. Il relargue cette chaleur plus lentement que les continents et contribue au climat plus tempéré des zones côtières. L'océan est ainsi un formidable régulateur du climat. Des changements dans la balance énergétique entre atmosphère et océan jouent un rôle important dans le dérèglement climatique. La circulation océanique est affectée par la circulation atmosphérique et les courants de surface sont sous la dépendance des vents. Ils mélangent les eaux de surface jusqu'à la thermocline sous laquelle les forces essentielles de circulation sont liées à la température et à la salinité, influençant la densité de l'eau. L'océan alimente ainsi les gigantesques quantités d'énergie libérées accompagnant la genèse des tempêtes et cyclones affectant aussi les continents et les populations humaines. Les upwellings, remontées d'eau froide profonde sur les côtes, riches en nutriments, modifient profondément les climats côtiers et leurs fluctuations sont aussi essentielles à prendre en compte pour comprendre le système climatique. Les trois premiers mètres de l'océan stockent à eux seuls plus d'énergie que la totalité de l'atmosphère et l'océan a de gigantesques capacités d'inertie thermique et dynamique. Ce service de redistribution des masses d'eau en transportant les eaux chaudes des tropiques vers les pôles et *vice versa* est fondamental. L'océan profond joue un rôle considérable dans ces capacités



de stockage et de relargage de chaleur, cet immense réservoir de chaleur confère à l'océan un extraordinaire rôle de modérateur des variations climatiques. Il contrôle la formation des vents et des pluies. L'océan piège et stocke également le CO<sub>2</sub> et évite ainsi un trop prononcé effet de serre dans l'atmosphère, mais malheureusement, en contre partie, il s'acidifie à cause de la production d'acide carbonique. Le phytoplancton océanique stocke également du CO<sub>2</sub> dans la couche de surface ainsi que tous les bio-calcalcificateurs. Les transports océaniques redistribuent ainsi chaleur et salinité, ces deux effecteurs contrôlant grandement la machine climatique. Les courants des bordures ouest et est des continents jouent un rôle déterminant et leurs fluctuations dans le passé ont conduit aux alternances des phases glaciaires.

Si l'océan joue ainsi un rôle essentiel sur le climat, les pertes en diversité biologique et les pollutions altèrent aussi l'océan et causent des conditions de dérèglement climatique en retour. La quan-

tité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et dans l'océan augmente. Les températures moyennes de l'air de la couche inférieure de l'atmosphère (près de la surface du globe) et de la surface de l'océan sont en hausse. Et le niveau moyen des océans se relève plus vite que jamais depuis la fin de la dernière ère glaciaire. Les changements rapides de la composition chimique de l'eau de mer ont un effet délétère sur les écosystèmes océaniques qui étaient déjà stressés par la surpêche et la pollution.

Ainsi, si le dérèglement climatique joue un rôle direct sur les pertes de diversité biologique, celles-ci contribuent aussi en retour au dérèglement lui-même! Et n'oublions pas que les effets de ce climat trop rapidement changeant s'ajoutent à ceux liés à la destruction et à la pollution des littoraux, aux surexploitations systématiques des ressources vivantes accélérées et à la dissémination anarchique d'espèces (dont les ballastages de grands navires). Cela fait beaucoup!



# Les coraux et le changement climatique

Denis Allemand  
(Centre Scientifique  
de Monaco)

Les récifs coralliens recouvrent une faible surface des océans, entre 0,08 et 0,16 %, mais abritent environ un tiers de toutes les espèces marines connues à ce jour. Ce succès écologique est dû à une symbiose entre le corail et des microalgues intracellulaires communément appelées zooxanthelles. « Organismes ingénieurs », ils sont à l'origine des plus vastes bioconstructions de notre planète. Véritables oasis de vie, ils assurent la subsistance directe à plus de 500 millions de personnes dans le monde grâce à la pêche, mais leur intérêt pour l'homme va bien au-delà : protection des côtes contre l'érosion, zones de haute valeur touristique... Les services écologiques issus des récifs coralliens sont estimés à environ 30 milliards d'US\$ par an. Leur croissance est dépendante de nombreux facteurs (lumière, température, pH, nutriments, turbidité...). Ils sont donc extrêmement sensibles aux changements actuels de notre environnement : réchauffement des eaux, acidification des océans, qui s'ajoutent aux perturbations locales (pollution, sédimentation, aménagement des côtes, surpêche, trafic maritime...). Ainsi, une élévation de moins d'un degré au-delà d'une valeur seuil suffit à provoquer le blanchissement, c'est-à-dire la rupture de la symbiose corail – zooxanthelles, de vastes populations coralliennes, pouvant conduire à la disparition du récif. De même l'acidification des océans perturbe la formation du squelette corallien ainsi que de nombreuses autres fonctions biologiques comme la reproduction. On estime actuellement qu'environ 20 % des récifs ont définitivement disparu, que 25 % sont en grand danger et que 25 % supplémentaires seront menacés d'ici à 2050 si aucune action de gestion n'est menée.

## QU'EST CE QU'UN RÉCIF CORALLIEN ?

Les récifs coralliens constituent un écosystème typique de fonds marins peu profonds de la zone intertropicale (de 33° Nord et jusqu'à 30° Sud environ). L'architecture tridimensionnelle de cet écosystème est formée par l'amoncellement des squelettes calcaires d'organismes marins, les coraux constructeurs de récifs (Cnidaires, Scléractiniaires), solidifiés entre eux grâce à l'activité biologique d'organismes calcaires (macroalgues, éponges, vers, mollusques...): les coraux sont appelés « organismes ingénieurs » et le récif est dit « biogénique » puisque résultant d'une activité biologique. Les récifs de coraux sont donc un écosystème construit par ses propres habitants.

La surface totale des récifs coralliens varie, selon les modes de calcul, entre 284 300 km<sup>2</sup> (Smith 1978) à 617 000 km<sup>2</sup> (Spalding *et al.* 2001). Ils recouvrent donc entre 0,08 et 0,16 % de la surface des océans. Les seuls récifs français recouvrent une surface de 57 557 km<sup>2</sup>.

Le plus grand récif est la Grande Barrière de Corail (« Great Barrier Reef ») qui s'étale le long des côtes Nord du Nord Est de l'Australie sur 2 300 km. Elle est réputée être la seule construction animale visible de l'espace. Le second plus grand récif est français, il s'agit de la barrière de la Nouvelle Calédonie qui mesure 1 600 km de



long. Ces deux barrières récifales sont inscrites au Patrimoine Mondial de l'UNESCO (respectivement en 1981 et 2008).

Les récifs coralliens peuvent présenter différentes formes, dont la première description a été réalisée par Charles Darwin lors de son voyage sur le Beagle (Darwin 1842):

- Récifs frangeants (« *fringing reefs* »): ils bordent les côtes et maintiennent une zone active de croissance vers le large et une accumulation de coraux morts du côté terre, formant un platier qui devient avec le temps un lagon.
- Récif barrière (« *barrier reefs* »): le récif frangeant devient avec le temps récif barrière suite à l'enfoncement de l'île. De ce fait, le lagon s'élargit et le récif s'éloigne de la côte jusqu'à 1 km.
- Atolls (« *atolls* »): évolution ultime du récif, lorsque l'île a complètement disparu sous la mer. Les atolls gardent la forme circulaire initiale de l'île. Il y a environ 400 atolls dans le monde.

La croissance récifale est de l'ordre de 4 kg de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) par  $\text{m}^2$  et par an (Smith & Kinsey 1976), mais les valeurs varient beaucoup d'un récif à un autre et peuvent atteindre dans certains cas 35 kg  $\text{CaCO}_3/\text{m}^2$ . an (Barnes & Chalker 1990) soit des taux de croissance verticale annuels de 1 à 7 mm. De nombreux facteurs influencent ces taux de croissance: lumière, température (optimale entre 22° et 29 °C), nutriments, courants, turbidité, pH et état de saturation en carbonate de calcium de l'eau de mer...

La formation de carbonate de calcium par les organismes constructeurs de récifs entraînent la libération dans le milieu de gaz carbonique: ainsi, contrairement à ce qui a été longtemps imaginé, un récif principalement dominé par des coraux se comporte comme une source - mineure - de  $\text{CO}_2$  et non un puits (environ 1.5 mmol  $\text{CO}_2/\text{m}^2$ . jour; Tambutté *et al.* 2011 pour revue). Les récifs jouent par contre un rôle important comme puits de carbone avec des taux de l'ordre de 70 à 90 millions de tonnes de carbone par an (Frankignoulle & Gattuso 1993).

## À L'ORIGINE DU RÉCIF, LE CORAIL

Le principal bâtisseur du récif est le corail. Autrefois appelés madréporaires, les coraux constructeurs de récifs sont aujourd'hui inclus au sein de l'Ordre des Scléactiniaires (sous-classe des Hexacoralliaires, classe des Anthozoa, embranchement des Cnidaires). Parmi les Scléactiniaires, la moitié environ des espèces environ (environ 660 sur 1 482 espèces connues à ce jour, Cairns 1999) participent à la construction récifale, on les appelle alors hermatypiques. Ils sont constitués de polypes de taille variable selon les espèces, constituant des unités fonctionnelles. Chaque polype comporte une bouche entourée de tentacules. Les polypes sont reliés les uns aux autres par un ensemble de cavités, le coelentéron, parcourant le tissu corallien. L'ensemble est dit colonial (bien que la colonie fonctionne comme un organisme unique) et les coraux sont appelés animaux modulaires. Ils adoptent des formes variées selon les espèces, branchues, lamellaires, encroûtantes, massives... et présentent des vitesses de croissance qui peuvent dépasser les 15 cm par an de croissance axiale dans le milieu naturel (Dullo 2005). Leur taille, chez certains coraux massifs, peut dépasser 6 m de diamètre.

Le succès de l'élaboration et du fonctionnement récifal est largement dû à la capacité de la majorité des coraux Scléactiniaires (un peu moins de 900 espèces, Michel Pichon, Comm. Pers.) d'établir une symbiose mutualiste avec des microalgues photosynthétiques dinoflagellées, appelées communément zooxanthelles (*Symbiodinium sp.*). Ces dernières sont localisées à l'intérieur des cellules du gastroderme du corail, isolées du cytoplasme animal par une membrane dite périsymbiotique qui contrôle les transferts entre les deux partenaires (Furla *et al.* 2011). Les deux partenaires ont co-évolué depuis le Trias (Muscatine *et al.* 2005), adoptant des capacités uniques (capacité de l'hôte animal à absorber activement le  $\text{CO}_2$ , des composés azotés minéraux, à se protéger des rayons ultra-violet, de l'hyperoxie et du stress oxydant; capacité du symbiote algal à échanger des nutriments avec son hôte... Furla *et al.* 2005, 2011). Du fait de la présence des zooxanthelles, la dis-



tribution des coraux en profondeur est conditionnée par la lumière (généralement entre 0 et 30 m). Outre les zooxanthelles, le corail héberge également de nombreuses bactéries dont les techniques de séquençage moderne permettent de mettre en évidence la diversité. Ces bactéries semblent jouer un rôle physiologique important. L'ensemble de ces associations forme une unité fonctionnelle appelée holobionte, souvent qualifiée de super-organisme.

La photosynthèse des symbiotes est liée à une autre fonction du corail, la biominéralisation, c'est-à-dire sa capacité à construire un squelette calcaire, ou biominéral. La caractéristique du biominéral est d'être un matériau composite comprenant à la fois une fraction minérale et une fraction organique, qui, quoique mineure (< 1% en poids), joue un rôle primordial dans le contrôle du dépôt de carbonate de calcium sous forme aragonite (Allemand *et al.* 2011, Tambutté *et al.* 2008, 2011). Par des mécanismes encore sujets à débats, la lumière, via la photosynthèse des symbiotes, stimule la calcification du corail par rapport à la calcification nocturne d'un facteur pouvant aller jusqu'à 127, mais dans la majorité des cas ce facteur est compris entre 1 et 5, avec une valeur moyenne de 4 (Gattuso *et al.* 1999).

Les coraux se reproduisent classiquement de façon sexuée et possèdent un stade larvaire appelé *planula* qui assure la dispersion de l'espèce. Ils possèdent également de fortes capacités de reproduction asexuée par fragmentation, propriété utilisée pour développer les cultures *ex situ*.

## UN CORAIL, DES CORAUX

Le nom de corail cache cependant de nombreux organismes appartenant à l'embranchement des Cnidaires et à l'origine d'écosystèmes originaux :

- Les coraux d'eaux froides, dits aussi « coraux profonds » (« *cold-water corals* » ou « *Deep-sea corals* ») : ces coraux appartiennent au même ordre de Cnidaires que les coraux

constructeurs de récifs. Comme eux, ils constituent des organismes ingénieurs, bâtissant un riche écosystème qui sert d'habitat pour de nombreux autres organismes dans les eaux profondes des océans Atlantique, Pacifique, ainsi que de la Mer Méditerranée. Au contraire de leurs cousins de surface, ils sont acclimatés à des eaux froides (6°-14 °C) et ne possèdent pas d'algues photosynthétiques. Ces récifs jouent donc un rôle remarquable de refuges et aires de nurserie pour de nombreuses espèces de poissons d'intérêt commercial (Roberts *et al.* 2009).

- Le coralligène en Méditerranée : composé par un ensemble d'organismes fixés (gorgones, corail rouge, algues calcaires encrustantes....) le coralligène forme en Méditerranée un écosystème côtier sur falaise très riche. Il revêt un intérêt particulier tout autant pour la pêche que pour le tourisme aquatique (CAR/ASP 2003).

## LE RÉCIF CORALLIEN : UN HOT-SPOT DE BIODIVERSITÉ

La capacité à vivre en symbiose avec des Dinoflagellés a permis aux coraux de développer de larges constructions récifales dans des zones normalement oligotrophiques, c'est-à-dire pauvre en éléments nutritifs. Les récifs coralliens existent depuis le Trias, il y a environ 200 millions d'années. Cependant, depuis cette période il y a eu de nombreuses phases de disparition/réapparition. L'élaboration de la Grande Barrière semble commencer il y a 20 millions d'années. Des formes primitives, différentes des coraux modernes, ont cependant existé bien avant le Trias, durant le Dévonien il y a environ 400 millions d'années.

Les récifs coralliens abritent la plus grande diversité biologique sur terre avec 32 des 34 phylums animaux connus à ce jour et regroupent un tiers des espèces marines connues à ce jour, soit près de 100 000 espèces (Porter & Tougas 2001). Ainsi, 30 % de la biodiversité marine connue est abritée dans moins de 0,2 % de la surface totale des océans. Ils constituent ainsi l'équivalent dans le domaine marin des forêts tropicales primaires.



Pour comparaison, le nombre d'espèces de mollusques trouvées sur 10 m<sup>2</sup> de récif dans le Pacifique Sud dépasse ce qui est connu sur l'ensemble de la Mer du Nord. Autre exemple, il existe en Nouvelle-Calédonie plus de 400 espèces de nudibranches côtiers alors qu'en France métropolitaine il n'y a guère plus d'une dizaine d'espèces pour un linéaire côtier équivalent.

Cette « biodiversité » n'est cependant pas homogène entre les récifs. Il existe en effet une distribution asymétrique de la diversité et de l'abondance des coraux entre les océans Atlantique et Pacifique, ainsi qu'au sein de ces océans. Dans ces deux océans, la diversité et l'abondance sont concentrées à l'ouest : triangle du corail (appelé également « Centre de Biodiversité corallienne ») pour le Pacifique, comprenant la région Malaisie - Indonésie - Philippines - Mer de Chine - îles Salomon ; zone Caraïbes pour l'Atlantique. Il existe ensuite un très fort gradient longitudinal Ouest-Est. La faune et flore associée aux récifs suivent en général des gradients similaires.

## LE RÉCIF CORALLIEN : UNE RICHESSE EXCEPTIONNELLE POUR L'HOMME

Les récifs coralliens baignent les côtes de plus de 80 pays à travers le monde (Sheppard *et al.* 2009) pour lesquels ils constituent une importante source de revenus, tant sur le plan de la nourriture humaine, la protection des côtes ou le tourisme... Environ 275 millions de personnes vivent à travers le monde à moins 30 km d'un récif de corail et la subsistance de plus de 500 millions dépend directement des récifs. Les économistes estiment à un peu plus de 24 milliards d'Euros la valeur des services rendus par les récifs annuellement (Chen *et al.* 2015). Le rapport TEEB (TEEB 2010) quant à lui évalue à environ 140 milliards d'euros par an le manque à gagner si les récifs coralliens étaient détruits.

Parmi les services écosystémiques rendus par les récifs coralliens, on peut ainsi citer :

### 1. Les services de prélèvements

- Alimentation : les récifs de corail fournissent 9 à 12 % du poisson pêché dans le monde

et 20 à 25 % du poisson pêché par des pays en voie de développement (Moberg & Folke 1999). Ce chiffre grimpe à 70 à 90 % dans les pays de l'Asie du Sud-Est (Garcia & de Leiva Moreno 2003). Le revenu total estimé des pêcheries récifales serait d'environ 5 milliards d'euros (Conservation International 2008). Une grande partie de ces pêches reste traditionnelle, réalisée à pieds par la population locale, principalement les femmes et les enfants qui collectent poissons, mollusques (bénéitiers), crustacés (crabes et langoustes), holothuries (aussi appelée trévang ou concombre de mer)... On estime qu'un récif en bonne santé fournit annuellement entre 5 à 10 tonnes de poissons et d'invertébrés par km<sup>2</sup>.

- Ressources minérales : les récifs coralliens fournissent des matériaux de construction des habitations (Maldives, Indonésie), du sable pour la construction des infrastructures routières ou des fertilisateurs pour les terres de culture... Les récifs des Maldives fournissent ainsi annuellement environ 20000 m<sup>3</sup> de matériaux (Moberg & Folke 1999).
  - Ressources vivantes : au-delà de la pêche pour l'alimentation, les récifs permettent également la pêche de poissons coralliens pour l'aquariologie (15 millions de poissons/an pour 2 millions d'aquariologistes dans le monde), la perliculture...
- ### 2. Les services de régulation
- Protection côtière : les récifs de coraux contribuent à la protection du littoral de l'action destructive des vagues et des tsunamis. Ce sont ainsi plus de 150000 km de côtes qui sont naturellement protégées par les barrières récifales ([www.coralguardian.org](http://www.coralguardian.org)). Un récif corallien typique pourrait ainsi absorber jusqu'à 90 % de la force d'impact d'une vague (Wells 2006). Lors du Tsunami dévastateur de 2004 dans l'Océan Indien, les côtes protégées par des récifs coralliens en bonne santé n'ont été que peu affectées par la vague mortelle. La valeur de la protection des littoraux contre les catastrophes naturelles est évaluée entre 20000 et 27000 euros par an et par hectare de corail (TEEB 2010). Le bénéfice total est estimé à 7 milliards d'euros par an (Conservation International 2008).



### 3. Les services culturels

- **Tourisme :** Par son attrait visuel pour les touristes (tourisme terrestre, plongeurs), les récifs attirent de très nombreux visiteurs favorisant l'emploi dans des zones souvent pauvres. Par exemple, le Grande Barrière de corail d'Australie attire environ 2 millions de visiteurs chaque année et produit un revenu d'environ 4 milliards d'euros à l'économie australienne et 54000 emplois (Biggs 2011). Un hectare de corail rapporte chaque année 64000 à 80000 euros en opportunités pour le tourisme et les loisirs, selon les estimations compilées par le rapport TEEB. Le seul écotourisme rapporte 800000 euros par an pour les Caraïbes. Le revenu total annuel issu des récifs est estimé à environ 8 milliards d'euros (Conservation International 2008).
- **Héritage culturel ou religieux :** Les récifs sont le support de nombreuses traditions culturelles ou religieuses. Dans le Sud du Kenya par exemple, des rituels religieux sont organisés autour des récifs afin d'apaiser les esprits (Moberg & Folke 1999).
- **Sources de médicaments et de modèles biologiques :** les nombreux invertébrés marins (éponges, mollusques, coraux mous) sont appelés à fournir de nouveaux médicaments pour la santé humaine, de même que le corail commence à être utilisé comme modèle biologique pour mieux comprendre l'immunité ou les mécanismes du vieillissement (Moberg & Folke 1999).

## LE RÉCIF CORALLIEN : MENACES LOCALES ET GLOBALES

L'écosystème corallien est aujourd'hui menacé à la fois par des atteintes locales (pollutions, sédimentation, développement côtier non durable, la pollution entraînant la destruction du récif, enrichissement nutritif, surpêche, utilisation de méthodes destructrices pour la pêche...) et depuis les années 1980, par des atteintes globales (réchauffement global, acidification des océans). Ainsi, le *Global Coral Reef Monitoring Network* (GCRMN) estime que 19 % des récifs sont actuellement détruits, 15 % sont sérieusement endommagés et risquent de disparaître

d'ici une dizaine d'années et 20 % risquent de disparaître dans moins de 40 ans. De façon plus positive, 46 % des récifs du globe sont en bonne santé (Wilkinson 2008). Les rares études de suivi de la croissance récifale sur du long terme montrent une nette diminution de la couverture corallienne. Ainsi De'ath *et al.* (2012) montre que l'analyse de 2258 mesures effectuées sur 214 récifs de la Grande Barrière durant la période 1985 - 2012 permet de mettre en évidence un déclin de la couverture corallienne de 28,0 % à 13,8 % et une perte de la couverture initiale de 50,7 %.

Parmi les événements globaux qui affectent les récifs, l'augmentation de la température des eaux de surface provoque un phénomène à grande échelle, le blanchissement des coraux. Seul exemple visible à l'œil nu de l'impact des changements climatiques sur un écosystème, le blanchissement des coraux (« *coral bleaching* ») correspond à la rupture de la symbiose entre le corail et ses symbiotes zooxanthelles. Réversible dans les premiers jours, le phénomène de blanchissement conduit à la mort du corail au-delà de quelques semaines de « divorce » (Hoegh-Guldberg 1999; Weis & Allemand 2009). Ce phénomène, dont le mécanisme intime reste toujours débattu, intervient généralement lorsque la température dépasse de 0,5 °C un certain seuil.

Second événement affectant gravement la biologie corallienne, l'acidification des océans est également appelée l'autre effet du CO<sub>2</sub> (Doney *et al.* 2009). Une partie de l'excès de gaz carbonique produit par les activités humaines se dissout dans les océans, réduisant d'une part l'effet de serre (et donc réduisant l'augmentation de la température du globe) mais provoquant d'autre part une augmentation de l'acidité des océans, selon la réaction :



À ce jour, le pH a diminué d'environ 0,1 unité depuis le début du siècle dernier (8,2 à 8,1) ce qui correspond à une augmentation de l'acidité des eaux d'environ 30 % (Gattuso & Hansson 2011). L'acidification affecte principalement la vitesse de calcification des coraux, et donc la croissance récifale. Cependant, il apparaît que les effets varient énormément d'une espèce à une autre



d'aucun effet à plus de 50 % d'inhibition pour une même valeur d'ajout de CO<sub>2</sub> (Erez *et al.* 2011). Les différences de sensibilité pourraient être dues à une capacité différentielle de l'animal à contrôler le pH de son site de calcification (Holcomb *et al.* 2014; Venn *et al.* 2013). Mais l'augmentation de CO<sub>2</sub> dissous provoque de nombreux autres effets sur la physiologie corallienne, y compris une altération de l'expression des gènes (Moya *et al.* 2012; Vidal-Dupiol *et al.* 2013).

Malheureusement notre connaissance de la physiologie de ces organismes est trop lacunaire pour prévoir si les coraux seront capables de s'adapter aux variations rapides de l'environnement, d'autant que les effets conjoints de la diminution du pH des eaux combinés à l'augmentation de leur température semblent, d'après les premiers travaux, additifs (Reynaud *et al.* 2003).

## RÉFÉRENCES

- ALLEMAND D., FURLA P. and BÉNAZET-TAMBUTTÉ S., 1998 – *Mechanisms of Carbon Acquisition for Endosymbiont Photosynthesis in Anthozoa*. Can J Bot 76: 925-941.
- ALLEMAND D., TAMBUTTÉ É., ZOCCOLA D. and TAMBUTTÉ S., 2011 – *Coral Calcification, Cells to Reefs*. In *Coral Reefs: an Ecosystem in Transition*. Springer Netherlands.
- BARNES D. J. and CHALKER B. E., 1990 – *Calcification and Photosynthesis in Reef-Building Corals and Algae*. In *Coral Reefs*. Amsterdam: Elsevier.
- BIGGS D., 2011 – *Understanding Resilience in a Vulnerable Industry: the Case of Reef Tourism in Australia*. Ecology and Society 16 (1): 30.
- CAIRNS S. D., 1999 – *Species Richness of Recent Scleractinia*. Atoll Res Bull 459: 1-46.
- CAR/ASP, 2003 – *Le coralligène en Méditerranée*. PNUE.
- CHEN P. Y., CHEN C. C., CHU L. and MCCARL B., 2015 – *Evaluating the Economic Damage of Climate Change on Global Coral Reefs*. Global Environmental Change 30: 15-20.
- CONSERVATION INTERNATIONAL, 2008 – *Economic Values of Coral Reefs, Mangroves, and Seagrasses: a Global Compilation*. Center for Applied Biodiversity Science, Arlington.
- DARWIN C. R., 1842 – *The Structure and Distribution of Coral Reefs. Being the First Part of the Geology of the Voyage of the Beagle, under the Command of Capt. Fitzroy, R.N. during the Years 1832 to 1836*. London: Smith Elder and Co.
- DE'ATH G., FABRICIUS K. E., SWEATMAN H. and PUOTINEN M., 2012 – *The 27-Year Decline of Coral Cover on the Great Barrier Reef and its Causes*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109 (44), 17995-17999.
- DONEY S. C., V. FABRY J., FEELY R. A. and KLEYPAS J. A., 2009 – *Ocean Acidification: the Other CO<sub>2</sub> Problem*. Ann Rev Marine Sci 1: 169-192.
- DULLO W. C., 2005 – *Coral Growth and Reef Growth: a Brief Review*. Facies 51: 33-48.
- EREZ J., REYNAUD S., SILVERMAN J., SCHNEIDER K. and ALLEMAND D., 2011 – *Coral Calcification under Ocean Acidification and Global Change*. In *Coral Reefs: an Ecosystem in Transition*. Springer Netherlands.
- FRANKIGNOUILLE M. and GATTUSO J.-P., 1993 – *Air-Sea CO<sub>2</sub> Exchange in Coastal Ecosystems*. NATO ASI Series 14: 233-248.
- FURLA P., ALLEMAND D., SHICK M., FERRIER-PAGÈS C., RICHIER S. *et al.*, 2005 – *The Symbiotic Anthozoan: a Physiological Chimera between Alga and Animal*. Integr Comp Biol 45: 595-604.
- FURLA P., RICHIER S. and ALLEMAND D., 2011 – *Physiological Adaptation to Symbiosis in Cnidarians*. *Coral Reefs: an Ecosystem in Transition*. Springer Netherlands.
- GARCIA S. M. and DE LEIVA MORENO J. I., 2003 – *Global Overview of Marine Fisheries*. In *Responsible Fisheries in the Marine Ecosystem*. FAO & CABI Publishing.
- GATTUSO J.-P., ALLEMAND D. and FRANKIGNOUILLE M., 1999 – *Photosynthesis and Calcification at Cellular, Organismal and Community Levels*. In *Coral Reefs: a Review on Interactions and Control by Carbonate Chemistry*. Am Zool 39: 160-183.



- GATTUSO J.-P., FRANKIGNOULLE M. and WOLLAST R., 1998 – *Carbon and Carbonate Metabolism in Coastal Aquatic Ecosystems*. *Annu Rev Ecol Syst* 29: 405-433.
- HOEGH-GULDBERG O., 1999 – *Climate Change, Coral Bleaching and the Future of the World's Coral Reefs*. *Mar Freshwater Res* 50: 839-866.
- HOLCOMB M., VENN A. A., TAMBUTTÉ É., TAMBUTTÉ S., ALLEMAND D. *et al.*, 2014 – *Coral Calcifying Fluid Ph Dictates Response to Ocean Acidification*. *Sci Rep* 4: 5207.
- HOULBRÈQUE F. and FERRIER-PAGES C., 2009 – *Heterotrophy in Tropical Scleractinian Corals*. *Biol Rev.* 84: 1-17.
- MOBERG F. and FOLKE C., 1999 – *Ecological Goods and Services of Coral Reef Ecosystems*. *Ecol Econ* 29: 215-233.
- MOYA A., HUISMAN L., BALL E. E., HAYWARD D. C., GRASSO L. C. *et al.*, 2012 – *Whole Transcriptome Analysis of the Coral *Acropora millepora* Reveals Complex Responses to CO<sub>2</sub>-driven Acidification during the Initiation of Calcification*. *Mol Ecol* 21: 2440-2454.
- MUSCATINE L., GOIRAN C., LAND L., JAUBERT J., CUIF J. P. *et al.*, 2005 – *Stable Isotopes (<sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N) of Organic Matrix from Coral Skeleton*. *Proc Natl Acad Sci USA* 102: 1525-1530.
- PORTER J. W. and TOUGAS J. I., 2001 – *Reef Ecosystems: Threats to their Biodiversity*. In *Encyclopedia of Biodiversity*. San Diego: Academic Press.
- REYNAUD S., LECLERCQ N., ROMAINE-LIOUD S., FERRIER-PAGÈS C., JAUBERT J. *et al.*, 2003 – *Interacting Effects of CO<sub>2</sub> Partial Pressure and Temperature on Photosynthesis and Calcification in a Scleractinian Coral*. *Global Change Biol* 9: 1660-1668.
- TAMBUTTÉ S., HOLCOMB M., FERRIER-PAGÈS C., REYNAUD S., TAMBUTTÉ É. *et al.*, 2011 – *Coral Biomineralization: from the Gene to the Environment*. *J Exp Mar Biol Ecol*: 58-78, 2011.
- SMITH S. V. and KINSEY D. W., 1976 – *Calcium Carbonate Production, Coral Reef Growth, and Sea Level Change*. *Science* 194: 937-939.
- TAMBUTTÉ S., TAMBUTTÉ É., ZOCCOLA D. and ALLEMAND D., 2008 – *Organic Matrix and Biomineralization of Scleractinian Corals*. In *Handbook of Biomineralization*. Wiley-VCH Verlag GmbH.
- TEEB, 2010– *The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations*. Pushpam Kumar, Earthscan.
- VENN A. A., TAMBUTTÉ É., HOLCOMB M., LAURENT J., ALLEMAND D. *et al.*, 2013 – *Impact of Seawater Acidification on Ph at the Tissue-Skeleton Interface and Calcification in Reef Corals*. *Proc Natl Acad Sci USA* 110: 1634-1639.
- VIDAL-DUPIOL J., ZOCCOLA D., TAMBUTTÉ É., GRUNAU C., COSSEAU C. *et al.*, 2013 – *Genes Related to Ion-Transport and Energy Production Are Upregulated in Response to CO<sub>2</sub>-Driven Ph Decrease in Corals: New Insights from Transcriptome Analysis*. *PLoS One* 8: e58652.
- WEIS V. M. and ALLEMAND D., 2009 – *What Determines Coral Health?* *Science* 324: 1153-1155.
- WELLS S., 2006 – *In The Front Line Shoreline Protection and other Ecosystem Services from Mangroves and Coral Reefs*. UNEP-WCMC Biodiversity Series 24: 1-34.
- WELLS S., 2006 – *Shoreline Protection and other Ecosystem Services from Mangroves and Coral Reefs*. UNEP-WCMC Biodiversity Series 24.



# Biodiversité marine exploitée et changement climatique

Philippe Cury  
(IRD, Sète)

Le changement climatique modifie la productivité des écosystèmes marins et a un impact sur la pêche, alors que la demande de poisson destinée à la consommation humaine augmente, que le poisson est la principale source de protéines animales pour un milliard de personnes et qu'il s'agit de l'une des ressources renouvelables les plus échangées au monde. Les changements des caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer ont un impact sur le métabolisme des individus, sur les cycles de vie des espèces, sur les relations entre les proies et les prédateurs et sur les modifications des habitats. Les répartitions géographiques des poissons (vitesse de déplacement en direction des pôles de  $72,0 \pm 13,5$  km par décennie) ainsi que la dynamique des écosystèmes pourraient subir de profondes perturbations dans les décennies à venir, affectant ainsi les pêcheries au niveau mondial et compromettant la sécurité alimentaire dans nombre de pays du sud. Le maintien des écosystèmes marins en bonne santé et productifs est un enjeu crucial.

## LES ENJEUX DES PÊCHES MARINES

Le changement climatique modifie la productivité des écosystèmes marins et a un impact sur la pêche, notre dernière activité de prélèvements à l'échelle industrielle d'une ressource sauvage sensible aux fluctuations environnementales. La croissance démographique et les changements de comportements alimentaires entraînent une demande croissante de poisson destinée à la consommation humaine. Le poisson est aujourd'hui la principale source de protéines animales pour un milliard de personnes à travers le monde. Elle est aussi l'une des ressources re-

nouvelables les plus échangées au niveau mondial : 28 mt de poissons marins sont destinées aux marchés américains, européens et japonais qui représentent à eux seuls 35 % des captures mondiales avec plus des 2/3 des poissons capturés dans les zones de pêche situées dans les pays du sud (Swartz *et al.* 2010). Dans un contexte de changement climatique il apparaît que les répartitions géographiques des poissons ainsi que la dynamique des écosystèmes vont subir de profondes perturbations dans les décennies à venir et affecter les pêcheries au niveau mondial, compromettant la sécurité alimentaire dans nombre de pays du sud (Lam *et al.* 2012).



## LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA BIODIVERSITÉ MARINE

Les changements de température de l'eau, des teneurs en oxygène, de l'acidification, de la sévérité des événements extrêmes et des propriétés biogéochimiques océaniques influent sur la vie des organismes marins. Ils ont des effets directs ou indirects sur le métabolisme des individus (croissance, respiration, etc), sur les cycles de vie des espèces, sur les relations entre les proies et les prédateurs et sur les modifications des habitats. Ces modifications qui se produisent à la fois au niveau de l'individu, des interactions entre les espèces et des habitats engendrent des changements dans les assemblages d'espèces mais également dans la productivité et la résilience des écosystèmes (Gouletquer *et al.* 2013).

Les bouleversements sont aujourd'hui clairement établis à travers un large éventail de groupes taxonomiques allant du plancton aux grands prédateurs et ils sont en accord avec les approches théoriques de l'impact du changement climatique (Poloczanska 2014). Beaugrand *et al.* démontraient déjà en 2002 que des changements à grande échelle dans la biogéographie des crustacés copépodes calanoïdes dans l'océan Atlantique Nord-Est et les mers continentales européennes se produisaient. Des déplacements vers le nord de plus de 10° de latitude pour des espèces d'eau chaude associés à une diminution du nombre d'espèces d'eau froide étaient reliés à la fois à l'accroissement de la température dans l'hémisphère Nord et à l'oscillation Nord-Atlantique.

Les résultats d'une analyse globale récente montrent que les changements dans la phénologie, la distribution et l'abondance sont très majoritairement (81 %) conformes aux réponses attendues dans un contexte de changement climatique (Poloczanska 2013). Le calendrier de nombreux événements biologiques est ainsi devenu plus précoce concernant l'abondance maximale du phytoplancton et du zooplancton, la reproduction et la migration des invertébrés, des poissons et des oiseaux de mer. Ainsi au cours des cinquante dernières années, les événements du printemps

ont été décalés plus tôt pour de nombreuses espèces avec une progression moyenne de  $4,4 \pm 0,7$  jour par décennie et les événements de l'été de  $4,4 \pm 1,1$  jour par décennie. Pour l'ensemble des groupes taxonomiques, avec toutefois une grande hétérogénéité, on constate que la vitesse de déplacement en direction des pôles atteint  $72,0 \pm 13,5$  km par décennie. Les changements de distribution des espèces benthiques, pélagiques et démersales ont atteint jusqu'à un millier de kilomètres. Ces changements de distribution vers les pôles ont entraîné des augmentations du nombre d'espèces d'eau chaude par exemple dans la mer de Béring, la mer de Barents ou encore la mer du Nord. Ces changements latitudinaux et en profondeur de poissons benthiques et crustacés s'explique principalement grâce aux changements de température (Pinsky *et al.* 2013). Ces vitesses de migration enregistrées en milieu marin apparaissent plus rapides qu'en milieu terrestre.

## L'IMPACT SUR LES PÊCHERIES ET LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE MONDIALE

Poissons et d'invertébrés marins réagissent au réchauffement des océans grâce à des changements de distribution, généralement vers les hautes latitudes et les eaux plus profondes (Cheung *et al.* 2009). Les modifications du potentiel mondial de capture pour 1066 espèces de poissons marins et d'invertébrés exploités entre 2005 et 2055 peuvent être projetées sous différents scénarios de changement climatique. De ces analyses (Cheung *et al.* 2009) il ressort que le changement climatique peut conduire à une redistribution à grande échelle du potentiel global de capture, avec une augmentation moyenne de 30 à 70 % dans les régions de haute latitude et une baisse allant jusqu'à 40 % dans les régions tropicales. Parmi les 20 régions de pêche les plus importantes de la zone économique exclusive (ZEE) en termes de débarquements, régions ZEE avec la plus forte augmentation du potentiel de captures par 2055 sont la Norvège, le Groenland, les États-Unis (Alaska) et la Russie (Asie). Au contraire, les régions ZEE avec la plus grande perte de potentiel de capture maximale comprennent l'Indonésie, les États-Unis (sauf Alaska et Hawaï), le Chili et la Chine. De nom-



breuses régions fortement touchées sont situées dans les tropiques et sont socio-économiquement vulnérables à ces changements.

Des études complémentaires, prenant en compte d'autres facteurs que la température des océans, mettent en évidence la sensibilité des écosystèmes marins aux changements biogéochimiques et la nécessité d'intégrer des hypothèses probables de leurs effets biologiques et écologiques dans l'évaluation des impacts (Cheung *et al.* 2011). Ainsi les projections en 2050 de la distribution et du potentiel de capture de 120 espèces de poissons et d'invertébrés démersaux exploités dans l'Atlantique Nord montrent que l'acidification des océans et la réduction de la teneur en oxygène pourraient réduire les performances de croissance et abaisser les potentiels de capture estimés (moyenne sur 10 ans de 2050 par rapport à 2005) de 20 à 30 % par rapport à des simulations faites sans tenir compte de ces facteurs. Les changements de la structure de la communauté phytoplanctonique pourraient de plus réduire le potentiel de capture projetée de ~ 10 %. Ces résultats mettent en évidence la sensibilité des écosystèmes marins aux changements biogéochimiques (Cheung *et al.* 2011).

Les changements observés sont d'ores et déjà visibles dans la composition spécifique des captures de 1970-2006 qui sont en grande partie attribuables au réchauffement de l'océan à long terme (Cheung *et al.* 2013). Le changement en milieu marin continuera de créer d'énormes défis et des coûts pour les sociétés dans le monde entier, en particulier ceux des pays en développement (Hoegh-Guldberg & Bruno 2010).

## QUE PEUT-ON FAIRE POUR LIMITER LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ÉCOSYSTÈMES MARINS

La meilleure façon de lutter contre les effets du changement climatique est de préserver la biodiversité et éviter la surexploitation des espèces qui est reconnue comme un facteur aggravant les effets du changement climatique (Perry *et al.* 2010). L'approche écosystémique des pêches permet de réconcilier exploitation et conservation des espèces, c'est-à-dire qu'elle vise à maintenir l'intégrité et la résilience des écosystèmes. L'approche écosystémique des pêches contribue ainsi à cet enjeu crucial qu'est le maintien des écosystèmes marins en bonne santé et productifs, tout en proposant une nouvelle façon de considérer l'exploitation halieutique dans un contexte plus large ([www.fao.org/fishery/eafnet](http://www.fao.org/fishery/eafnet)). La nécessité de développer une politique d'adaptation qui pourrait minimiser les impacts du changement climatique par le biais de la pêche doit devenir une priorité. Pour cela il faudra mieux anticiper les changements à l'aide de scénarios (sensu IPBES) et mettre en place les politiques publiques permettant de s'adapter aux changements produits dans les écosystèmes marins. Même si l'impact des changements climatiques restera la plupart du temps inéluctable, l'adaptation des systèmes vivants à des changements rapides reste encore à comprendre et à quantifier, ce qui ouvre de nombreuses perspectives de recherches sur ce thème.

## RÉFÉRENCES

- POLOCZANSKA E. S., HOEGH-GULDBERG O., CHEUNG W., PÖRTNER H.-O. and BURROWS M., 2014 – *Cross-Chapter Box On Observed Global Responses Of Marine Biogeography, Abundance, And Phenology To Climate Change*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- BEAUGRAND G. P., REID C., IBANEZ F., LINDLEY J. A. and EDWARDS M., 2002 – *Reorganization of North Atlantic Marine Copepod Biodiversity and Climate*. *Science*, 296: 1692-1694.
- W. W. L. CHEUNG *et al.*, 2009 – *Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change*. *Global Change Biology* (2010) 16, 24 – 35.



- CHEUNG W. W. L., DUNNE J., SARMIENTO J. L. and PAULY D., 2011 – *Integrating Ecophysiology and Plankton Dynamics into Projected Maximum Fisheries Catch Potential under Climate Change in the Northeast Atlantic*. ICES Journal of Marine Science, 68: 1008 – 1018.
- CHEUNG W., WATSON R. and PAULY D., 2013 – *Signature of Ocean Warming in Global Fisheries Catch*. Nature 497: 365-368.
- GOULLETQUER P., GROS P., BCEUF P. et WEBER J., 2013 – *Biodiversité en environnement marin*. QUAE Editions.
- HOEGH-GULDBERG O. and BRUNO J. F., 2010 – *The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems*. Science, 328, 1523-1528.
- LAM V. W. Y., CHEUNG W.W.L., SWARTZ W. and SUMAILA U. R., 2012 – *Climate Change Impacts on Fisheries in West Africa: Implications for Economic, Food and Nutritional Security*. African Journal of Marine Science, vol. 34, Issue 1, 2012: 103-117.
- PERRY I., CURY P. M., BRANDER K., JENNINGS S., MÖLLMANN C. and PLANQUE B., 2010 – *Sensitivity Of Marine Systems to Climate and Fishing: Concepts, Issues and Management Responses*. Journal of Marine Systems 79: 427 – 435.
- PINKSY M. L., WORM B., FOGARTY M. J., SARMIENTO J. L. and LEVIN S. A., 2013 – *Marine Taxa Track Local Climate Velocities*. Science, 341, 1239-1242.
- SWARTZ W., SUMAILA U.R., WATSON R. and PAULY D., 2010 – *Sourcing Seafood for the Three Major Markets: the Eu, Japan and the Usa*. Marine Policy 34 (6): 1366-1373.



# Aquaculture et changements globaux

Marc Metian  
(IAEA-EL, Monaco)

L'aquaculture, une activité en plein essor, fournit aujourd'hui plus de la moitié des poissons et de crustacés sur les marchés mondiaux. Les changements climatiques mettront en péril certaines productions aquacoles mais leur envergure n'est pas quantifiable actuellement vu l'incertitude des modèles globaux. Une adaptation via l'action des acteurs est également potentiellement réalisable. Les impacts directs seront essentiellement liés à l'évolution des conditions de production en milieu marin comme en zones continentales. Le principal impact indirect sera sans doute lié à la dépendance d'une alimentation exogène pour nourrir les organismes élevés. Cependant, les impacts négatifs (eutrophisation des eaux intérieures, acidification des océans...) et positifs (activités aquacoles dans des zones plus froides, meilleure croissance des organismes élevés...) pourraient s'équilibrer. Les impacts seront variables selon les régions et le type de production.

L'aquaculture, activité de production animale ou végétale en milieu aquatique, est actuellement en plein essor. Cette activité ancestrale, proche de l'agriculture, connaît une croissance exponentielle depuis les années 80 et fournit aujourd'hui plus de la moitié des poissons et de crustacés sur les marchés mondiaux et ce, dans une période où les volumes de pêche stagnent.

L'aquaculture devrait, sans aucun doute, être touchée par les changements climatiques. A travers les différents documents publiés sur ce point<sup>1</sup>, il apparaît clair que les conditions environnementales globales prédites affecteront le secteur aquacole. Il est cependant important de noter que tous les impacts ne seront pas uniquement négatifs. En effet, les changements climatiques vont potentiellement créer des opportunités de développement pour des pays/régions dont la production est actuellement réduite.

À la différence des produits issus de la pêche, l'intervention humaine est présente sur l'ensemble du cycle de vie (mis à part quelques exceptions<sup>2</sup>), ce qui implique qu'une adaptation<sup>3</sup> aux effets des changements climatiques via l'action des acteurs est potentiellement réalisable. Ce sont la sévérité des conditions environnementales, les coûts et les capacités d'adaptation des acteurs de l'activité mais aussi des décideurs nationaux et supranationaux qui feront de ces adaptations une réussite.

## RISQUES DIRECTS DES CHANGEMENTS GLOBAUX SUR L'AQUACULTURE

La production mondiale de l'aquaculture a atteint

<sup>2</sup> Notamment les productions aquacoles basés sur la capture des individus depuis les milieux naturels

<sup>3</sup> Dans le cas d'une production, une adaptation désigne le fait de trouver une solution technique pour pérenniser l'activité malgré les contraintes.

<sup>1</sup> cfr Littérature conseillée



un niveau record en 2012 avec 90,4 millions de tonnes (équivalent poids frais; valeur de 144,4 milliards de US dollars), dont 66,6 millions de tonnes de produits consommables (137,7 milliards de dollars US) et 23,8 millions de tonnes de végétaux aquatiques (principalement des algues; valeur: US\$ 6,4 milliards). Les changements climatiques mettront en péril certaines productions aquacoles mais l'envergure de ces impacts n'est pas quantifiable actuellement en l'absence de modèles globaux prenant en compte l'ensemble des effets directs et indirects des changements globaux. Une chose est sûre, il y aura des effets sur la production qui eux-mêmes se répercuteront sur l'Homme. En effet, la demande du marché mondial pour les produits de la pêche et de l'aquaculture est la plus importante de tous les produits alimentaires d'origine animale (26,85-27,45 millions tonnes vs. 20,38 - 21,99 millions tonnes en 2009). De plus,

Table - Synthèse des conséquences sur les océans et les zones côtières du changement climatique qui affecteront l'aquaculture (d'après Allison *et al.*, 2011) :

- La variation de température
- La variation de la salinité, de la densité et de la stratification des océans,
- La variation des circulations océaniques et des remontées côtières (upwelling)
- L'élévation du niveau de la mer
- Les échanges Terre-Océan
- Les changements dans les variabilités classiques du climat (ENSO)
- L'augmentation de la fréquence et de la gravité des événements climatiques extrêmes
- L'acidification des océans et les changements des propriétés chimiques
- Le timing et le succès des processus physiologiques, de ponte, et de recrutement
- La production primaire
- Les changements dans la distribution des espèces sauvages
- Les changements d'abondance des espèces sauvages
- Les changements phénomenologiques (temps des étapes des cycles de vie)
- Les invasions d'espèces et les maladies
- Les changements de régime et des événements extrêmes

les produits aquacoles constituent des aliments nutritifs pour les pays développés et en développement (viz. contribution à la sécurité alimentaire), et constituent une source de revenus à dans toutes les communautés, indépendamment du niveau de vie. Parmi les conséquences du changement climatique qui affecteront l'aquaculture, les impacts directs seront essentiellement liés à l'évolution des conditions de production. La production moyenne sera ainsi impactée, non seulement en milieu marin (Table 1) mais aussi en zones continentales (eaux douces et saumâtres) où la majorité de la production mondiale est concentrée. Ces zones de production, sont plus sensibles aux changements. À titre d'exemple, il est prévu, que le réchauffement climatique et l'augmentation globale de la température des eaux de surface qui en résulte impacteront bien plus significativement l'aquaculture dans ces zones qu'en milieu marin (viz. changement de la plage de la température optimale des organismes actuellement cultivés).

Cependant, les impacts négatifs et positifs pourraient s'équilibrer. Parmi les impacts positifs des changements climatiques, les modèles scientifiques prédisent notamment une expansion des activités aquacoles vers les zones plus froides, qui devraient ainsi disposer d'une plus large période de dégel, d'une meilleure croissance des organismes élevés, et d'une amélioration de la capacité de conversion alimentaire de ces derniers. Toutefois, les effets positifs mentionnés sont indissociables des autres impacts négatifs qui surviendront également (ex. augmentation de l'eutrophisation dans les eaux intérieures, acidification des océans). Dans les deux cas (effets négatifs ou positifs), la nécessité d'adapter les modes production est à considérer.

## VULNÉRABILITÉS DIVERSES ET TYPES DE PRODUCTION TRÈS VARIÉS

L'aquaculture n'est pas pratiquée de manière uniforme à travers le monde et ce fait doit être considéré pour faire une évaluation pertinente des impacts potentiels du changement climatique. Le changement climatique est susceptible de se manifester à des degrés variables en fonction des zones géographiques avec pour conséquence des



impacts différents. Ainsi, il faut garder à l'esprit que l'aquaculture est principalement présente dans trois régimes climatiques<sup>4</sup> (tropical, subtropical et tempéré), dans trois types d'environnement (mers, eaux douces et eaux saumâtres) et concerne des taxa très variés. Pour ce dernier point, il est clair que certaines espèces seront plus tolérantes que d'autres aux changements et certaines seront plus enclines à subir des changements plus spécifiques (acidification des océans susceptibles d'affecter principalement les organismes calcifiants tels que les bivalves; production de 14 millions de tonnes en 2012).

L'Asie représente à elle seule environ 90 % de la production aquacole mondiale en volume avec la Chine pour principal pays producteur dont la production de poissons représente près des deux tiers de la production mondiale et contribue de manière significative à la nutrition du peuple chinois. La production aquacole asiatique est caractérisée par la diversité des espèces élevées et de systèmes de production utilisés. Cependant, l'aquaculture continentale (eau douce ou saumâtre) domine toujours la production de ce conti-

#### Exemple - Quels seront les impacts du changement climatique sur le secteur de l'aquaculture chinoise ?

En termes de risques, les dernières prévisions du GIEC pour l'Asie de l'Est sont les suivantes :

- Température moyenne annuelle: +3,3°C d'ici 2100
- Possible augmentation des précipitations annuelles totales;
- Augmentation de la variabilité climatique.

Et selon plusieurs auteurs les impacts négatifs liés sur la production de poissons seront les suivants: stress thermique, demande accrue d'oxygène, toxicité des polluants aggravée, incidence plus élevée de maladies pour les poissons. Mais d'une manière plus générale, les habitats de production devraient voir une diminution de la solubilité de l'oxygène de l'eau réchauffée, l'eutrophisation, la stratification, l'approvisionnement en eau incertain, intrusion d'eau salée due à l'élévation du niveau de la mer en ce qui concerne les habitats.

4 On voit que l'aquaculture est prédominante dans les régions climatiques tropicales et subtropicales et géographiquement dans la région asiatique.

ment où la mariculture de poissons reste toujours sous-exploitée alors qu'à l'inverse, d'autres pays/régions se reposent presque exclusivement sur ce type d'aquaculture (ex. Saumon en Norvège).

En Asie, les impacts liés uniquement au réchauffement climatique sont susceptibles d'être essentiellement bénéfiques, entraînant notamment de meilleurs taux de croissance des stocks d'élevage. Mais il ne faut pas occulter le fait que le changement climatique aura un impact sur la disponibilité de l'eau, les conditions météorologiques telles que les événements de pluie extrêmes l'aggravation de l'eutrophisation et la stratification des eaux statiques.

La concentration de l'aquaculture dans certaines zones (viz. Asie et zone tropicale) permet de focaliser le développement de stratégies d'adaptation pour faire face ou atténuer les impacts des changements climatiques dans ces régions, surtout si l'écart prévu entre l'offre et la demande de produits aquatiques destinés à la consommation doit être comblé par l'aquaculture.

Parmi les différents changements globaux, il y en a un qui est régulièrement mis sur le devant de la scène et dont les premiers effets se sont fait déjà ressentir sur la production conchylicole de la côte ouest des États-Unis: l'acidification des océans. Les effets néfastes associés sont, pour l'instant, bien démontrés pour 2 groupes clefs produits en aquaculture: les bivalves et les crustacés. La présence plus importante de CO<sub>2</sub> dissous dans les eaux marines peu agir plus généralement à 3 niveaux sur les organismes marins:

1. La limitation des carbonates disponibles, affectant essentiellement les organismes calcifiants
2. L'augmentation des ions H<sup>+</sup> ce qui se traduit par diminution du pH – l'acidification du milieu proprement dite.
3. L'augmentation de la pression partielle de CO<sub>2</sub> dans les organismes, ce qui se traduirait par une hyperacnie.

L'impact socio-économique sera non négligeable notamment sur la production de crustacés. En effet, en 2012, les crustacés d'élevage représentaient 9,7 % (6,4 millions de tonnes) du volume de la production de l'aquaculture destinée à la consom-



mation humaine mais 22,4 % (US \$ 30,9 milliards) en valeur. La production de mollusques (15,2 millions de tonnes), bien que plus de deux fois supérieure à celle des crustacés, ne représentait que la moitié de sa valeur. Il existe des tentatives pour faire face aux impacts des changements climatiques sur les différents systèmes de culture notamment l'utilisation de cages ou de systèmes fermés.

## RISQUES INDIRECTS DES CHANGEMENTS GLOBAUX SUR L'AQUACULTURE

Les impacts des changements climatiques ne se limitent pas à l'environnement de production. Les conditions seront propices notamment à la remobilisation de contaminants non-biodisponibles à l'heure actuelle, à l'émergence de maladies, à l'efflorescence accrue d'algues toxiques, à la disparition d'espèce-clefs (ex. phytoplancton pour les organismes filtreurs) ou à l'inverse l'apparition d'espèces néfastes dans le milieu de culture.

Néanmoins, le principal impact indirect des changements climatiques sur l'aquaculture sera sans doute lié à la dépendance d'une alimentation exogène pour nourrir les organismes élevés. En effet, 70 % de la production aquacole mondiale dépend de l'apport d'aliments externes. L'approvisionnement et la production des matières premières, issues de l'agriculture et de la pêche minière, dont les aliments aquacoles sont composés seront touchés par changements climatiques.

Les impacts négatifs sont susceptibles de se faire sentir principalement dans les régions tempérées, où la pisciculture est entièrement basée sur les espèces carnivores mais toucheront également d'autres zones car les farines de poissons constituent des intrants utilisés par la grande majorité des pays impliqués dans la production aquacole.

Les changements récents dans la distribution et la productivité d'un certain nombre d'espèces de poissons peuvent être attribués avec une grande confiance à la variabilité du climat régional, comme le El Nino-oscillation australe. Il y a de fortes interactions entre les effets de la

pêche et les effets du climat. La fréquence et l'intensité des événements climatiques extrêmes sont également susceptibles d'avoir un impact majeur sur la production de la pêche et donc indirectement sur l'aquaculture.

Les impacts indirects sur un phénomène et ou d'un secteur de la production peuvent être subtils, complexes et difficiles à identifier constituant un véritable défi dans le développement de mesures en vue de s'adapter aux changements climatiques. Il existe une relation étroite et interdépendante entre la pêche et l'aquaculture. Cette relation s'illustre au travers de l'apport de certains intrants utilisés en aquaculture par pêche et notamment des farines et huiles de poissons ou, dans une moindre mesure, des juvéniles des organismes. Les impacts des changements climatiques sur les pêcheries mondiales auront donc des effets sur les systèmes d'aquaculture.

## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Des solutions pour que l'aquaculture puisse faire face aux changements climatiques existent ou existeront. La résilience de l'aquaculture *sensus lato* face aux chocs inattendus a déjà fait ses preuves. On peut citer notamment le court laps de temps qu'il a fallu à une grande partie de l'Asie pour changer d'espèce de crevettes lorsqu'une espèce était fortement atteinte par un virus (et que cette dispersion fut régionalement importante) ou la rapidité avec laquelle certains pays touchés par des événements climatiques dévastateurs se sont remis à la production à des niveaux quasi similaire très rapidement.

Mais malgré ces avantages, le secteur aquacole doit se préparer. Des avancements dans le développement de modèles de prédictions doivent être faits, surtout, en considérant les stress multiples qui résulteront des changements climatiques. Des avancements sur la sélection d'espèces qui seront les plus aptes à faire face aux conditions modélisées (aux stress multiples) doivent aussi être réalisés et des solutions d'adaptation doivent être conceptualisées sur les pratiques de culture afin de pallier aux conditions néfastes qui sont prédites. Dans le même temps, Il est important que l'évo-



lution des pratiques d'aquaculture soit le plus possible respectueuses de l'environnement, ce qui comprend l'utilisation efficace des ressources comme l'eau, la terre, l'énergie et les nutriments dans les systèmes agricoles. Des améliorations dans la formulation des aliments utilisés sont en cours et devront être effectuées, notamment, en ce qui concerne sur l'inclusion des ressources marines comme ingrédients (réduction ou alternatives comme des coproduits provenant des usines de filetage de poisson). Une aquaculture, plus respectueuse de l'environnement, peut aussi passer par la mise en place de programme de certification et même si des programmes existent, des débats sont actuellement en cours à ce sujet de la notion d'aquaculture durables. Il est à noter à ce sujet que la situation actuelle n'est pas si mauvaise que ce qui est relayé par les médias car même si elle n'est pas encore parfaite, la production aquacole est globalement plus efficace énergiquement et en termes de facteurs de conversion (aliment – produit) que les autres systèmes de productions animales terrestres et est relativement moins dégradantes pour l'environnement

que ces homologues agricoles. Ces conclusions sont presque toujours basées sur l'aquaculture des produits de grande valeur tels que les espèces de crevettes et de poissons carnivores tels que les salmonidés et ont créé des fausses perceptions chez les publics, planificateurs, promoteurs et investisseurs. La réalité est que la grande majorité de l'aquaculture est encore tributaire du poisson et de mollusques d'alimentation situés en bas de la chaîne alimentaire et des macroalgues sont aussi produites et ont le potentiel d'agir comme des puits de carbone et de l'aide dans la séquestration du carbone.

Enfin, même si beaucoup d'incertitudes demeurent sur l'amplitude des impacts des changements climatiques sur l'aquaculture et sur les capacités d'adaptation du secteur, l'aquaculture sera touchée mais il faut agir pour permettre la pérennisation de l'activité dont la population sera de plus en plus dépendante.

## RÉFÉRENCES RECOMMANDÉES

- ALLISON E. H., BADJECK M.-C. and MEINHOLD K., 2011 – *The Implications of Global Climate Change for Molluscan Aquaculture, in Shellfish Aquaculture and the Environment*. Wiley-Blackwell, Oxford.
- BRANDER K. M., 2007 – *Global Fish Production and Climate Change*. PNAS 104 (50): 19709 – 19714.
- COCHRANE K., DE YOUNG C., SOTO D. and BAHRI T., 2009 – *Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture: Overview of Current Scientific Knowledge*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, n° 530. Rome.
- DE SILVA S. S. and SOTO D., 2009 – *Climate Change and Aquaculture: Potential Impacts, Adaptation and Mitigation*. In *Climate Change Implications for Fisheries and Aquaculture. Overview of Current Scientific Knowledge*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pp. 151–212.
- DONEY S. C., FABRY V. J., FEELY R. A. and KLEYPAS J. A., 2009 – *Ocean Acidification: the Other CO<sub>2</sub> Problem*. Annual Review of Marine Science 1: 169 – 192.
- FAO, 2014 – *The State of World Fisheries and Aquaculture*. FAO Fisheries and Aquaculture Department, Rome.
- HANDISYDE N. T., ROSS L. G., BADJECK M.-C. and ALLISON E. H., 2006 – *The Effects of Climate Change on World Aquaculture: a Global Perspective. Final Technical Report*. DFID Aquaculture and Fish Genetics Research Programme, Stirling Institute of Aquaculture, Stirling, [www.aqua.stir.ac.uk/GISAP/climate/index.htm](http://www.aqua.stir.ac.uk/GISAP/climate/index.htm).
- MERINO G., BARANGE M., BLANCHARD J. L., HARLE J., HOLMES R., ALLEN I., ALLISON E. H., BADJECK M. C., DULVY N. K., HOLT J., JENNINGS S., MULLON C. and RODWELL L. D., 2012 – *Can Marine Fisheries and Aquaculture Meet Fish Demand from a Growing Human Population in a Changing Climate?* Global Environmental Change 22: 795 – 806.
- MERINO G., BARANGE M. and MULLON C., 2010 – *Climate Variability and Change Scenarios for a Marine Commodity: Modelling Small Pelagic Fish, Fisheries and Fishmeal in a Globalized Market*. Journal of Marine Systems 81: 196 – 205.
- TROELL M. *et al.*, 2014 – *Does Aquaculture Add Resilience to the Global Food System?* Proceedings of the National Academy of Sciences 111 (37): 13257 – 13263.



- TACON A. G. J., METIAN M. and DE SILVA S. S., 2010 – *Climate Change, Food Security and Aquaculture: Policy Implications for Ensuring the Continued Green Growth & Sustainable Development of A Much Needed Food Sector*. In *Proceeding of the Workshop on Advancing the Aquaculture Agenda: Policies to Ensure a Sustainable Aquaculture Sector*. French Ministry for Food, Agriculture and Fisheries and OECD.
- TACON A. G. J. and METIAN M., 2008 – *Global Overview on the Use of Fish Meal and Fish Oil In Industrially Compounded Aquafeeds: Trends and Future Prospects*. *Aquaculture* 285 (1-4): 146-158.



# Les petites îles, l'océan et le climat

Virginie Duvat,  
(LIENSs, La Rochelle)  
Alexandre Magnan,  
(IDDRI, Paris)  
Jean-Pierre Gattuso  
(CNRS UPMC,  
Villefranche-sur-Mer)

Les caractéristiques physiques des petites îles (surface émergée limitée, plaines réduites, forte exposition aux aléas météo-marins) et humaines (forte dépendance vis-à-vis des activités de subsistance et des écosystèmes) expliquent leur vulnérabilité aux changements environnementaux (modification des conditions océaniques et aléas météo-marins). Elles sont devenues des figures emblématiques des processus associés au changement climatique : élévation du niveau de la mer, intensification des cyclones, réchauffement des eaux océaniques, et acidification de l'océan. De grandes menaces pèsent donc sur les systèmes insulaires, bien que ceux-ci y répondront de manière très diversifiée : réduction de la surface des îles, recul du trait de côte, dégradation des récifs coralliens et des mangroves, etc. Les répercussions sur les ressources terrestres (sols, eau, faune et flore) et marines (ressources récifales et halieutiques) auront des impacts majeurs sur les moyens de survie des sociétés insulaires. Celles-ci vont donc devoir relever un défi considérable.

Les petites îles, qu'elles appartiennent ou non à un archipel, et quel que soit leur statut politique<sup>1</sup>, sont confrontées à un ensemble de contraintes inhérentes à leur petite taille (de quelques milliers de km<sup>2</sup> de surface à moins de 1 km<sup>2</sup>) et à leur éloignement géographique par rapport aux principaux centres d'activité mondiaux (peu d'économies d'échelles, par exemple, ce qui nuit à leur compétitivité, au système éducatif, etc.). En particulier, leurs caractéristiques physiques (surface émergée limitée, plaines réduites, forte exposition aux aléas météo-marins) et humaines (forte dépendance vis-à-vis des activités de subsistance et des écosystèmes) expliquent leur forte sensibilité aux changements environnementaux et leur exposition aux catastrophes naturelles. De telles caractéristiques génèrent vite des enchaînements d'impacts qui, dans des

contextes continentaux, sont en général davantage dilués dans l'espace et dans le temps (Duvat et Magnan 2012). Les petites îles sont donc des systèmes territoriaux à la fois vulnérables et réactifs, ce qui les place en première ligne des impacts des modifications environnementales liées à la surconcentration de gaz à effet de serre d'origine anthropique dans l'atmosphère, notamment celles qui affectent l'océan global (réchauffement des eaux de surface + acidification). Les représentants politiques de ces territoires les présentent d'ailleurs souvent comme « les premières victimes du changement climatique ». Toutefois, les menaces qui pèsent sur les petites îles ne sont pas si marginales, puisqu'elles sont d'une certaine manière les mêmes que celles qui pèsent sur la grande majorité des littoraux de la planète. L'on peut donc apprendre de la situation de ces terres du minuscule, au-delà de leurs spécificités.

Ce texte suit une logique simple, celle de la chaîne des impacts qui part des processus phy-

<sup>1</sup> État indépendant comme les Maldives ou l'île Maurice; État en libre association avec l'ancienne puissance coloniale, comme les îles Marshall (États-Unis) ou les îles Cook (Nouvelle-Zélande); territoire ultramarin d'un territoire plus vaste, comme les Outre-Mer français, par exemple.



siques climatiques et océaniques, pour aller jusqu'aux conséquences sur les écosystèmes et sur les ressources des systèmes insulaires. Cela nous conduit à aborder plus globalement la question des changements environnementaux et de leur lien avec le processus de « mal-développement »<sup>2</sup>, pour conclure sur quelques messages-clés.

## LES PROCESSUS PHYSIQUES À L'ŒUVRE

Les nations insulaires tirent la sonnette d'alarme depuis la fin des années 1980 : les changements environnementaux liés à l'évolution du climat, qu'il s'agisse de la dégradation progressive de ressources vitales telle que l'eau douce ou de la survenue d'événements extrêmes dévastateurs comme les cyclones, posent la question de leur viabilité à l'horizon de quelques décennies. Ainsi les petites îles sont-elles devenues des figures emblématiques des menaces associées au changement climatique, voire des métaphores du défi environnemental auquel l'Humanité moderne est confrontée, « seule sur sa petite planète » (Diamond 2006). Il y a des raisons scientifiques fondées à un tel diagnostic, qui sont directement liées aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre depuis près de 150 ans, et que l'on peut classer en quatre catégories : l'élévation du niveau de la mer, les événements extrêmes, le réchauffement des eaux océaniques, et l'acidification de l'océan mondial.

### L'élévation du niveau de la mer

Quand on s'intéresse aux petites îles, l'élévation du niveau de la mer est sans aucun doute la conséquence du changement climatique la plus médiatisée, avec des discours catastrophistes qui, mal connectés aux prudentes conclusions scientifiques, annoncent pour les uns la disparition prochaine des îles les plus basses (en particulier des Maldives, de Kiribati et de Tuvalu) et, pour les autres, la submersion des plaines côtières qui concentrent populations et activités économiques. Si de telles affirmations doivent être

nuancées, car les réponses des systèmes insulaires aux pressions climatiques seront nécessairement diversifiées, une chose est en revanche sûre : le niveau de la mer monte depuis plus d'un siècle en raison du changement climatique d'origine anthropique. Pourquoi ? Parce que l'augmentation de la température des basses couches de l'atmosphère engendre d'une part, le réchauffement des eaux océaniques de surface, qui a pour effet leur dilatation, et d'autre part, la fonte des glaces continentales (glaciers de montagne, calottes arctiques et antarctiques). Combinés, ces deux mécanismes se traduisent par une augmentation du volume d'eau de l'océan, lequel tend en quelque sorte à « déborder ». Le rythme d'élévation du niveau marin a été de 17 cm en moyenne à l'échelle du globe sur l'ensemble du XX<sup>e</sup> siècle, soit environ 1,7 mm/an (Church *et al.* 2013).

Les travaux scientifiques récents mettent en évidence deux éléments. D'abord, le fait que l'océan ne monte pas partout à la même vitesse : l'océan Indien oriental et le Pacifique central, notamment, connaissent des vitesses d'élévation particulièrement élevées, avec des valeurs qui atteignent par exemple +5 mm/an à Funafuti (Tuvalu) (Becker *et al.* 2012). En second lieu, la communauté scientifique rappelle que l'élévation du niveau de la mer, qui s'est accélérée depuis le début des années 1990<sup>3</sup>, va continuer à le faire au cours du siècle à venir. On attend en effet une hausse moyenne du niveau des océans de +45 à +82 cm d'ici à 2100 pour le scénario de projection le plus pessimiste<sup>4</sup> (Church *et al.* 2013). Et cette tendance est pour partie irréversible en raison des phénomènes de latence qui caractérisent les processus océaniques et atmosphériques, et qui expliquent que le niveau de la mer continuera à monter au minimum pendant plusieurs siècles même si l'on arrêta demain d'émettre tout gaz à effet de serre (Solomon *et al.* 2009, Levermann *et al.* 2013).

<sup>3</sup> +3,2 mm/an en moyenne mondiale entre 1993 et 2010 (Church *et al.* 2013).

<sup>4</sup> Les modélisations qui sont à la base du dernier rapport du GIEC ont considéré 4 grands scénarios de concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à l'horizon de la fin de ce siècle. Ces scénarios sont les « Representative Concentration Pathways » (RCP), qui vont du RCP2.6 pour le plus optimiste, au RCP8.5 pour le plus critique.

<sup>2</sup> Terme qui traduit le caractère non durable des modes de développement actuels.



Les conséquences de cette élévation accélérée du niveau de la mer seront d'autant plus sérieuses sur les petites îles que celles-ci ont un indice côtier élevé (part du trait de côte par rapport à la superficie du territoire) et que leurs populations et activités se concentrent en général dans la zone côtière. À l'évidence, la situation des îles basses (atolls) est particulièrement préoccupante, comme nous le verrons plus loin à partir de l'exemple de l'archipel de Kiribati (Pacifique Central).

Les Nations unies ont ainsi adopté dès 1989 une résolution spécifique sur les effets négatifs de l'élévation du niveau de la mer sur les îles et zones côtières, reconnaissant ainsi officiellement la forte vulnérabilité de ces territoires face au changement climatique. Quelques années plus tard, la Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement (Sommet de la Terre, Rio, 1992) insistait à nouveau sur le cas particulier des petites îles. Très récemment, début septembre 2014, s'est tenue à Samoa la troisième Conférence internationale des Nations unies sur les petits États insulaires en développement, dont l'un des thèmes-clés portait sur le changement climatique et, plus particulièrement, sur l'élévation du niveau de la mer.

### **Les événements extrêmes: cyclones, houles distantes et phénomène El Niño**

Bien que notre compréhension des interactions entre l'océan et l'atmosphère soit partielle et limite notre capacité à modéliser certains phénomènes climatiques, donc à réaliser des projections sur l'évolution des phénomènes extrêmes (tempêtes et phénomène El Niño), il faut s'attendre à ce que les pressions que ces derniers exercent sur les petites îles augmentent.

Les cyclones tropicaux possèdent une puissance supérieure à celle des dépressions tempérées, avec des vents dont la vitesse peut dépasser 350 km/h. Ces vents sont destructeurs pour la végétation, les infrastructures et les bâtiments. Les cyclones s'accompagnent aussi souvent de fortes pluies (jusqu'à 1 500 mm en 24 h) qui font déborder les cours d'eau et peuvent provoquer des inondations catastrophiques. À ces effets stric-

tement météorologiques, s'ajoutent sur le littoral les impacts des vagues cycloniques, lesquelles sont d'autant plus destructrices que les cyclones s'accompagnent d'une surcote marquée<sup>5</sup>. Les conséquences de la submersion d'origine marine (vagues + surcote) sont bien entendu amplifiées lorsque celle-ci se couple à des inondations venues des cours d'eau intérieurs. Les vagues cycloniques, qui atteignent fréquemment 4 à 6 m de hauteur à la côte, peuvent également être à l'origine de pics d'érosion marqués (recul du trait de côte de 10 à 15 m, abaissement du niveau des estrans) ou, au contraire, d'un fort engraissement des côtes sous l'effet de l'accumulation de sable et blocs de corail arrachés au récif corallien (Etienne 2012).

Si au regard de la complexité des processus en jeu, il est difficile à ce stade de dire comment les cyclones, et donc leurs impacts sur les petites îles, vont évoluer sous l'effet du changement climatique, l'on peut néanmoins retenir, sur la base du dernier rapport du GIEC, que: (i) leur fréquence n'augmentera pas forcément à l'avenir; (ii) les cyclones les plus intenses devraient s'intensifier; (iii) les trajectoires, donc les aires d'impacts des cyclones, ont une forte probabilité d'évoluer à l'avenir. Sur ces bases et en dépit des incertitudes qui subsistent sur l'évolution des cyclones, l'on doit s'attendre à une augmentation des impacts destructeurs des cyclones dans les petites îles: premièrement, parce que l'élévation du niveau de la mer permettra aux vagues cycloniques de se propager plus loin à l'intérieur des terres; et en second lieu, parce que l'intensification des cyclones les plus forts accroîtra d'autant leurs effets destructeurs sur les côtes. Par exemple, là où les cyclones sont déjà à l'origine de pics d'érosion, l'érosion devrait s'accélérer.

Par ailleurs, l'évolution des tempêtes des zones tempérées (nord et sud) et des hautes latitudes, qui reste difficile à prévoir, aura aussi des impacts sur l'évolution des risques liés à la mer en milieu insulaire. En effet, il est désormais clairement établi que les houles puissantes que produisent ces tem-

---

<sup>5</sup> Élévation anormale du niveau de la mer sous l'effet de la diminution de la pression atmosphérique (-1 mb = +1 cm) et de la poussée de vent (accumulation d'eau sur le littoral), qui s'ajoutent aux vagues elles-mêmes (flux et reflux sur le littoral).



pêtes se propagent sur de grandes distances à travers l'océan et causent des dégâts importants sur des territoires insulaires éloignés de plusieurs milliers de kilomètres de leur zone de formation (Nurse *et al.* 2014). Celles de décembre 2008 en particulier ont engendré d'importants dégâts dans de nombreux États du Pacifique occidental, comme la République des Îles Marshall, les États-Fédérés de Micronésie et la Papouasie-Nouvelle Guinée (Hoeke *et al.* 2013).

Enfin, à ce jour, il est tout aussi difficile de prévoir l'évolution du phénomène El Niño alors que quatre de ses manifestations au moins perturbent fortement les milieux insulaires. Premièrement, les variations importantes des températures océaniques de surface qui se produisent pendant les épisodes El Niño se traduisent dans certaines régions par des pics thermiques marqués. Ceux-ci sont à l'origine de phénomènes de blanchissement corallien<sup>6</sup> dévastateurs (95 à 100 % de mortalité corallienne aux Maldives et aux Seychelles en 1997-1998). En deuxième lieu, les épisodes El Niño se traduisent par une augmentation des cyclones dans certaines régions peu exposées à ces phénomènes, comme c'est le cas de l'archipel des Tuamotu en Polynésie Française : alors que la fréquence des cyclones y est de 1 phénomène tous les 20 à 25 ans, 5 cyclones sont passés sur les îles du nord-ouest de cet archipel en l'espace de 6 mois pendant l'épisode El Niño 1982-1983 (Dupont 1987). En troisième lieu, le phénomène El Niño engendre de fortes perturbations du régime pluviométrique, provoquant des pluies diluviennes dans certaines régions (centre et est du Pacifique) et des sécheresses marquées dans d'autres (ouest du Pacifique, avec de forts impacts à Kiribati et dans les Îles Marshall, par exemple). Certains archipels, comme ceux du sud de Kiribati par exemple, peuvent alors connaître des sécheresses d'une durée de 1 à 2 ans. En dernier lieu, les épisodes El Niño s'accompagnent d'une élévation anormale du niveau marin de 30 à 40 cm dans le Pacifique occidental, ce qui provoque des submersions importantes sur les îles

<sup>6</sup> Lorsque le seuil de tolérance thermique des coraux, qui avoisine 30°C, est dépassé, les coraux expulsent les zooxanthelles (algues symbiotiques qui assurent la photosynthèse et une partie de la nutrition des coraux), blanchissent et sont susceptibles de mortalité massive. Un blanchissement prolongé peut aboutir à la mort des récifs.

de cette région, notamment lorsque ces niveaux marins anormalement hauts se conjuguent avec des houles de tempête. L'évolution du phénomène El Niño intéresse donc tout particulièrement les milieux insulaires.

### **Le réchauffement de l'océan**

L'augmentation de la température des eaux océaniques de surface est un autre problème, qui va se combiner aux précédents. Une très large majorité de l'énergie accumulée par le système climatique est stockée dans l'océan, si bien que les premiers 75 m d'eau se sont réchauffés de 0,11°C par décennie entre 1971 et 2010 (Rhein *et al.* 2013). Un réchauffement substantiel est désormais également nettement mesurable jusqu'à 750 m de profondeur au moins (Arndt *et al.* 2010). Les conséquences de telles modifications seront majeures dans les zones hauturières : migration d'espèces, notamment celles qui sont pêchées, perturbation des échanges d'oxygène, etc. Les conséquences seront également importantes sur les zones côtières, avec de forts impacts sur les récifs coralliens, qui sont très sensibles aux hausses de température. L'augmentation graduelle des températures océaniques de surface, combinée à la survenue de pics thermiques destructeurs se produisant pendant les épisodes El Niño, fait redouter une hausse de fréquence des phénomènes de blanchissement, voir leur persistance (Hoegh-Guldberg 2011, Gattuso *et al.* 2014a). Cela pourrait conduire à la disparition de nombreuses espèces.

### **L'acidification de l'océan**

La pollution par les gaz à effet de serre a commencé à générer, en parallèle du changement climatique, une augmentation de la teneur des eaux océaniques en CO<sub>2</sub> dissous, plus connue sous le nom d'acidification de l'océan (Gattuso et Hansson 2011). L'acidification des océans, c'est donc « l'autre problème du CO<sub>2</sub> » (Turley 2005, Doney *et al.* 2009). Les océans ont en effet absorbé environ un tiers du CO<sub>2</sub> anthropique depuis la révolution industrielle. Or, l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'eau de mer diminue son pH, la rendant plus acide. Les projections pour le XXI<sup>e</sup> siècle annoncent des réductions du pH moyen à l'échelle mondiale, lequel pourrait être de 7,8 en 2100 (Ciais *et al.* 2013) par rapport à 8,18 avant l'ère industrielle et 8,10 maintenant.



Ce phénomène a d'ores et déjà, et il continuera d'avoir, de lourdes répercussions sur la chimie de base de l'océan, puis par effet domino, sur les organismes (diminution de calcification chez de nombreux organismes à squelette ou coquille calcaire) et les écosystèmes (Pörtner *et al.* 2014, Gattuso *et al.* 2014b, Howes *et al.* In Press). Ainsi les spécialistes estiment-ils que les conséquences de l'acidification sur les coraux deviendront très importantes au-dessus d'une concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique de 500 ppm (Hoegh-Guldberg *et al.* 2014)<sup>7</sup>.

La vulnérabilité future des petites îles aux changements climatiques et océaniques va donc en grande partie dépendre de l'évolution de ces quatre facteurs de pression (niveau de la mer, événements extrêmes, réchauffement et acidification de l'océan). Or, dans ces systèmes insulaires réactifs parce que très dépendants des conditions environnementales, l'acidification combinée au réchauffement des eaux de surface, aura d'autant plus d'impacts négatifs que les écosystèmes côtiers (récifs, mangroves, etc.) sont d'ores et déjà soumis à de fortes pressions d'origine anthropique, qui se traduisent déjà dans certains cas par d'importantes dégradations de leurs fonctions. Il en va de même pour les menaces portées par l'élévation du niveau de la mer et la survenue de cyclones tropicaux plus intenses: plus les systèmes naturels côtiers ont été perturbés, parfois de manière irréversible, plus leurs capacités naturelles d'adaptation seront amputées dans le futur, et plus les impacts des événements extrêmes et des changements plus graduels seront importants. Ainsi, la non durabilité de nos modes de développement actuels (dégradation des écosystèmes marins et côtiers, déconnection des sociétés modernes vis-à-vis des contraintes environnementales, aménagement de zones exposées aux aléas, etc.) sont au cœur des menaces que le changement climatique fait peser sur les littoraux, notamment insulaires (Duvat et Magnan 2014).

<sup>7</sup> Le seuil de concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique de 400 ppm a été franchi en mai 2013 à la station de mesure de l'observatoire Mauna Loa (Hawaïi). À cette même station, il était par exemple de 386 ppm en 2009.

## IMPACTS ET VULNÉRABILITÉ DES PETITES ÎLES

Il faut entrer désormais davantage dans le détail des impacts combinés de l'élévation du niveau de la mer, des événements extrêmes, du réchauffement et de l'acidification de l'océan, pour comprendre pourquoi les petites îles sont en première ligne des changements environnementaux à venir.

### Quels impacts attendre ?

Bien que les modèles climatiques ne fournissent pas encore de scénarios d'évolution précis à l'échelle des différentes sous-régions océaniques, les projections dont nous disposons, complétées de la compréhension que nous avons des réponses des systèmes insulaires à différents types de pressions naturelles et anthropiques, permettent de déterminer les principaux impacts qu'aura le changement climatique sur ces milieux. L'on abordera successivement ses effets sur l'évolution des îles et de leurs principaux écosystèmes littoraux, récifs coralliens et mangroves.

### *La réduction de la surface des îles et le recul du trait de côte*

Il est impossible de prévoir la réponse des systèmes insulaires aux pressions associées au changement climatique en raison de la multitude des facteurs en jeu, tant naturels (réserves sédimentaires, impacts des tempêtes, réponses des récifs coralliens aux pressions associées au changement climatique, etc.) qu'anthropiques (interférence des aménagements avec le fonctionnement du littoral, impacts des activités humaines et politiques publiques, etc.), et de la complexité de leurs interactions. Ceci étant, l'on peut s'attendre, à l'échelle des prochaines décennies, à une diminution de la superficie des îles, en particulier coralliennes. Un pays comme les Maldives, dont 80 % de la surface émergée se situe à moins de 1 m d'altitude, verra en effet très probablement sa superficie se réduire significativement sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer. Mais ce facteur de pression aura, comme les autres facteurs de pression (fréquence et intensité des tempêtes, dégra-



dation de l'état de santé des récifs coralliens, etc.), des impacts variables d'une île à l'autre, en fonction du contexte géomorphologique et humain. Par exemple, les îles déjà affectées par l'érosion ou dont le littoral est fortement aménagé ne bénéficieront d'aucun mécanisme naturel d'exhaussement leur permettant de s'ajuster à l'élévation du niveau marin. Car pour qu'un tel mécanisme d'ajustement se produise, il faut qu'existe, non seulement un réservoir sédimentaire sous-marin susceptible d'alimenter les côtes, mais aussi un espace libre de tout aménagement le long du littoral sur lequel puissent s'accumuler les sédiments. Or, ces deux conditions ne sont actuellement réunies que dans un nombre limité d'îles habitées. En revanche, un tel mécanisme d'ajustement naturel fonctionnera probablement sur certaines îles peu ou pas aménagées.

De la même manière, sur la frange côtière des îles hautes, les terres basses seront progressivement gagnées par la mer là où aucun phénomène d'accrétion n'engendrera leur exhaussement ou leur extension vers le large. À moins que des interventions techniques, telles que des travaux de remblaiement, ne s'y opposent et permettent de maintenir ces espaces au-dessus du niveau de la mer.

Dans certains cas, la réduction de la surface des îles basses remettra probablement en cause leur viabilité, car leurs ressources deviendront insuffisantes pour subvenir aux besoins de leurs habitants. Les plaines côtières des îles hautes seront elles aussi soumises à des pressions climatiques dont les impacts sur les sociétés seront d'autant plus forts que la pression démographique est élevée et que les systèmes vivriers sont développés (Nurse *et al.* 2014).

Ainsi l'évolution des îles coralliennes et des plaines côtières variera-t-elle d'un lieu à un autre en fonction d'un grand nombre de facteurs, dont les évolutions ne sont pas forcément prévisibles.

### Des récifs coralliens menacés

Le comportement des récifs coralliens jouera un rôle déterminant dans la réponse de nombreuses îles aux effets du changement clima-

tique. Or, le devenir des récifs dépend lui-même de la combinaison de divers facteurs, dont les principaux sont le rythme d'élévation du niveau de la mer, la température des eaux océaniques de surface, le rythme d'acidification des eaux océaniques, la vitalité actuelle des coraux et leur capacité à résister aux perturbations, et le degré d'affaiblissement de leur résilience par les activités humaines (Gattuso *et al.* 2014). Les vitesses d'élévation du niveau de la mer annoncées pour les prochaines décennies permettent théoriquement aux coraux de compenser par leur croissance le relèvement du niveau de l'océan, car ils peuvent croître de 10 à 25 mm/an. Au cours de la dernière remontée du niveau de la mer, la grande majorité des récifs ont suivi pas à pas (croissance continue) ou après un temps de retard (croissance retardée) le relèvement du niveau de l'océan. Mais ces divers éléments restent théoriques, car en réalité, le comportement des coraux dépendra des conditions écologiques qui régneront dans les différentes régions océaniques. Là où l'état du récif est bon, les coraux pourront éventuellement suivre l'élévation du niveau de la mer, mais là où elles se dégraderont de manière significative, ils pourraient être amenés à disparaître. Différents facteurs, globaux à locaux, déterminent la qualité des conditions écologiques. Au niveau global, elles vont se dégrader en raison de l'acidification des océans qui, nous l'avons vu, a pour effet de réduire la vitesse de calcification des organismes à squelette calcaire et, du même coup, la résistance de ces organismes aux facteurs de pression naturels et anthropiques.

Aux échelles régionale et locale, les principaux facteurs d'influence du comportement des coraux sont les températures de surface (moyennes et variations intra et interannuelles), le pH, les tempêtes et le degré de perturbation du milieu par l'homme. En ce qui concerne le blanchissement des colonies coralliennes, les modèles développés pour Tahiti (Polynésie française) sur la période 1860-2100 montrent que les températures de surface sont restées inférieures au seuil critique<sup>8</sup> jusqu'en 1970, ce qui signifie

<sup>8</sup> Bien que la température maximale tolérée par les coraux varie d'une région à une autre - elle est notamment plus



qu'aucun épisode de blanchissement ne s'est produit jusque-là (Hoegh-Guldberg 1999). Depuis cette date, à partir de laquelle l'augmentation des températures océaniques de surface liée au changement climatique est avérée, la température de l'océan dépasse systématiquement ce seuil pendant les épisodes El Niño, produisant un phénomène de blanchissement. À partir de l'évolution prévisible des températures océaniques, ces modèles prévoient une fréquence de blanchissement annuelle à partir de 2050, qui pourrait remettre en cause la capacité des coraux à se maintenir. L'augmentation de la fréquence de ces épisodes pourrait ne plus laisser le temps aux récifs coralliens de se régénérer entre deux pics thermiques. Mais ceci reste une hypothèse, car les réactions des récifs coralliens varient d'une région à une autre en fonction de la circulation océanique et de la profondeur : les récifs peu profonds sont en général plus affectés par les pics thermiques et moins résilients que ceux qui se développent dans un environnement plus océanique (profondeurs élevées proches et échanges intenses avec la masse d'eau océanique). À l'échelle locale également, les réponses des différentes espèces de coraux diffèrent. Une même espèce ne réagit d'ailleurs pas de manière identique à deux stress thermiques de même intensité, comme l'ont montré les suivis réalisés en 1996, 1998 et 2002 sur les récifs coralliens du Golfe Arabo-Persique (Riegl 2007). Celui de 1996 a complètement décimé les coraux branchus du genre *Acropora*, qui se sont réinstallés rapidement et n'ont pas été touchés en 2002. Cela semble indiquer que les coraux possèdent une certaine capacité d'adaptation. Les observations qui ont été réalisées dans le Pacifique oriental aboutissent aux mêmes conclusions. L'épisode El Niño de 1982-83 y a été plus destructeur que celui de 1997-98, ce qui conduit à l'hypothèse que les crises sélectionnent les individus les plus résistants (Glynn *et al.* 2001). La résilience des coraux dépend également de leur degré d'affaiblissement par des maladies, dont les pics thermiques favorisent le développement dans certaines régions

(Caraïbe, par exemple). En dernier lieu, la résistance et la résilience des coraux dépendent largement du degré de perturbation anthropique. Or, l'on estime aujourd'hui qu'à l'échelle du globe, 30 % des récifs coralliens sont très dégradés et 60 % sévèrement menacés à l'horizon 2030 (Hughes *et al.* 2003). Les pressions anthropiques qui s'exercent sur les récifs vont probablement se renforcer dans les systèmes insulaires en raison d'une croissance démographique généralement forte.

Pourquoi accorder autant d'importance à l'évolution des récifs coralliens dans l'analyse du devenir des îles ? Parce que la disparition totale ou partielle des récifs coralliens se traduirait d'une part, par l'annihilation de tout mécanisme d'ajustement vertical des îles et des côtes au niveau marin, et d'autre part, par une aggravation de l'érosion côtière, et ce pour deux raisons. D'une part, la mort des récifs réduirait l'alimentation des îles en débris coralliens frais. D'autre part, elle engendrerait une augmentation de l'énergie marine à la côte, donc des prélèvements opérés par les vagues, en particulier en situation de tempête. Dans cette configuration, le facteur qui jouera un rôle crucial dans le maintien des côtes coralliennes sera l'état des stocks de sédiments inertes<sup>9</sup> susceptibles d'être mobilisés par les agents marins et de compenser la baisse de l'alimentation des côtes en débris coralliens frais. Le rôle de ces sables qui se sont accumulés sur les petits fonds marins ne doit pas être négligé, car certaines îles qui possèdent un récif peu développé (étroit ou présent sur une partie du linéaire côtier seulement) se sont formées et continuent à s'agrandir sous l'effet de la remontée de ces sables anciens vers les rivages (Cazes-Duvat *et al.* 2002).

Là où les conditions écologiques seront favorables au développement des coraux, les platiers récifaux sans vie corallienne, comme ceux de Kiribati ou des Tuamotu par exemple qui sont constitués d'une plateforme conglomératique, pourraient être colonisés par des colonies coralliennes. Il en va de même des côtes bordées par

élevée dans les mers que dans les océans - l'on peut globalement considérer qu'au-delà de 30°C, un phénomène de blanchissement peut survenir.

<sup>9</sup> Il s'agit des sédiments produits par des générations précédentes de récifs coralliens.



un platier rocheux sans vie corallienne. Dans ce cas, le développement d'un récif pourrait permettre, à terme, aux platiers de s'exhausser et de suivre l'élévation du niveau de la mer. Une telle évolution serait évidemment favorable à l'exhaussement des îles basses et plaines côtières associées, qui seraient davantage alimentées en débris coralliens qu'elles ne le sont aujourd'hui. Toutes les côtes ne s'éroderont donc pas forcément. Il faut néanmoins noter que le développement des coraux ne produirait pas de bénéfices immédiats pour les sociétés humaines. Les processus de colonisation et de croissance corallienne sont lents et risquent d'autant plus de l'être à l'avenir que, comme on l'a vu, les conditions écologiques tendent à se dégrader.

Les îles et les côtes qui ne s'exhausseront pas seront plus régulièrement submergées, pendant les marées de vives eaux, les tempêtes et les épisodes El Niño, alors que celles qui s'exhausseront ne seront pas forcément plus exposées à la submersion qu'elles le sont actuellement.

### *Quel devenir pour les mangroves ?*

Les mangroves jouent un rôle tout aussi important que les récifs coralliens dans le maintien des îles basses et des côtes sableuses, et dans la protection des enjeux humains face aux tempêtes. Là où les mangroves n'ont pas été défrichées et où les vasières qu'elles colonisent continuent à être alimentées en sédiments, ces forêts littorales continuent en général à s'étendre. Dans de nombreux atolls, du côté du lagon, l'on observe par exemple une extension de la mangrove sous l'effet de la colonisation des bancs sablo-vaseux par de jeunes palétuviers (Rankey 2011).

Quels impacts aura le changement climatique sur les mangroves ? Théoriquement, une élévation du niveau de la mer engendre leur migration vers le rivage, car les différentes zones écologiques qui constituent la vasière tendent elles-mêmes à migrer dans cette direction pour s'adapter. Mais au-delà de la seule élévation du niveau marin, deux facteurs vont jouer un rôle clé : la vitesse de la sédimentation et le niveau de pression anthropique qui s'exerce sur

cet écosystème. Là où les conditions sont favorables (sédimentation active et pression anthropique réduite), l'élévation du niveau de la mer peut être compensée par l'exhaussement des petits fonds marins. Dans ce cas de figure, les mangroves se maintiennent ou continuent à s'étendre vers le large. Les secteurs les plus sensibles sont donc incontestablement ceux qui sont déjà soumis à une forte érosion, qui détruit la mangrove, et/ou ceux dans lesquels celle-ci est dégradée par l'homme.

Il faut retenir de ce qui précède que les réponses des systèmes insulaires aux effets du changement climatique et de l'acidification des océans ne seront pas univoques, car elles dépendent d'une combinaison de facteurs dont l'assemblage et les interactions varient dans l'espace, y compris sur de faibles distances. De plus, les connaissances que nous avons de la capacité d'adaptation des coraux et des mangroves aux pressions naturelles sont encore insuffisantes pour établir un diagnostic définitif. S'il est indéniable que les récifs seront soumis à des pressions accrues à l'avenir, les résultats de travaux récents relativisent ceux, encore plus pessimistes, des premières études. Et comme le comportement des récifs jouera un rôle crucial dans l'évolution des îles coralliennes et des côtes sableuses des plaines côtières, dont le fonctionnement morpho-sédimentaire est lui-même complexe et variable dans l'espace, l'on ne saurait conclure que les îles coralliennes, par exemple, seront rapidement balayées de la surface de la planète. Aux incertitudes qui subsistent sur un certain nombre de processus, s'ajoutent donc de fortes incertitudes sur les temporalités auxquelles certains systèmes insulaires pourraient se trouver en situation critique.

### **Quels impacts sur les systèmes de ressources insulaires ?**

Pour progresser dans la chaîne des impacts du changement climatique et de l'acidification de l'océan sur les sociétés humaines, l'on s'intéressera ici aux conséquences des perturbations physiques sur les ressources terrestres (sols, eau, faune et flore) et marines (ressources récifales et halieutiques) des îles basses et des plaines côtières des îles hautes.



## À terre

Les ressources terrestres vont diminuer sous l'effet de différents processus (Nurse *et al.* 2014, Wong *et al.* 2014). D'abord, l'augmentation des températures atmosphériques accroît l'évapotranspiration<sup>10</sup>, ce qui assèche les sols et provoque une hausse des prélèvements opérés par les végétaux dans les lentilles d'eau saumâtre. Ces prélèvements ne doivent pas être négligés. En effet, les mesures effectuées dans l'atoll de Tarawa (Kiribati) ont montré que l'arbre le plus répandu, le cocotier, restituait à l'atmosphère par transpiration au moins 150 litres d'eau par jour. Dans ces conditions, l'augmentation prévisible du pompage d'eau par les cocotiers et le reste de la végétation renforcera significativement la pression qui s'exerce déjà sur ces lentilles utilisées par l'homme pour subvenir à ses besoins alimentaires. La dégradation de la qualité des sols et la diminution de la ressource en eau réduiront encore les possibilités de mise en culture, ce qui aura pour effet une baisse de la production qui posera, en particulier dans les systèmes insulaires vivriers, un défi de sécurité alimentaire. Il s'en suivra une augmentation de la dépendance extérieure, particulièrement dans les atolls ruraux de nombreux archipels coralliens. Les sols se dégraderont aussi sous l'effet de leur salinisation, due à l'élévation du niveau de la mer et à l'augmentation des submersions marines qui se produira dans les îles et plaines côtières qui ne s'exhausseront pas. Or, à l'exception du cocotier, peu d'espèces végétales comestibles tolèrent le sel. Les cocotiers ne le supportent d'ailleurs que jusqu'à un certain seuil au-delà duquel ils meurent. La contraction des surfaces exploitées, et en particulier des cocoteraies, réduira par ailleurs la disponibilité en matériaux de construction. Par ailleurs, l'évolution progressive des pratiques culturelles insulaires vers des espèces moins résistantes aux pressions du climat et des agents marins que les espèces indigènes – le bananier étant par exemple moins résistant que le pandanus ou le cocotier – risque d'accroître l'ampleur et la fréquence des pénuries alimentaires (exemple des Maldives suite aux dégâts engen-

drés par le tsunami de 2004) et des déficits commerciaux (cas des Antilles suite au passage du cyclone Dean en 2007) à l'avenir.

Le changement climatique aura des impacts sur l'évolution quantitative et qualitative des ressources en eau, qui dépend de plusieurs facteurs. Le plus important est le niveau de la mer, dont l'élévation réduira inévitablement le volume des lentilles d'eau saumâtre. En effet, selon le principe de Ghyben-Herzberg qui régit le fonctionnement des aquifères, toute élévation du niveau marin engendre une réduction de leur volume. Des submersions marines plus fréquentes, voire systématiques pendant les hautes mers de vives eaux, seront à l'origine d'intrusions répétées d'eau salée dans ces lentilles, ce qui contribuera à la dégradation de leur qualité. Les îles et les côtes soumises à une forte érosion côtière seront plus affectées que les autres par la réduction du volume des aquifères et la diminution de leur qualité. Un autre facteur important est la pluviométrie, qui détermine le taux et la fréquence de recharge des lentilles et des cours d'eau qui traversent les plaines côtières. Comme à ce jour l'on ne dispose d'aucune prévision fiable sur l'évolution des précipitations et que subsistent dans certains cas d'îles hautes des incertitudes sur les ressources souterraines en eau douce, il est impossible de dire quels îles et archipels seront les plus affectés par la dégradation de la ressource en eau. Là où les épisodes de sécheresse seront plus fréquents et/ou plus longs qu'actuellement, il faut s'attendre à une réduction du volume d'eau disponible. Par conséquent, l'eau deviendra plus salée, ce qui accroîtra la fréquence et la sévérité des pics de mortalité des cultures (cocotier et taro, notamment) qui s'observent déjà. Le prélèvement d'eau dans la lentille en période de sécheresse a pour effet de réduire encore son épaisseur. Cela signifie qu'en période de pénurie d'eau, l'utilisation de l'eau de la lentille, qui est cruciale pour la survie de nombreuses populations insulaires, pourrait la rendre impropre à la consommation. Comme les réservoirs d'eau pluviale des îles qui en possèdent sont vides quand la sécheresse dure, ce phénomène pourrait remettre en cause l'habitabilité de certaines îles basses. L'accès individuel à l'eau diminuera aussi sous

<sup>10</sup> L'évapotranspiration désigne l'ensemble des phénomènes relatifs à l'évaporation et à la transpiration des végétaux. Les deux sont liés car par leur transpiration, les végétaux livrent de l'eau issue du sol ou du sous-sol à l'atmosphère. Ils participent ainsi au cycle de l'eau.



l'effet de la forte croissance démographique que connaissent ces espaces.

### En mer

Comme le souligne le dernier rapport du GIEC (Pörtner *et al.* 2014, Hoegh-Guldberg *et al.* 2014), on ne dispose actuellement que de peu d'éléments sur les impacts qu'aura le changement climatique sur la distribution des ressources halieutiques. Les fortes pressions qui s'exercent déjà sur les récifs coralliens des régions les plus peuplées vont s'accroître partout où la croissance démographique restera forte. Comme différents facteurs concourent dans ces régions à la dégradation des récifs, les ressources récifales disponibles par habitant vont diminuer. Or, elles jouent un rôle important dans l'alimentation quotidienne des communautés insulaires, y compris encore dans les îles où la consommation de produits importés est élevée (Nurse *et al.* 2014). Et ce, d'autant plus que la modification possible des courants marins pourrait réduire la présence des espèces pélagiques dans certaines régions océaniques et, par là même, empêcher le report de la consommation sur ces espèces. C'est donc le secteur de la pêche dans son ensemble qui est interrogé, de la ressources aux moyens de pêche (bateaux, ports, etc.), ces derniers étant par ailleurs mis à mal par l'élévation du niveau de la mer, les événements extrêmes et d'autres facteurs de pression (crise économique, par exemple). Bien entendu, à cela s'ajoute la diminution des stocks de poissons due à la surpêche, qui sévit déjà sévèrement près des côtes et dans les lagon comme au large.

En dépit des incertitudes qui demeurent, et au-delà du fait que les systèmes insulaires répondront de manière différenciée aux manifestations du changement climatique et de l'acidification des océans, il est certain que les contraintes environnementales, qui sont déjà fortes, vont s'accroître, et que les ressources déjà limitées qu'offrent ces îles vont diminuer ou devenir plus aléatoires qu'aujourd'hui. Par conséquent, c'est la viabilité de certaines îles coralliennes et États insulaires qui pourrait à terme être remise en question. Mais à l'heure actuelle, la principale menace qui pèse sur la

viabilité de ces îles est le mal-développement qui a, au cours des dernières décennies, dégradé les ressources disponibles et réduit par certains aspects leur résilience face aux pressions naturelles (Duvat et Magnan 2012, 2014). Autrement dit, les principaux problèmes qui se posent aujourd'hui dans les îles coralliennes et les plaines côtières sont la pollution, les conflits fonciers, la raréfaction des ressources naturelles, etc., et non pas uniquement les effets du changement climatique et de l'acidification des océans. Dresser ce constat ne revient aucunement à nier que le changement climatique et l'acidification ont et auront des impacts majeurs, mais au contraire, à défendre l'idée que les sociétés actuelles vont devoir relever un défi qui sera sans égal avec ceux auxquels elles sont déjà confrontées aujourd'hui. Elles vont devoir faire face, avec une marge de manœuvre interne relativement réduite, à des impacts du changement climatique qui seront eux-mêmes démultipliés par les perturbations environnementales des dernières décennies, qui ont fortement accru la vulnérabilité des écosystèmes. Dans ces conditions, le changement climatique et l'acidification joueront le rôle d'accélérateurs des évolutions en cours. En réduisant la surface des îles dans un contexte de forte croissance démographique, le changement climatique va dans certains cas, par exemple, accuser les conflits fonciers. En engendrant une baisse des ressources récifales alors que les besoins alimentaires ne cessent d'augmenter, le changement climatique et l'acidification vont accélérer la dégradation et la mort des récifs dans certaines régions. La pression sur les ressources en eau va elle aussi s'accroître. Au total, il faut s'attendre à ce que la concentration de la population dans les capitales qui sont actuellement les seules zones à bénéficier de solutions alternatives (eau dessalée, produits alimentaires importés) s'accroisse, ce qui ne sera pas sans conséquences sur la sécurité alimentaire et la santé humaine notamment.

C'est donc la combinaison des effets du mal-développement, du changement climatique et de l'acidification, qui fait aujourd'hui redouter que certains archipels ne soient plus habitables à l'échéance de quelques décennies.



## ENTRE CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX LIÉS AU CO<sub>2</sub> ATMOSPHÉRIQUE ET MAL-DÉVELOPPEMENT : LE CAS SYMPTOMATIQUE DES ATOLLS

Cette troisième section insiste sur l'importance de replacer les pressions liées au changement climatique et à l'acidification des océans dans un contexte plus général de pressions d'origine également anthropique. L'intention est de montrer combien les menaces futures prennent d'abord racine dans des problèmes actuels de « mal-développement », c'est-à-dire de non durabilité du développement, qu'illustrent en particulier la forte dégradation des écosystèmes côtiers et l'urbanisation incontrôlée. Ici, le changement climatique et l'acidification des océans vont jouer le rôle d'accélérateurs des pressions sur les conditions de vie des sociétés insulaires.

Le cas de l'archipel corallien de Kiribati (Pacifique Central) permet d'illustrer ce propos (Duvat *et al.* 2013, Magnan *et al.* 2013). On se concentrera ici sur les effets du changement climatique, ceux de l'acidification de l'océan étant pour l'heure plus complexes à déterminer pour un cas précis comme Kiribati. Un rappel succinct des contraintes naturelles et des mutations socioéconomiques des deux derniers siècles permet d'expliquer quelles sont les pressions qui pèsent actuellement sur ce pays, et en quoi le changement climatique va les amplifier. Cela démontre l'importance majeure, lorsque l'on s'interroge sur le devenir de ces espaces et populations insulaires, de croiser les dimensions physiques (processus climatiques et chimiques, écosystèmes, etc.) et humains (rapport culturel aux ressources et au risque, modes de développement, etc.) pour appréhender ces systèmes dans leur complexité géographique et historique. Autrement dit, leur vulnérabilité aux changements environnementaux à venir ne dépend pas seulement de l'évolution de la relation climat/océan. Cette base de raisonnement est fondamentale pour comprendre la vulnérabilité dans toutes ses dimensions, mais aussi pour penser des stratégies d'adaptation qui soient localement pertinentes, cohérentes et réalistes quant à leur mise en œuvre.

Comme Tuvalu et les Maldives, Kiribati est principalement constitué d'atolls dont l'évolution dépend des réponses des coraux à la modification des conditions météo-marines. Sa zone économique exclusive (ZEE) est immense (3,5 millions de km<sup>2</sup>) et contraste avec la modestie de sa surface émergée (726 km<sup>2</sup>), laquelle est par ailleurs morcelée en un grand nombre d'îles. À l'échelle de l'atoll, l'élément dominant est le lagon, délimité par un anneau de corail qui porte des îles d'une superficie en général inférieure à 1 km<sup>2</sup>. Celles-ci ne sont par ailleurs pas habitables sur toute leur surface du fait de la présence de marécages et vasières à mangrove, de la forte instabilité de leurs côtes et d'altitudes très faibles par endroits. Culminant en général entre 3 et 4 m, elles sont en effet très exposées au risque de submersion marine. Parce qu'elles sont jeunes (entre 2000 et 4000 ans), faites de sable et de débris de corail, et exposées aux agents marins, leurs sols sont pauvres et leurs ressources végétales peu diversifiées. L'eau y est rare, saumâtre (2 à 3 g. de sel/l) et très sensible aux fluctuations climatiques. Elle provient des précipitations qui s'infiltrent pour constituer une lentille souterraine peu profonde (de 1 à 2 m environ) de taille proportionnelle à celle des îles. Dans les atolls du Sud de Kiribati, les sécheresses liées aux épisodes El Niño, qui peuvent durer jusqu'à 2 ans, rendent la présence d'eau aléatoire.

Sur le plan humain, trois mille ans d'histoire ont façonné une organisation territoriale basée sur une double stratégie : assurer à chaque famille un accès à la diversité (faible) des ressources terrestres et marines, et gérer rationnellement ces ressources. Le découpage des îles en lanières transversales reliant le lagon à l'océan permettait à chaque famille d'exploiter les différents milieux. L'habitat était en général implanté à une distance comprise entre 20 et 60 m de la côte lagonaire, abritée de la houle. À l'intérieur des terres, étaient cultivés le cocotier et le pandanus (bois, palmes et fruits) et, dans les zones très basses, le taro<sup>11</sup>. Les familles se partageaient également l'exploitation d'écluses à poissons côté océan et de bassins aquacoles implantés dans les zones

11 Tubercule emblématique de la civilisation océanienne (consommation et cérémonies). Chaque famille possédait une portion du « jardin à taro ».



abritées, et ramassaient en complément des coquillages et crustacés sur l'estran vaseux du lagon. Les communautés insulaires faisaient des réserves de nourriture et de noix de coco en prévision des aléas climatiques (Di Piazza 2001). Ce système a permis de diversifier autant que possible l'alimentation de la population et d'amortir les crises dues à la fluctuation des différentes ressources. Il n'a quasiment plus cours aujourd'hui, en particulier dans les îles urbanisées, les plus peuplées (atoll de Tarawa Sud).

En moins de deux siècles, Kiribati a connu cinq grandes mutations :

1. Le regroupement de l'habitat en villages dans les atolls ruraux et en zones urbaines dans l'atoll de Tarawa.
2. La concentration du pouvoir dans l'atoll-capitale de Tarawa, avec abandon du système d'autogestion à l'échelle de chaque atoll.
3. Le passage d'un droit coutumier riche et complexe à un droit écrit simplificateur
4. Le remplacement d'une économie de subsistance par une économie marchande
5. La déstructuration du système foncier traditionnel.

Les dernières décennies se sont par ailleurs caractérisées, notamment sous l'impulsion des progrès réalisés dans le domaine de la santé, par une explosion démographique dans l'atoll-capitale. La forte croissance de la population de Kiribati – de 38000 habitants en 1963 à plus de 103000 en 2010, soit +171 %! – s'est en effet surtout concentrée dans le district urbain de Tarawa Sud. Celui-ci abrite aujourd'hui la moitié de la population du pays sur seulement 2 % du territoire, avec une densité de population moyenne de 3125 hab/km<sup>2</sup>. Cette situation est à l'origine (i) d'une dégradation rapide des écosystèmes et des ressources, (ii) d'une perte du lien identitaire et culturel à l'environnement, (iii) d'une forte exposition des populations aux aléas météo-marins due à l'occupation de zones submersibles et instables, et (iv) d'une dépendance croissante vis-à-vis de l'aide internationale et des importations alimentaires.

L'on déduit de cela que de telles transformations, replacées dans le contexte des conclusions des sections 1 et 2 de ce texte (affaiblissement des

réécifs coralliens, érosion/submersion, raréfaction des ressources en eau, etc.), vont en grande partie expliquer la vulnérabilité de Kiribati au changement climatique et à l'acidification des océans.

## LES MESSAGES-CLÉS À RETENIR ET LES PISTES À EXPLORER

Si leurs caractéristiques intrinsèques, tant physiques qu'anthropiques, placent les petites îles en première ligne des menaces associées au changement climatique et à l'acidification des océans, leur situation pose des questions plus universelles en ce sens que, finalement, la plupart des littoraux du monde sont eux aussi menacés par les événements météo-marins extrêmes et par la dégradation progressive des conditions de vie des écosystèmes et des sociétés. Les petites îles ne présentent donc pas des situations si marginales qu'on pourrait le penser a priori. Elles sont dès lors sources d'enseignements majeurs, dont trois principaux ressortent de ce texte.

D'abord, la vulnérabilité des territoires littoraux aux changements environnementaux futurs ne dépend pas que de l'élévation du niveau de la mer et de l'évolution des événements extrêmes. Si ce texte montre bien que ces deux facteurs de pression ont beaucoup d'importance, ils sont souvent les seuls à être invoqués dans les analyses de vulnérabilité sur le littoral. Or, ils constituent un filtre d'analyse trop étroit qui ne tient pas compte des conséquences ni du réchauffement, ni de l'acidification des océans. Or, ces deux processus vont fragiliser en profondeur les systèmes de ressources des territoires insulaires, notamment les maillons fondamentaux de la chaîne alimentaire à la côte (réécifs coralliens, par exemple) comme en pleine mer (phytoplancton, par exemple).

Ensuite, la vulnérabilité ne dépend pas non plus que des seules pressions d'ordre naturel, en l'occurrence les aléas ponctuels et les changements plus graduels des conditions environnementales. Les facteurs anthropiques vont jouer un rôle eux aussi déterminant dans le devenir des îles et, plus largement, des côtes (Duvat et Magnan 2014). Si le changement climatique et l'acidification des océans sont des menaces réelles – il est irrespon-



sable et dangereux de le nier –, les problèmes de demain sont intimement liés à des modes actuels d'occupation de l'espace et d'exploitation des ressources qui ne sont pas durables.

Cela signifie enfin qu'engager dès maintenant, dans les îles comme sur les littoraux en général, des politiques volontaristes de réaménagement des territoires, de protection de l'environnement et de modification du rapport des sociétés et de

leurs économies aux ressources marines et côtières, constitue un pas majeur vers l'adaptation au changement climatique et à l'acidification des océans. L'identification des facteurs anthropiques de pression qui agissent aujourd'hui fournit finalement autant de clés de lecture pour penser et commencer à mettre en œuvre l'adaptation aux changements environnementaux (Magnan 2013). Les responsabilités humaines sont de puissants leviers sur lesquels agir pour limiter les risques futurs.

## RÉFÉRENCES

- ARNDT D. S., BARINGER M. O. and JOHNSON M. R., 2010 – *State of the Climate 2009*. Bull Am Meteorol Soc, 91 : 1-222.
- BECKER M. B., MEYSSIGNAC C., LETETREL C., LLOVEL W., CAZENAVE A. and DELCROIX T., 2012 – *Sea Level Variations at Tropical Pacific Islands since 1950*. Global Planet. Change 80-81 : 85-98.
- CAZES-DUVAT V., PASKOFF R. et DURAND P., 2002 – *Évolution récente des deux îles coralliennes du banc des Seychelles (océan Indien occidental)*. Géomorphologie, 3 : 211-222.
- CHURCH J. A. et al., 2013 – *Sea Level Change*. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- CIAIS P. et al., 2013 – *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- DIAMOND J., 2006 – *Effondrement : comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*. Gallimard.
- Di Piazza A., 2001 – *Terre d'abondance ou terre de misère. Représentation de la sécheresse à Nikunau (République de Kiribati, Pacifique central)*, L'Homme, 157.
- DONEY S. C., FABRY V. J., FEELY R. A. and KLEYPAS J. A., 2009 – *Ocean Acidification: the Other CO<sub>2</sub> Problem*. Ann Rev Marine Sci 1 : 169-192.
- DUPONT J.-F., 1987 – *Les atolls et le risque cyclonique: le cas de Tuamotu*. Cahiers des sciences humaines, 23 (3-4) : 567-599.
- DUVAT V. et MAGNAN A., 2012 – *Ces îles qui pourraient disparaître*. Le Pommier-Belin.
- DUVAT V., MAGNAN A. and POUGET F., 2013 – *Exposure of Atoll Population to Coastal Erosion and Flooding: a South Tarawa Assessment, Kiribati*. Sustainability Science, Special Issue on Small Islands. 8 (3) : 423-440.
- V. DUVAT et A. MAGNAN, 2014 – *Des catastrophes... « naturelles » ?* Le Pommier-Belin.
- ETIENNE S., 2012 – *Marine Inundation Hazards in French Polynesia: Geomorphic Impacts of Tropical Cyclone Oli in February 2010*. Geological Society, London, Special Publications, 361 : 21-39.
- GATTUSO J.-P. and HANSSON L., 2011 – *Ocean Acidification*. Oxford University Press.
- GATTUSO J.-P., HOEGH-GULDBERG O. and PÖRTNER H.-O., 2014 – *Cross-Chapter Box On Coral Reefs*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- GATTUSO J.-P., BREWER G., HOEGH-GULDBERG O., KLEYPAS J. A., PÖRTNER H.-O. and SCHMIDT D. N., 2014 – *Cross-Chapter Box on Ocean Acidification*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.



- GLYNN P. W., MATÉ J. L., BAKER A. C. and CALDERON M. O., 2001 – *Coral Bleaching and Mortality in Panama and Ecuador during the 1997-1998 El Nino Southern Oscillation Event: Spatial/Temporal Patterns and Comparisons with the 1982-1983 Event*. *Bulletin of Marine Sciences*, 69: 79-109.
- HOEGH-GULDBERG O., 1999 – *Climate Change, Coral Bleaching and the Future of the Worlds' Coral Reefs*. *Marine and Freshwater Resources*, 50: 839-866.
- HOEGH-GULDBERG O., 2011 – *Coral Reef Ecosystems and Anthropogenic Climate Change*. *Regional Environmental Change*, 1: 215-227.
- HOEGH-GULDBERG O., CAI R., BREWER P., FABRY V., HILMI K., JUNG S., POLOCZANSKA E. and SUNDBY S., 2014 – *The Oceans*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- HOEKE R. K., MCINNES K. L., KRUGER J. C., MCNAUGHT R. J., HUNTER J. R. and SMITHERS S. G., 2013 – *Widespread Inundation of Pacific Islands Triggered by Distant-Source Wind-Waves*. *Global and Planetary Change*, 108: 128-138.
- HOWES E. *et al.*, In Press – *The Physical, Chemical and Biological Impacts of Ocean Warming and Acidification*. *IDDR Study*.
- HUGHES T. P. *et al.*, 2003 – *Climate Change, Human Impacts and the Resilience of Coral Reefs*. *Science*, 301: 929-933.
- LEVERMANN A., CLARK P. U., MARZEION B., MILNE G. A., POLLARD D., RADIC V. and ROBINSON A., 2013 – *The Multi-Millennial Sea-Level Commitment of Global Warming*. *PNAS* 110 (34): 13745 – 13750.
- MAGNAN A., DUVAT V. et POUGET F., 2013 – *L'archipel de Kiribati entre développement non durable et changement climatique: quelles recherches pour quelle adaptation ?* *IDDR Policy Briefs*, 09/13.
- MAGNAN A., 2013 – *Éviter la maladaptation au changement climatique*. *IDDR Policy Briefs*, 08/13.
- NURSE L., MCLEAN R., AGARD J., BRIGUGLIO L. P., DUVAT V., PELESIKOTI N., TOMPKINS E. and WEBB A., 2014 – *Small Islands*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- PÖRTNER H.-O., KARL D., BOYD P., CHEUNG W., LLUCH-COTA S. E., NOJIRI Y., SCHMIDT D. and ZAVIALOV P., 2014 – *Ocean Systems*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- RANKEY E. C., 2011 – *Nature And Stability of Atoll Island Shorelines: Gilbert Island Chain, Kiribati, Equatorial Pacific*. *Sedimentology*, 44: 1859.
- RHEIN M. *et al.*, 2013 – *Observations: Ocean*. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- RIEGL B., 2007 – *Extreme Climatic Events and Coral Reefs: how Much Short-Term Threat from Global Change ?* *Ecological studies*, 192: 315-341.
- SOLOMON S., PLATTNER G.-K., KNUTTI R. and FRIEDLINGSTEIN P., 2009 – *Irreversible Climate Change Due to Carbon Dioxide Emissions*. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, 106 (6): 1704-1709.
- TURLEY C., 2005 – *The Other CO<sub>2</sub> Problem*. *Open Democracy*. [www.opendemocracy.net/globalization-climate\\_change\\_debate/article\\_2480.jsp](http://www.opendemocracy.net/globalization-climate_change_debate/article_2480.jsp).
- WONG P. P., LOSADA I. J., GATTUSO J.-P., HINKEL J., KHATTABI A., MCINNES K., SAITO Y. and SALLENGER A., 2014 – *Coastal Systems and Low-Lying Areas*. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.



# Auteurs

## **Denis Allemand**

*Centre Scientifique de Monaco.*

## **Gilles Bœuf**

*Museum National d'Histoire Naturelle (MNHN) et Université Pierre et Marie Curie (UPMC) Banyuls-sur-Mer.*

## **Laurent Bopp**

*Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), GIEC, Gif-sur-Yvette.*

## **Chris Bowler**

*Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), École Normale Supérieure (ENS), Département de Biologie, Paris.*

## **Philippe Cury**

*Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Sète.*

## **Virginie Duvat**

*Université de la Rochelle, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Littoral Environnement et Sociétés (LIENSs), GIEC.*

## **Françoise Gaill**

*Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Institut Écologie et Environnement (INEE), Paris.*

## **Jean-Pierre Gattuso**

*Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Université Pierre et Marie Curie (UPMC), GIEC, Villefranche-sur-Mer.*

## **Lionel Guidi**

*Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Université Pierre et Marie Curie (UPMC), Villefranche-sur-Mer.*

## **Catherine Jeandel**

*Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), Toulouse.*

## **Eric Karsenti**

*Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), European Molecular Biology Laboratory (EMBL), École Normale Supérieure (ENS), Paris.*

## **Nadine Le Bris**

*Université Pierre et Marie Curie (UPMC), Laboratoire d'Écogéochimie des Environnements Benthiques (LECOB), Banyuls-sur-Mer.*

## **Alexandre Magnan**

*Institut du Développement Durable et des Relations Internationales (IDDRI), Sciences Po, Paris.*

## **Herlé Mercier**

*Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Laboratoire d'Océanographie Physique (LPO), Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), Ifremer, Université de Bretagne occidentale, Brest.*

## **Benoît Meyssignac**

*Centre National d'Études Spatiales (CNES), Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiale (LEGOS), Toulouse.*

## **Marc Metian**

*International Atomic Energy Agency (IAEA), Laboratoire Environnement, Monaco.*

## **Gilles Reverdin**

*Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques (LOCEAN), Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), Université Pierre et Marie Curie (UPMC), Paris.*

## **Sabrina Speich**

*École Normale Supérieure (ENS), Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), Paris.*

## **Colomban de Vargas**

*Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Université Pierre et Marie Curie (UPMC), Roscoff.*



# Comité scientifique

## **Françoise Gaill**

*CNRS – Coordinatrice du comité scientifique*

## **Denis Allemand**

*Centre scientifique de Monaco*

## **Denis Bailly**

*UBO*

## **Julian Barbière**

*COI UNESCO*

## **Gilles Bœuf**

*MNHN UPMC*

## **Laurent Bopp**

*CNRS*

## **Chris Bowler**

*CNRS ENS*

## **Biliana Cicin-Sain**

*Global Ocean Forum*

## **Philippe Cury**

*IRD*

## **Paul Falkowski**

*Rutgers University*

## **Albert Fisher**

*COI UNESCO*

## **Jean-Pierre Gattuso**

*CNRS GIEC*

## **Catherine Jeandel**

*CNRS*

## **Eric Karsenti**

*CNRS EMBL*

## **Nadine Le Bris**

*UPMC*

## **Lisa Levin**

*Scripps institution of oceanography*

## **Alexandre Magnan**

*IDDR*

## **Herlé Mercier**

*CNRS*

## **Marc Metian**

*AIEA*

## **Gilles Reverdin**

*CNRS*

## **Sabrina Speich**

*ENS*

## **Lisa Emelia Svensson**

*Ambassadrice de la Suède pour les océans,  
les mers et l'eau douce*

## **Jorge-Luis Valdes**

*COI UNESCO*

## **Marjan Van Den Belt**

*Massey University*

## **Colomban de Vargas**

*CNRS*

# Plateforme Océan et Climat

## Intégrer l'océan dans le champ des négociations climatiques

Lancée à l'UNESCO en juin 2014, la plateforme « Océan et Climat » regroupe les acteurs du monde scientifique, associatif et économique concernés par l'océan. Elle a pour objectif de faire entendre la voix de l'océan dans la négociation climat, notamment lors de la conférence de *Paris Climat 2015*.

Son comité scientifique est constitué de scientifiques de renommée internationale dans les domaines de l'océanographie, de la biodiversité et de l'écologie des environnements marins, mais aussi dans les sciences sociales et économiques liées à l'océan. Leurs textes rassemblés ici proposent une première synthèse sur les points clés des enjeux océan et climat. Ils constituent ainsi une base scientifique essentielle pour tous ceux – des décideurs aux citoyens – qui s'impliquent dans les négociations et les décisions qui seront prises dans le cadre de la Convention-Cadre des Nations unies sur les Changements climatiques notamment à Paris en décembre 2015 au cours de la COP 21.



[www.ocean-climate.org](http://www.ocean-climate.org)